

**DIE FUNKTIONELLE MAGNETRESONANZTOMOGRAPHIE (FMRT) ALS
METHODE DES NEUROMARKETINGS:**

EINE KRITISCHE WÜRDIGUNG

Inauguraldissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
eines Doktors der Wirtschaftswissenschaft
(doctor rerum oeconomicarum)
am Fachbereich Wirtschaftswissenschaft
Schumpeter School of Business and Economics
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von
Dipl.-Oec. Jong John Yun
aus Leverkusen

Wuppertal, im Dezember 2014

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20150708-150851-8

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20150708-150851-8>]

Danksagung

Großer Dank gebührt meinem Doktorvater, Prof. Dr. Peter Kappelhoff, für seine Geduld und die konstruktiven Gespräche. Ich bedanke mich vielmals für die gute Zusammenarbeit am Lehrstuhl und die generelle Unterstützung, die ich von seiner Seite erfahren habe.

Ein großer Dank gilt ebenfalls Prof. Dr. Bernd Weber und Dr. Klaus Fließbach, die mich in meiner Zeit bei der Neuroimaging-Abteilung der Life & Brain GmbH der Universitätsklinik Bonn und auch danach sehr unterstützt haben. Zum einen bedanke ich mich für die vielen Gespräche und den praxisnahen Zugang zur funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT). Zum anderen danke ich beiden für die Ermöglichung des fMRT-Anwendungsbeispiels im Rahmen der vorliegenden Arbeit. Ohne ihre Unterstützung wäre dies nicht möglich gewesen.

Mein größter Dank richtet sich an die Menschen, die mich sowohl in den guten wie auch in den schwierigen Zeiten begleitet haben. Für ihre Geduld, ihr Verständnis, ihre Einfühlungsvermögen, ihre Motivation und ihre Unterstützung in allen Belangen möchte ich mich vor allem bei meinen Eltern, meiner Schwester und meinen Freunden bedanken.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Anhangsverzeichnis.....	XII
Abkürzungsverzeichnis.....	XIII
1 Einleitung.....	18
2 Allgemeiner und spezieller Anwendungsbereich	28
2.1 Allgemeiner Anwendungsbereich.....	28
2.1.1 Der Weg zur Neuroökonomie	28
2.1.2 Neuroökonomie	31
2.2 Spezieller Anwendungsbereich.....	36
2.2.1 Entwicklung des operativen Marketings	37
2.2.2 Neuromarketing.....	42
2.2.2.1 Neuromarketing im weiteren Sinne	42
2.2.2.2 Neuromarketing im engeren Sinne	51
3 Gehirn und Gehirnaktivität - Biologische Grundlagen.....	60
3.1 Das Gehirn.....	60
3.1.1 Allgemeines zur Gehirnanatomie.....	62
3.1.2 Grundaufbau des Gehirns	66
3.2 Die funktionelle Einheit des Gehirns	72
3.2.1 Die Nervenzelle	72

3.2.2 Die Nervenzellmembran, Ruhe- und Aktionspotenzial	76
3.2.3 Die synaptische Übertragung	87
3.2.4 Die Gliazellen	95
4 Die strukturelle Magnetresonanztomographie (MRT)	98
4.1 Physikalische Grundlagen der MRT	98
4.2 Bilderstellung.....	104
4.2.1 Grundlegende Anmerkungen	104
4.2.2 Generierung der räumlichen Information	106
4.2.3 Bildqualität.....	115
4.3 Der MR-Scanner	125
4.4 MRT-Sicherheitsaspekte	130
5 Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)	134
5.1 Das MR-Signal im Rahmen der fMRT	134
5.1.1 Neurovaskuläre Kopplung	135
5.1.2 Signalentstehung.....	140
5.2 Grundlegendes zur fMRT-Messung	145
5.2.1 Experimentelles Design	145
5.2.2 Datenakquisition und Daten	152
5.2.3 Stichprobengröße und Einsatz erfahrener Probanden	156
5.3 Spezielles zur fMRT-Messung	158
5.3.1 Signal und Rauschen	158
5.3.2 Vorverarbeitung der Daten	163
5.4 Statistische Datenauswertung.....	174
5.4.1 Einzelanalyse	175
5.4.2 Gruppenanalyse	189
5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse.....	193

6 Eine fMRT-Studie zur Wirkung von Sonderangebotssignalen bei Kaufentscheidungen	206
6.1 Theoretischer Hintergrund	207
6.2 Neuronaler Hintergrund.....	211
6.3 Versuchsaufbau und -ablauf	214
6.3.1 Der Versuchsaufbau.....	214
6.3.2 Der Versuchsablauf	222
6.4 Anmerkungen zur Erhebung, Vorverarbeitung und Analyse der Daten.....	227
6.5 Ergebnisse	229
6.5.1 fMRT-Daten.....	230
6.5.2 Verhaltensdaten	235
6.6 Interpretation	239
7 Interpretationslogik	245
7.1 Neuronale Interpretation	246
7.1.1 Generelle Überlegungen zur neuronalen Interpretation.....	246
7.1.2 Neuronale Interpretation für den Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal	249
7.2 Handlungstheoretische Interpretation	264
7.2.1 Generelle Überlegungen zur handlungstheoretischen Interpretation	264
7.2.2 Handlungstheoretische Interpretation des Kontrastes SA-Signal vs. kein SA-Signal.....	272
8 Fazit.....	276
8.1 Stellungnahme zum Spannungsfeld.....	276
8.1.1 Anmerkungen zum Gedankenlesen	276
8.1.2 Anmerkungen zur generell kritischen Position hinsichtlich der fMRT	286
8.1.3 Anmerkungen zum Neuromarketing im weiteren Sinne.....	292

8.1.4 Anmerkungen zum Neuromarketing im engeren Sinne	298
8.2 Eigene Position und Ausblick	304
8.2.1 Eigene Position.....	304
8.2.2 Ausblick	312
Literaturverzeichnis.....	317
Anhang.....	341

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufgaben des Marketings als Managementprozess	37
Abbildung 2: Die klassischen Marketinginstrumente (vier Ps) im Marketingmix	38
Abbildung 3: Entwicklungsstufen des Marketings.....	39
Abbildung 4: Beispielhaftes SOR-Modell des Konsumentenverhaltens.....	41
Abbildung 5: Limbic-Map	43
Abbildung 6: Informationsverarbeitung über beide Systeme	50
Abbildung 7: Implizites und explizites System auf neuronaler Ebene.....	51
Abbildung 8: ZNS und PNS	62
Abbildung 9: Häufig verwendete Lagebezeichnungen.....	65
Abbildung 10: Anatomische Schnittebenen und Lagebezeichnungen	66
Abbildung 11: Sagittalschnitt durch das Gehirn	66
Abbildung 12: Lappengliederung und Rindenfelder der linken Hemisphäre des Großhirns.....	68
Abbildung 13: Teile des limbischen Systems.....	72
Abbildung 14: Die Nervenzelle	73
Abbildung 15: Die Nervenzelle, Zellkörper, Synapse an Synapse.....	75
Abbildung 16: Lipid-Doppelschicht	77
Abbildung 17: Ionenkanäle in Bezug zu den entsprechenden Ionen	78
Abbildung 18: Natrium-Kalium-Pumpe	80
Abbildung 19: Verlauf eines Aktionspotenzials.....	82
Abbildung 20: Ionenein- und -ausstrom im Verlauf eines Aktionspotenzials.....	83
Abbildung 21: Kontinuierliche Weiterleitung eines Aktionspotenzials	85
Abbildung 22: Saltatorische Erregungsleitung	86
Abbildung 23: Exocytose	88
Abbildung 24: Wirkung einer erregenden Synapse	93
Abbildung 25: Wirkung einer hemmenden Synapse.....	94
Abbildung 26: Präzessionsbewegung.....	99
Abbildung 27: Ausrichtung der Spins außerhalb (a) und innerhalb eines Magnetfeld (b).....	100
Abbildung 28: Längsmagnetisierung (M_z).....	101
Abbildung 29: Von der Quermagnetisierung zurück in die Längsmagnetisierung...	102
Abbildung 30: Free Induction Decay (FID).....	102
Abbildung 31: T_2 - und T_1 -Relaxation	104

Abbildung 32: Auswirkung des Gradienten auf die Spinfrequenz	108
Abbildung 33: Schematische Darstellung einer Puls- bzw. Messsequenz.....	110
Abbildung 34: Beispielhafte Graustreifenmuster für einzelne Elemente des K-Raumes.....	111
Abbildung 35: Überführung des K-Raumes in den Bildraum	111
Abbildung 36: Theoretische Verbindung zwischen K- und MR-Bild.....	112
Abbildung 37: Praktische Beziehung zwischen K- und Ortsraum	114
Abbildung 38: Signaldifferenz zwischen zwei unterschiedlichen Gewebetypen	115
Abbildung 39: Signal und Rauschen.....	116
Abbildung 40: Grafische Darstellung des Rauschens.....	116
Abbildung 41: Beziehung zwischen Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und Schichtdicke (d)	117
Abbildung 42: Beziehung zwischen Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und Anzahl an Akquisitionen (AKQ).....	118
Abbildung 43: Einfluss von Magnetfeld-Inhomogenitäten	120
Abbildung 44: Unterschiedliche Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR).....	121
Abbildung 45: Unterschiedliche Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR) in Bezug auf die resultierende Gehirnabbildung	122
Abbildung 46: Unterschiedliche Bildfelder (FOV).....	123
Abbildung 47: Auswirkung unterschiedlicher Voxelgrößen auf die räumliche Auflösung.....	124
Abbildung 48: Front- und Rückansicht des Siemens MAGNETOM Avanto (1,5 Tesla).....	125
Abbildung 49: Die Kopfspule	128
Abbildung 50: Das Gradientensystem	129
Abbildung 51: Grundstruktur des MR-Scanners	130
Abbildung 52: Die Blut-Hirnschranke	138
Abbildung 53: Wechselwirkung der verschiedenen Prozesse von der neuronalen Aktivität bis zur Messung des MR-Signals.....	143
Abbildung 54: Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem kurzen Stimulus).....	144
Abbildung 55: Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem länger andauernden Stimulus).....	145
Abbildung 56: Experimentelle Bedingung (Gesichter) und mögliche Kontrollbedingungen	148
Abbildung 57: Block-Design.....	150

Abbildung 58: Anatomisches vs. funktionelles Bild	154
Abbildung 59: fMRT-Daten	155
Abbildung 60: Scanner drift	160
Abbildung 61: Veränderung des BOLD-Signals für Gesichtswahrnehmung und Objektwahrnehmung im fusiformen Gyrus.....	161
Abbildung 62: Zeitreihe in Bezug auf das BOLD-Signal (bereinigte Daten).....	163
Abbildung 63: Die Bewegungskorrektur	166
Abbildung 64: Korrektur auf $\frac{1}{2}$ TR bzw. die mittlere Schicht (Top-down/ TR = 3s) (eigene Darstellung)	168
Abbildung 65: Problematik i.V.m. der Schichtmessung	169
Abbildung 66: Prinzip des Gauss-Filters in einer Dimension	172
Abbildung 67: Tatsächlich erfasste BOLD-Signal-Zeitreihe für einen Voxel (eigene Darstellung)	177
Abbildung 68: Vergleich eines geschätzten (rot) mit dem hypothetisch gemittelten erhobenen Signalverlauf (blau)	178
Abbildung 69: Konvolution	179
Abbildung 70: Matrixbezogene Darstellung der Modellgleichung im Falle einer fMRT-Datenanalyse	181
Abbildung 71: Grafische Veranschaulichung der Schätzung der Modellparameter	183
Abbildung 72: Kombination des ALM und des t-Test im Sinne der fMRT- Datenanalyse (eigene Darstellung).....	184
Abbildung 73: Entscheidungen im statistischen Test.....	187
Abbildung 74: Beispielhafte t-Karte aus der eigenen Untersuchung.....	188
Abbildung 75: Grafische Veranschaulichung des Ablaufs im Zusammenhang mit einer Fixed-Effects-Analyse	190
Abbildung 76: Grafische Veranschaulichung der Random-Effects-Analyse	191
Abbildung 77: Fixed-Effects-Analyse vs. Random-Effects-Analyse	192
Abbildung 78: t-Karte aus der Studie von Bennett et al. (2010).....	195
Abbildung 79: Kaufangebot ohne Sonderangebotssignal.....	214
Abbildung 80: 2x3x2-Design.....	216
Abbildung 81: Verschiedene Varianten eines Stimulus	218
Abbildung 82: Darbietungsdauer eines Stimulus	219
Abbildung 83: Ausschnitt aus dem Ablauf der Untersuchung	219
Abbildung 84: Video-Goggles, angebracht auf der oberen Hälfte der 2-teiligen Kopfspule.....	222
Abbildung 85: Response-Devices (Vier-Finger-Handgeräte).....	222

Abbildung 86: Ablauf der fMRT-Studie	223
Abbildung 87: Der Warentisch	224
Abbildung 88: t-Kontrast „Kaufen vs. Nicht kaufen“ (Whole-Brain-Analyse: p _{unkorrigiert} < 0.005).....	231
Abbildung 89: t-Kontrast „Kaufen vs. Nicht kaufen“ (Whole-Brain-Analyse: p _{unkorrigiert} < 0.001).....	232
Abbildung 90: t-Kontrast „Mehrere Produkte vs. ein Produkt“ (I) (Small Volume Correction: Cluster-Level p _{FWER} < 0.05)	234
Abbildung 91: t-Kontrast „Mehrere Produkte vs. ein Produkt“ (II) (Small Volume Correction: Cluster-Level p _{FWER} < 0.05)	234
Abbildung 92: t-Kontrast „SA-Signal vs. kein SA-Signal“ (Small Volume Correction: Cluster-Level p _{FWER} < 0.05)	235
Abbildung 93: Einzelproduktsituation Vergleich S vs. N (% Käufe Kategorie)	236
Abbildung 94: Einzelproduktsituation Vergleich S vs. N (Response Time in ms) ...	237
Abbildung 95: Produktpaketsituation Vergleich S vs. N (% Käufe Kategorie).....	237
Abbildung 96: Produktpaketsituation Vergleich S vs. N (Response Time in ms)	238
Abbildung 97: Einzelprodukt- vs. Produktpaketsituation Vergleich S (% Käufe pro Kategorie)	239
Abbildung 98: Einzelprodukt- vs. Produktpaketsituation Vergleich S (Response Time in ms)	239
Abbildung 99: Verschiedene Szenarien i.V.m. der neuronalen Interpretation	246
Abbildung 100: Generelle Modellüberlegungen hinsichtlich des Kaufentscheidungsprozesses	269
Abbildung 101: Zu stark vereinfachtes Modell hinsichtlich einer neurophysio- logischen Erklärung von Kaufentscheidungen	271

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Variation der Matrixgröße und relatives SNR.....	123
Tabelle 2: Nachbildung einer statistischen Tabelle.....	188
Tabelle 3: „Kaufen vs. Nicht kaufen“ Small Volume Correction (Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$) für das Mittelhirn.....	233
Tabelle 4: „Kaufen vs. Nicht kaufen“ Small Volume Correction (Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$) für das VS.....	233
Tabelle 5: „Kaufen vs. Nicht kaufen“ Small Volume Correction (Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$) für den OFC.....	233
Tabelle 6: Separate Betrachtung der Einzelprodukt- und Produktpaketperspektive	236
Tabelle 7: Gemeinsame Betrachtung von Einzelprodukt- und Produktpaketperspektive in Bezug auf Sonderangebote	238

Anhangsverzeichnis

Anhang 1: Die Experimentalbeschreibung.....	341
Anhang 2: Übersicht über die Preise	343
Anhang 3: Anonymisierte Probandendaten	345
Anhang 4: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Whole Brain-Analyse ($p_{\text{unkorrigiert}} < 0.005$)	346
Anhang 5: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Whole Brain-Analyse ($p_{\text{unkorrigiert}} < 0.001$)	348
Anhang 6: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Small Volume Correction ($p_{\text{FWER}} < 0.05$) „Mittelhirn“	349
Anhang 7: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Small Volume Correction ($p_{\text{FWER}} < 0.05$) „ventrales Striatum (VS)“	350
Anhang 8: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Small Volume Correction ($p_{\text{FWER}} < 0.05$) „orbitofrontaler Cortex (OFC)“	350
Anhang 9: Kontrast Mehrere Produkte vs. ein Produkt Whole Brain-Analyse ($p_{\text{unkorrigiert}} < 0.001$)	351
Anhang 10: Kontrast Mehrere Produkte vs. ein Produkt Small Volume Correction ($p_{\text{FWER}} < 0.05$) „linker seitlicher Präfrontalcortex“	351
Anhang 11: Kontrast Mehrere Produkte vs. ein Produkt Small Volume Correction ($p_{\text{FWER}} < 0.05$) „rechter seitlicher Präfrontalcortex“	352
Anhang 12: Kontrast Mehrere Produkte vs. ein Produkt Small Volume Correction ($p_{\text{FWER}} < 0.05$) „visueller Cortex“	352
Anhang 13: Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal Whole Brain-Analyse ($p_{\text{unkorrigiert}} < 0.001$)	353
Anhang 14: Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal Small Volume Correction ($p_{\text{FWER}} < 0.05$) „linke vordere Inselrinde“	354
Anhang 15: Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal Small Volume Correction ($p_{\text{FWER}} < 0.05$) „rechte vordere Inselrinde“	354
Anhang 16: Darstellung des Hintergrundwissens auf drei Abstraktionsebenen.....	355

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
ACC	anteriores Cingulum/ anteriorer cingulärer Cortex
AG	Aktiengesellschaft
AIDA	Attention-Interest-Desire-Action
AKQ	Anzahl Akquisitionen
ALM	Allgemeines lineares Modell
AP	Aktionspotenzial
ATP	Adenosintri-phosphat
α	Irrtumswahrscheinlichkeit
B	Magnetisches Moment
B_0	Externes Magnetfeld
BCM	Brand Code Management
BOLD	Blood Oxygenation Level Dependent
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
β	Beta
C	Coronarschnitt
ca.	circa
Ca	Calcium
Cl	Chlorid
cm	Zentimeter
CNR	contrast-to-noise-ratio/ Kontrast-zu-rausch-Verhältnis
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
°C	Grad Celsius
D	Differenz; Diverse
d	Schichtdicke
d.h.	das heißt
DLPFC	dorsolateraler präfrontaler Cortex
DOSA	Disruption of smoking addiction
Dr.	Doktor
2D-FT	zweidimensionale Fourier-Transformation
3D	dreidimensionale
e	Einzelprodukt

EC	Euler-Charakteristik
EDR	Elektrodermale Reaktion
EEG	Elektroenzephalographie
e.g.	exempli gratia/ for example
EP	experienced pleasantness
EPI	Echo planar imaging
EPSP	Exzitatorisches postsynaptisches Potenzial
ER	Endoplasmatisches Reticulum
€	Euro
et al.	und andere
evtl.	eventuell
f.	folgende
FCB	First-Choice-Brand
FDR	false discovery rate
ff.	fortfolgende
FFA	fusiform face area
FFT	Fast Fourier Transformation
FID	Free Induction Decay
FLASH	Fast low angle shot
FMCG	Fast Moving Consumer Goods
fMRT	funktionelle Magnetresonanztomographie
fMRI	functional magnetic resonance imaging
FOV	field of view/ Bildfeld
FWER	family wise error rate
FWHM	Full Width at Half Maximum
g	günstiger Preis
GE	Gedleinheiten
GfK	Gesellschaft für Konsum
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GRFT	Gaussian random field theory
G_x	Gradient in Bezug auf die x-Dimension
G_y	Gradient in Bezug auf die y-Dimension
G_z	Gradient in Bezug auf die z-Dimension
H	Horizontalschnitt; Wasserstoff

H_0	Nullhypothese
H_1	Alternativhypothese
HbO ₂	Oxyhämoglobin
HF	Hochfrequenz
HRF	hemodynamic response function/ Hämodynamische Antwortfunktion
IAT	Impliziter Assoziationstest
i.d.R.	in der Regel
i.e.	id est/ that is
IPSP	Inhibitorisches postsynaptisches Potenzial
ISI	Interstimulus-Intervall
ITI	Inter-trial interval
i.V.m.	in Verbindung mit
K	Kalium; Kelvin
kg	Kilogramm
kHz	Kilohertz
K-Raum	reziproker Raum, Raum der Wellenvektoren, Fourierraum, Ortsfrequenzraum (Begriff aus der Kristallographie)
KT	Klassische Testtheorie
m	Mehrere Produkte
med.	medicinae/ Medizin
MEG	Magnetoenzephalographie
MHz	Megahertz
Min.	Minuten
Mio.	Millionen
µm	Mikrometer
mm	Millimeter
MNI	Montreal Neurological Institute
mOFC	medialer orbitofrontaler Cortex
MPFC	medialer präfrontaler Cortex
MR	Magnetresonanz
MRT	(strukturelle) Magnetresonanztomographie
ms	Millisekunden
mT	Millitesla

mV	Millivolt
MVPA	multi-voxel pattern analysis
M _{xy}	Quermagnetisierung
M _z	Längsmagnetisierung
n	normaler Preis
N	kein Sonderangebotssignal vorhanden
Na	Natrium
NAcc	Nucleus Accumbens
nm	Nanometer
OFC	orbitofrontaler Cortex
p	Wahrscheinlichkeit
PCC	posteriores Cingulum/ posteriorer cingulärer Cortex
PET	Positronen-Emissions-Tomographie
PFC	präfrontaler Cortex
PNS	Peripheres Nervensystem
PPA	parahippocampal place area
Prof.	Professor
%	Prozent
rACC	rostraler anteriorer cingulärer Cortex
rCBF	regionaler cerebraler Blutfluss
rCBV	regionales cerebrales Blutvolumen
RF	radio frequency
RFT	Random field theory
ROI	Region of interest
RT	Response time
s	Sekunden
S	Sagittalschnitt; Sonderangebotssignal vorhanden
S.	Seite(n)
SA-Signal	Sonderangebotssignal
SNR	signal-to-noise-ratio/ Signal-zu-Rausch-Verhältnis
sog.	sogenannte(n)
SOR	Stimulus-Organismus-Reaktion
SPM8	Statistical Parametric Mapping 8
SQUIDS	Superconducting Quantum Interference Devices

STW	Straight to the Wok
SVC	Small Volume Correction
SyncBox	Synchronization Box
t	teurer Preis
T	Target; Tesla; wahrer Wert (true score)
Tab.	Tabelle
TE	Echozeit
TMS	Transkraniale Magnetstimulation
TR	Repetitionszeit
TV	Television
UKK	Uniklinik-Kiosk
USA	United States of America
&	und
\$	US-Dollar
vgl.	vergleiche
VLDFC	ventrolateraler präfrontaler Cortex
VMPFC	ventromedialer präfrontaler Cortex
VS	ventrales Striatum
vs.	versus
VTA	ventral tegmental area
WTB	Willingness to buy
z.B.	zum Beispiel
ZNS	Zentrales Nervensystem

1 Einleitung

Die Marktforschung stellt die wichtigste Vorstufe des Marketings dar. Sie dient dazu, Informationen über verschiedene Tatbestände bzw. Thematiken zu erfassen und diese anschließend zu analysieren. Das Marketing versucht im Anschluss daran, die gewonnenen Ergebnisse in die Marketingpraxis umzusetzen. Zum einen dienen die Marktforschungsergebnisse dazu, das Verhalten des Konsumenten besser zu verstehen, zum anderen um Produkte und Dienstleistungen besser an die Konsumenten anzupassen bzw. besser auf diese auszurichten. Im Ergebnis existieren bereits unzählige Marketingbücher und genügend Marketing- und Managementinstrumente, die in der Praxis eingesetzt werden. Dennoch erreichen zu viele Kampagnen und Produkte ihre Ziele nicht; 2013¹ können sich weniger als die Hälfte der neu eingeführten Produkte im Bereich der Fast Moving Consumer Goods (FMCG) halten. Das Ausmaß der daraus resultierenden Wertvernichtung konnte bereits Ende 2006 in einer Studie der Gesellschaft für Konsum (GfK)² mit einer Summe von ca. zehn Milliarden Euro beziffert werden. Im Rahmen dieser GfK-Studie konnte eine Floprate von 70 Prozent herausgestellt werden, obwohl für die Produkte im Vorfeld eine intensive Marktforschung betrieben wurde. Man kommt zu dem Schluss, dass sich die traditionellen Verfahren, Theorien und Instrumente in der Praxis nur unzureichend bewährt haben und folglich noch viele Fragen offen und unbeantwortet geblieben sind.

Bei traditionellen Erhebungsmethoden, wie der Befragung, werden generell nur bewusste bzw. kontrollierte Prozesse erfasst. Um Aussagen über das Konsumentenverhalten treffen zu können, werden die Zielpersonen direkt und in diesem Sinne bewusst nach den interessierenden Informationen gefragt. In der Folge kann, abgesehen von konkreten Antwortverweigerungen, maximal nur das geäußert werden, was einer Person bewusst ist. Problematisch an diesen *direkten Messungen* bzw. an ihrer alleinigen Verwendung ist, dass Konsumenten häufig nicht in der Lage sind, Auskünfte über ihre tatsächlichen Beweggründe zu geben. In Bezug auf die menschliche Informationsverarbeitung stützen verschiedene Erkenntnisse die Vorstellung einer zweiseitigen Verarbeitung.³ Zum einen existiert ein explizites System, das auf alle Informationen zugreifen kann, die einem Menschen bewusst sind und die er in diesem Sinne kontrollieren kann. Zum anderen verfügt jeder Mensch auch über ein implizites System. Dieses System arbeitet im Vergleich zum expliziten System intuitiver und schneller. Hierbei geht es um automatisierte Prozesse, die den Menschen und sein Verhalten unbewusst beeinflussen. Mittlerweile gilt als gesichert, dass der Großteil der Verarbeitung auf der unbewussten Ebene abläuft. Man spricht auch von der Macht der impliziten Verarbeitungsprozesse. Die wahren Gründe des menschlichen Verhaltens können folglich in vielen Fällen gar nicht explizit geäußert werden, da sie im impliziten System verankert sind. Sie sind dem Bewusstsein nicht zugänglich.

¹ vgl. Müller, T.; Schroiff, H.-W. (2013), S. 14 f.

² vgl. Markenverband, Gesellschaft für Konsum (GfK), Serviceplan (2006)

³ Hierauf wird noch genauer im Rahmen von *Kapitel 2.2.2.1 Neuromarketing im weiteren Sinne* Bezug genommen.

In einer Konsequenz auf die fragliche Aussagekraft direkter Messverfahren werden in der Marktforschung verstärkt *indirekte Messverfahren* eingesetzt. Diese Verfahren versuchen, Verhalten zu erklären, indem sie unbewusste und in diesem Sinne durch die untersuchte Person nicht direkt verbalisierbare und auch nicht direkt beeinflussbare, verhaltensbezogene Ereignisse erfassen. Die erste Phase indirekter Messverfahren lässt sich einerseits durch reaktionszeitbasierte Messungen, andererseits durch den Einsatz verschiedener apparativer Verfahren beschreiben. Ein Beispiel für ein *reaktionszeitbasiertes Verfahren* stellt der Implizite Assoziationstest (IAT) dar, der über die Reaktionszeiten versucht, die Stärke der Verbindung eines Objektes (z.B. einer Marke) mit verschiedenen Attributen zu erfassen. So können bspw. zwei Marken in Bezug auf die Attribute positiv und negativ vergleichen. Hierbei fällt es Menschen leichter, Objekte mit denjenigen Attributen zu verbinden, die auch im Gedächtnis eine enge Verknüpfung aufweisen (z.B. Marke 1 und positiv). Hieraus kann gefolgert werden, dass die Verknüpfung umso stärker ist, je kürzer die Reaktionszeit ist. Im Zuge des Einsatzes von sog. *apparativen Verfahren* werden verschiedene technische Apparaturen verwendet, um über die Erfassung physiologischer Begleiterscheinungen auf kognitive Prozesse bzw. Verhalten zu schließen. Apparative Verfahren, wie z.B. das Eyetracking oder die Messung der elektrodermalen Reaktion (EDR), sind ebenfalls in der Lage, unbewusste Prozesse abzubilden. Im Vergleich zu den reaktionszeitbasierten Messungen gehen sie einen Schritt weiter, indem sie nicht bzw. schwer kontrollierbare, und in diesem Sinne unbewusste, *physiologische Prozesse* erfassen, um von diesen auf Aktivierungszustände und Wahrnehmungsprozesse der Konsumenten zu schließen. Auf diese Weise helfen apparative Verfahren dabei, das Verhalten der Konsumenten besser zu verstehen.⁴ Die genannten apparativen Verfahren legen ihren Fokus jedoch nicht auf das zentrale Nervensystem, sondern erfassen Erscheinungen des peripheren Nervensystems, welche Begleiterscheinungen zu verschiedenen kognitiven Zuständen darstellen.

Im Gegensatz dazu kann in der zweiten Phase indirekter Messungen auf apparative Verfahren im Sinne von *neurophysiologischen Messverfahren* zurückgegriffen werden. Hierbei wird der Fokus auf dynamische Prozesse im zentralen Nervensystem gelegt, und hier genauer auf das Gehirn. Das Gehirn bestimmt die Entscheidungen der Konsumenten, und Menschen allgemein, die sie zu einer an die Umweltbedingungen angepassten Verhaltenssteuerung befähigen. Somit ist die Untersuchung der Gehirnaktivität unabdingbar, um das Verhalten des Konsumenten besser zu verstehen bzw. zu erklären und entsprechend im Rahmen verschiedener Marketingaktivitäten zu berücksichtigen. Neurophysiologische Verfahren bieten folglich bislang nicht vorhandene Möglichkeiten, den Menschen und seine Funktionsweise zu untersuchen. Potenziell werden völlig neue Möglichkeiten eröffnet, den Konsumenten und die Wirkung von Marken, Kommunikation und Produkten auf ihn zu verstehen. Man kann hierbei zwischen *Messungen auf Basis elektromagnetischer Veränderungen im*

⁴ Anzumerken ist an dieser Stelle, dass solche Verfahren i.d.R. durch zusätzliche Befragungen komplettiert werden. Dies ist jedoch im Sinne der Vervollständigung der Informationsgrundlage zu sehen.

Gehirn (EEG, MEG) und *Messungen auf Basis des Hirnstoffwechsels* (PET, fMRT) unterscheiden.⁵ Letztere werden auch als bildgebende Verfahren bezeichnet, da sie im Ergebnis dreidimensionale Abbildungen des Gehirns mit der zusätzlichen Visualisierung aktivierter Hirnregionen ermöglichen. Unter den neurophysiologischen Verfahren ist die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) vor allem aufgrund ihrer hohen räumlichen Auflösung sowie der wohlbekannten Nachteile anderer Verfahren gegenwärtig die vielversprechendste Variante.

In den wissenschaftlichen Disziplinen, in denen die Messung der Gehirnaktivität Berücksichtigung findet, hat sich die fMRT mittlerweile als dominantes neurophysiologisches Messverfahren durchgesetzt. Dies gilt im Speziellen auch für das Marketing. Ungeachtet davon, ob die fMRT in einer Forschungsdisziplin Einzug gehalten hat, bestehen in der Fachwelt unterschiedliche Meinungen in Bezug auf dieses Messverfahren. Bei der Beurteilung der Leistungsfähigkeit der fMRT kann die Diskussion in Form eines Spannungsfeldes von vier generellen Positionen charakterisiert werden.⁶

Die *erste Position* wird von Personen unterstützt, die dem Einsatz und der Aussagekraft der fMRT aus unterschiedlichen Motivationen heraus sehr positiv gegenüberstehen. Sie besitzen eine euphorische Einstellung hinsichtlich der fMRT. Generell erkennen sie die Möglichkeiten, die dadurch entstehen, dass Gehirnaktivität räumlich und zeitlich adäquat gemessen werden kann. Ihrer Meinung nach ist die fMRT in der Lage, genau dieses zu leisten. Die Messung, die Analyse und auch die Interpretation der Gehirnbilder werden i.d.R. stark vereinfacht dargestellt und im Endeffekt als unproblematisch und eindeutig kommuniziert. Des Weiteren wird der Eindruck vermittelt, dass die Ergebnisse von fMRT-Untersuchungen relativ einfach auf die Verhaltens- bzw. Entscheidungsebene übertragen werden können und somit einen großen Beitrag dazu leisten, das Rätsel Mensch zu lösen. Im Ergebnis wurden bereits genügend fMRT-Untersuchungen publiziert, die zu weitreichenden Schlussfolgerungen kommen. Diese Position wird als *Neuromarketing im engeren Sinne* bezeichnet,⁷ da man in diesem engeren Begriffsverständnis den Fokus auf die neurophysiologischen Messverfahren richtet. Werden in einer Untersuchung keine derartigen Messverfahren eingesetzt, wird die Untersuchung nicht dem Neuromarketing zugeordnet. Der Einsatz dieser Verfahren stellt folglich den Kern der beschriebenen Position dar.

In einer Steigerung der ersten Position ist im Rahmen der *zweiten Position* sogar davon die Rede, dass es mittels der fMRT bereits möglich ist Gedanken zu lesen. In einem Interview⁸ beschreibt der Neurowissenschaftler John-Dylan Haynes wie man

⁵ Auf die genaue Unterscheidung zwischen den genannten neurophysiologischen Messverfahren wird noch im Rahmen von *Kapitel 2.1.2 Neuroökonomie* eingegangen.

⁶ Die vier im Nachfolgenden dargestellten Positionen stellen einen Versuch dar, das Spannungsfeld in der Diskussion um die fMRT zu beschreiben. Innerhalb dieser vier Grundpositionen gibt es mit Sicherheit individuelle Unterschiede. Diese bleiben an dieser Stelle allerdings außen vor, da sie für die möglichst einfache Darstellung der generellen Situation hinderlich sind.

⁷ Auf das „Neuromarketing im engeren Sinne“ wird noch ausführlich im Rahmen von *Kapitel 2.2.2.2* eingegangen. Hier geht es zunächst um die Kernaussage in Bezug auf die Leistungsfähigkeit der fMRT.

⁸ vgl. Haynes, J.-D. (2011)

sich den Prozess des Gedankenlesens in Bezug auf die fMRT vorzustellen hat. Zunächst werden mittels der fMRT Gehirnabbildungen mit den entsprechenden Aktivierungen produziert. Diese sollen im Anschluss von einer Mustererkennungssoftware analysiert werden, um auf die jeweils zugrunde liegenden Gedanken schließen zu können.⁹ Im Laufe der Zeit wurden verschiedene fMRT-Studien veröffentlicht, die sich dem Bereich des Gedankenlesens theoretisch auf unterschiedliche Weisen zuordnen lassen. O'Craven & Kanwisher¹⁰ berichten bspw. im Zuge ihres Experiments, dass es mit Hilfe von fMRT-Daten möglich ist, unterschiedliche Vorstellungsbilder korrekt der jeweiligen Objektkategorie zuzuordnen. Unter Berücksichtigung der Gehirnaktivierungen konnte für die Versuchspersonen herausgestellt werden, ob sie gerade an ein Gesicht oder einen Ort dachten. Baumgartner et al.¹¹ gelang es, über Aktivierungsmuster vorherzusagen, ob eine Versuchsperson beabsichtigte, ein kurz zuvor gegebenes Versprechen zu brechen. In einer fMRT-Untersuchung von Haynes et al.¹² konnte durch die Betrachtung der Aktivierungsmuster im Gehirn darauf geschlossen werden, ob Versuchspersonen eine Handlungsabsicht hinsichtlich zweier zur Auswahl gestellter Aufgaben getroffen hatten oder nicht. Nishimoto et al.¹³ gelang es gesehene Filmsequenzen mit Hilfe der Aktivierungsdaten aus dem visuellen Cortex zu rekonstruieren. Im Ergebnis erzeugte ein Computer verschwommene, aber erkennbare bewegte Rekonstruktionen der Filmszenen, die die Versuchspersonen gesehen hatten. Ähnlich wie im Fall von Nishimoto et al. konnten Schoenmakers et al.¹⁴ auch visuelle Wahrnehmungen über die explizite Analyse visueller Gehirnareale rekonstruieren. Ihnen war möglich, die Buchstaben überraschend genau abzubilden, die ein Proband gelesen hatte.

Des Weiteren existierten bis 2013 mit *No Lie fMRI*¹⁵ und *Cephos*¹⁶ zwei amerikanische Unternehmen, die die fMRT kommerziell als Lügendetektor angeboten haben. 2013 entschied sich Cephos vorerst aus diesem Geschäftsbereich auszusteigen. Der Grund bestand allerdings nicht im Zweifel am Verfahren, sondern ist dem unterschätzten Widerstand von Seiten des Rechtssystems geschuldet.¹⁷

Die beschriebenen fMRT-Untersuchungen und der Trend im kommerziellen Bereich stehen stellvertretend für die zweite Position hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der fMRT. Diese Position hegt keinen Zweifel an den Möglichkeiten der fMRT, sie stößt vielmehr das Tor zum Gedankenlesen auf.

In der breiten Bevölkerung steht dieser Position eine teilweise sehr skeptische Haltung in Hinblick auf die Auswirkungen des Einsatzes der fMRT entgegen. Skeptiker sehen das Zeitalter des gläsernen Konsumenten bevorstehen. Einer der ersten

⁹ Der gesamte Prozess ist selbstverständlich komplexer, soll aber an dieser Stelle nicht im Detail erläutert werden. Hier soll erst einmal der Grundgedanke abgebildet werden.

¹⁰ vgl. O'Craven, K. M.; Kanwisher, N. (2000)

¹¹ vgl. Baumgartner, T.; Fischbacher, U.; Feierabend, A.; Lutz, K.; Fehr, E. (2009)

¹² vgl. Haynes, J.-D.; Sakai, K.; Rees, G.; Gilbert, S.; Frith, C.; Passingham, R. E. (2007)

¹³ vgl. Nishimoto, S.; Vu, A. T.; Naselaris, T.; Benjamini, Y.; Yu, B.; Gallant, J. L. (2011)

¹⁴ vgl. Schoenmakers, S.; Barth, M.; Heskes, T.; van Gerven, M. (2013)

¹⁵ vgl. <http://www.noliemri.com/index.htm> (abgerufen am 11.09.2014)

¹⁶ vgl. <http://cephosdna.com/> (abgerufen am 11.09.2014)

¹⁷ vgl. <http://www.wired.com/2013/12/brain-science-law/> (abgerufen am 11.09.2014)

fMRT-Artikel zu diesem Thema in Deutschland, der durch die Bild-Zeitung mit dem klein gedruckten Titel „Bewiesen: Beim Shoppen setzt der Verstand aus“ und dem fett gedruckten roten Untertitel „Das ist ein Gehirn im Kaufrausch“ aufgegriffen wurde¹⁸ und die vereinzelt Artikel und Internetbeiträge zum Thema Gedankenlesen über die Zeit, begründen dieses Bedenken. Durch die Diskussion über den Einsatz von Ganzkörper-Scanner an Flughäfen, welche in den USA seit 2010 erlaubt sind, erfolgte eine erneute Sensibilisierung hinsichtlich bildgebender Verfahren¹⁹, wodurch diese kritische Haltung weiter genährt wurde. Die skeptische Haltung gegenüber der fMRT mündet in Gedankenbildern wie dem *Kaufknopf im Gehirn* und dem *fremdgesteuerten Konsumenten*. Im Ergebnis führt dies zu einer Ablehnung bzw. negativen Bewertung des Einsatzes der fMRT.

Die *dritte Position* im Spannungsfeld repräsentiert die Sicht des *Neuromarketings im weiteren Sinne*²⁰. Hier wird eine kommerzielle Perspektive auf die Nutzung der fMRT im Marketing eingenommen. Grundlegend wird die Auffassung vertreten, dass Neuromarketing mehr ist als der Einsatz neurophysiologischer Messverfahren im Bereich des Marketings. Hier steht der Interdisziplinaritätsgedanke im Vordergrund, indem im Zuge des Neuromarketings auf das bereits vorhandene Wissen unterschiedlicher Disziplinen zurückgegriffen und dieses für die Praxis zielführend verbunden wird. Generell vertritt diese Position zwar die Ansicht, dass die fMRT ein interessantes Messverfahren darstellt und bereits genügend nutzbare Erkenntnisse im Grundlagenbereich zur Verfügung stellt. Hinsichtlich ihrer Anwendung auf die speziellen und komplexen Problemstellungen aus der Praxis kommt man jedoch zu dem Schluss, dass sie aufgrund ihrer beschränkten Aussagekraft keinen Mehrwert liefert und in diesem Sinne keine Praxisrelevanz besitzt. Im Gegensatz zu den erstgenannten Positionen wird hier folglich die Aussagekraft der fMRT für die Praxis stark in Frage gestellt.

Ähnlich wie die dritte Position argumentiert auch die *vierte Position*, nur tiefgreifender und universeller. Sie kann als eine Reaktion auf die euphorische Darstellung der Leistungsfähigkeit der fMRT gesehen werden. Anders als bei der zweiten Position entsteht hier jedoch keine Angst vor dem Verfahren der fMRT, sondern eine pessimistische Haltung hinsichtlich der Leistungsfähigkeit, die die generelle Aussagekraft bzw. generell das Messverfahren der fMRT an verschiedenen Ansatzpunkten in Frage stellt. Hier wird der komplexe Prozess in verschiedene Teilprozesse zerlegt und dann differenziert kritisiert.

Die verschiedenen Kritikpunkte beginnen bereits bei der grundlegenden biologischen Basis des Messverfahrens. In einer Untersuchung von *Schummers, Yu & Sur*²¹ wur-

¹⁸ vgl. Kenning, P. (2007), S. 20

¹⁹ Im Detail geht es hierbei zwar nicht um die fMRT, sondern um Terahertzstrahlung, doch in der öffentlichen Diskussion geht diese Unterscheidung meist unter. Aus diesem Grund werden auch hierdurch Ängste bzw. Bedenken auf die fMRT als bildgebendes Verfahren übertragen.

²⁰ Auf das „Neuromarketing im weiteren Sinne“ wird noch ausführlich im Rahmen von *Kapitel 2.2.2.1* eingegangen. An dieser Stelle steht zunächst die grundlegende Beurteilung der Leistungsfähigkeit der fMRT im Vordergrund.

²¹ vgl. Schummers, J.; Yu, H.; Sur, M. (2008)

de bspw. in Bezug zu visuellen Gehirnarealen von Fretchen festgestellt, dass an dieser Stelle neben den Nervenzellen auch die Gliazellen mit für den Sauerstoffbedarf verantwortlich sind. Dieses Ergebnis wurde von anderen Forschern als Argument gegen die Gültigkeit der fMRT angeführt. Führt man den Gedanken weiter, so besteht das Argument darin, dass im Kern nicht nur die Aktivität der Nervenzellen, sondern auch die Aktivität der Gliazellen über die fMRT erfasst wird, da das gemessene Signal im Endeffekt in Abhängigkeit zum Sauerstoffbedarf steht.²² Gehirnaktivität wurde bis vor kurzem jedoch nur mit Nervenzellen in Verbindung gebracht. Gliazellen galten lange lediglich als Stützzellen für die Nervenzellen. Wenn also die Gliazellen nicht mit Gehirnaktivität zusammenhängen und das Signal, welches durch die fMRT erfasst wird, auch durch die Aktivität der Gliazellen erzeugt wird, wie gut ist dann dieses Messverfahren geeignet, Gehirnaktivität abzubilden? Was bringt das gemessene Signal letztlich zum Ausdruck und inwiefern kann bzw. sollte man vor diesem Hintergrund von diesem Signal auf kognitive Prozesse schließen?

Die einzelnen Kritikpunkte setzen sich durch den gesamten Prozess der fMRT fort. Bei den weiteren Kritikpunkten geht es um verschiedene Aspekte: den Erhebungsablauf bzw. den Messvorgang, die Vorverarbeitung und statistische Analyse der Daten und auch die Eindeutigkeit der Interpretation. Unabhängig davon, ob man die Kritikpunkte einzeln betrachtet oder in ihrer Gesamtheit sieht, stellen sie im Ergebnis die Gültigkeit einer fMRT-Messung massiv in Frage.

Um im Rahmen der Einleitung einen realistischen Eindruck der gegenwärtigen Situation zu vermitteln, werden neben dem beschriebenen Spannungsfeld auch die hohen intellektuellen Eintrittsbarrieren erörtert, die den Zugang zu dieser komplexen Materie für interessierte Laien stark erschweren. Ein Grund für diese Barrieren liegt, gepaart mit der Komplexität dieses Messverfahrens, in der Tatsache, dass die fMRT als ein Verfahren aus den Naturwissenschaften in den Geisteswissenschaften eingesetzt wird. In der Forschungspraxis erfolgen die Planung der Untersuchung, die Erhebung, Verarbeitung, Analyse und Interpretation der Daten daher in aller Regel durch ein interdisziplinäres Team aus Biologen, Medizinern, Physikern und den entsprechenden Geisteswissenschaftlern. Gemeinsam kann jeder Wissenschaftler auf diese Weise sein Wissen an der entsprechenden Stelle für den Erfolg einer Untersuchung einbringen. Setzt man sich jedoch mit Fachbücher bzw. Fachartikel auseinander, findet sich (natürlicherweise) je nach Autor immer ein konkreter fachbezogener Fokus. Eine Konsequenz hieraus ist, dass keine ganzheitliche Betrachtung bzw. Erfassung dieser interdisziplinären Thematik stattfindet.

In einigen Büchern wird bspw. der physikalische Prozess der Messung in den Vordergrund gerückt. In diesem Fall wird zwar die physikalische Seite der fMRT sehr fundiert beleuchtet, doch dies ist teilweise bereits zu spezifisch als das interessierte Laien bis zum Ende folgen könnten. Zudem werden durch die Fokussierung auf den Messvorgang der vorangestellte Prozess der Untersuchungsplanung und die nachfolgenden Prozesse der Datenanalyse und Interpretation in den Hintergrund gerückt

²² In *Kapitel 5.1 Das MR-Signal im Rahmen der fMRT* wird noch genauer auf die Messgrundlage der fMRT eingegangen.

bzw. vernachlässigt. Ein weiterer wichtiger Aspekt in diesem Zusammenhang besteht in den biologischen Grundlagen zum Gehirn und der Gehirnaktivität. Diese sind unabdingbar, da sie im Rahmen der fMRT die Messgrundlage darstellen. Ohne entsprechende Kenntnis der Messgrundlage fehlt die Basis für ein tiefergehendes Verständnis. Wie bereits an diesem Beispiel ersichtlich ist, werden i.d.R. einzelne Inhalte mehr oder weniger isoliert betrachtet und vertieft, doch der ganzheitliche interdisziplinäre Prozess kann durch diese isolierte Darstellung weder sauber abgebildet noch nachvollzogen werden. Ein realistischer Eindruck vom Aufwand, den Schwierigkeiten und auch den Lösungsansätzen für die unterschiedlichen Herausforderungen ist auf diese Weise schwer möglich. Vereinzelt finden sich auch Manuskripte, die sowohl die biologische als auch die physikalische Seite der Messung ansprechend darstellen, allerdings fehlt hierbei i.d.R. die problembezogene Einbettung in die Zieldisziplin. Nur wenn zusätzlich auch der konkrete Anwendungsbereich der fMRT Berücksichtigung findet, kann von einer ganzheitlichen Auseinandersetzung gesprochen werden. Aus Sicht einer Zieldisziplin fehlt im Rahmen von Fachbüchern in der Folge je nach Qualität und Umfang immer mindestens ein Teilbereich, der für einen Außenzugang in diese Materie von immenser Bedeutung ist. Hierzu passt die Tatsache, dass die Fachbücher in den seltensten Fällen aus der konkreten Zieldisziplin heraus motiviert sind.

I.V.m. Fachartikeln gestaltet sich die Situation ebenfalls schwierig. Werden in Fachartikeln fMRT-Studien dargestellt, sind bereits die methodischen Erläuterungen für interessierte Laien und sogar für fortgeschrittene Interessierte nicht nachvollziehbar. Aus diesem Grund sind die herausgearbeiteten Schlussfolgerungen für sie nicht hinterfragbar. Auf der einen Seite sind die Anmerkungen im Rahmen von Fachartikeln für den Fachmann auf das Wesentliche reduziert, auf der anderen Seite sind die Ausführungen derart speziell, dass sie von allen anderen Personengruppen nicht ohne das nötige Grundlagenwissen erschlossen werden können. Die Ursache für diese Situation liegt in der Natur und dem Zweck von Fachzeitschriften. Betrachtet man Artikel in Fachjournalen allerdings auch als eine Zugangsmöglichkeit in einen konkreten Forschungsbereich für Nachwuchswissenschaftler und Wissenschaftler generell, so bringt diese Situation noch einmal die hohen Eintrittsbarrieren zum Ausdruck.

Die vorliegende Arbeit richtet sich in erster Linie an Studenten und Wissenschaftler aus dem Marketingbereich, die Laien auf dem Gebiet der Neurowissenschaften sind, wie auch an interessierte Entscheider aus der Marketing- und Marktforschungspraxis. Das bereits dargestellte Spannungsfeld hinsichtlich der Einschätzung der Leistungsfähigkeit der fMRT im Marketing wie auch die hohen Eintrittsbarrieren in diese komplexe Thematik beschreiben die Ausgangssituation, mit der die Zielgruppe dieser Arbeit konfrontiert ist. Aus Sicht der Zielgruppe kann man beide Aspekte insofern als problematisch ansehen, als dass zum einen sehr unterschiedliche Ansichten über die Leistungsfähigkeit des im Fokus stehenden Messverfahrens vertreten werden und es zum anderen nur schwer möglich ist, einen Zugang in die Thematik zu finden. Eine realistische Einschätzung ist im Rahmen dieser Ausgangssituation schwer vorstellbar.

Genau an dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Sie verfolgt grundlegend zwei Ziele, deren Erreichung die beiden angesprochenen Probleme der Zielgruppe lösen sollen. Das primäre Ziel besteht hierbei in der Erstellung einer eigenen methodenkritischen Position hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der fMRT im Marketing. Im Ergebnis soll ein realistisches Bild der gegenwärtigen Situation gezeichnet werden. Um dieses übergeordnete Ziel erreichen zu können, gilt es zunächst den beschriebenen interdisziplinären Prozess ganzheitlich zu betrachten. Diese Auseinandersetzung stellt das unabdingbare Fundament dar, auf dem die eigene Position aufbaut. In diesem Sinne werden die Eintrittsbarrieren mit dem Ziel angegangen, die Transparenz innerhalb dieser komplexen Thematik zu erhöhen. Hinsichtlich der Transparenz ist eine ausführliche Aufarbeitung der einzelnen Teilkomponenten entscheidend. In Anbetracht der Zielgruppe, der Komplexität des Themas und der Schwierigkeiten, die eine zu detaillierte Darstellung auf der einen Seite und eine zu allgemeine Darstellung auf der anderen Seite hinsichtlich der Zielerreichung dieser Arbeit mit sich bringen, wurde bei der Erstellung der einzelnen Kapitel nach folgender Methode verfahren: Die Ausarbeitungen innerhalb der einzelnen Kapitel werden im Sinne der Zielerreichung auf der einen Seite *so ausführlich wie nötig*, auf der anderen Seite aber auch *so grundlegend wie möglich* gehalten.

Mit dem Anspruch, der Zielgruppe eine methodenkritische Einschätzung der Situation zu ermöglichen, strebt die vorliegende Arbeit zum einen generell ein tieferes Verständnis hinsichtlich der fMRT und ihrer Anwendung im Bereich des Marketings an, zum anderen bezieht sie im Ergebnis eine eigene Stellung in der sehr heterogenen Diskussion um die Möglichkeiten und Grenzen dieses Messverfahrens. Mit den beiden dargelegten Zielsetzungen bieten die nachfolgenden Ausführungen des Weiteren auch für Personen einen geeigneten Zugang in diese komplexe Materie, die aus unterschiedlichen Kontexten Berührungspunkte mit der fMRT haben und auch für Wissenschaftler, die ein gesteigertes Interesse an der neurowissenschaftlichen Disziplin aufweisen.

Je nachdem welche Perspektive man ansetzt, kann der Aufbau der vorliegenden Arbeit unterschiedlich beschrieben werden. Entsprechend der beiden dargestellten Ziele lassen sich die nachfolgenden Ausführungen in zwei Bereiche aufteilen. Der *erste Teil*, der die Kapitel 2 bis 7 umfasst, kann als eine Art Materialsammlung angesehen werden. In ihrer Gesamtheit betrachtet, stellt diese eine ganzheitliche Auseinandersetzung mit dem interdisziplinären Prozesses dar und fördert auf diese Weise die Transparenz hinsichtlich dieser komplexen Thematik. Der *zweite Teil* wird durch Kapitel 8 gebildet. Hier erfolgt unter Rückgriff auf die Informationen aus der Materialsammlung sowohl die Darstellung als auch die Argumentation der eigenen Position hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der fMRT im Bereich des Marketings.

Betrachtet man den ersten Teil genauer, so ist die angesprochene Materialsammlung dreiteilig aufgebaut. Kapitel 2 stellt diesbezüglich zunächst die inhaltliche Einbettung der forschungsleitenden Fragestellung in die Zieldisziplin dieser Arbeit dar. Hierbei gilt es, den allgemeinen wie auch den speziellen Anwendungsbereich der fMRT herauszustellen. Die Motivation der vorliegenden Arbeit für die Auseinandersetzung mit

der beschriebenen Thematik rührt aus dem Bereich des Marketings. Daher kann dieser Bereich als die spezielle Zieldisziplin aufgefasst werden. Da die Entwicklungen im Bereich des operativen Marketings in das sog. Neuromarketing münden,²³ wird neben der allgemeinen Darstellung des Marketings vor allem das Neuromarketing skizziert. Hierbei stehen zwei unterschiedliche Begriffsverständnisse, das Neuromarketing im weiteren Sinne und das Neuromarketing im engeren Sinne, im Vordergrund, welche mit Hilfe von Beispielen voneinander abgegrenzt werden sollen. Diese Unterscheidung ist zum einen wichtig, da die vorliegende Arbeit generell dem *Neuromarketing im engeren Sinne* zuzuordnen ist und dies besonders gut durch den Kontrast mit dem zweiten Begriffsverständnis ersichtlich wird. Zum anderen beschreiben beide Begriffsverständnisse teilweise das bereits dargestellte Spannungsfeld hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der fMRT im Bereich des Marketings. Um auch die spezielle Zieldisziplin, die durch den Einsatz der fMRT im Marketing gekennzeichnet ist, angemessen einzubetten, wird zu Beginn von Kapitel 2 einleitend der Neuroökonomie als allgemeinem Anwendungsbereichs der fMRT Aufmerksamkeit geschenkt.

Nachdem die inhaltliche Einbettung erfolgt ist, beziehen sich Kapitel 3, 4 und 5 generell auf verschiedene theoretische Aspekte des in Frage stehenden Messverfahrens. Kapitel 3 geht auf die allgemeine biologische Messgrundlage, Gehirnaktivität, ein. Versteht man die generelle Messgrundlage nicht, so ist der interdisziplinäre Gesamtprozess schwer nachvollziehbar. Zunächst wird hierbei auf das Gehirn und die generelle Gehirnanatomie eingegangen, um das Organ von Interesse grundlegend abzubilden. Im Hauptteil werden anschließend verschiedene Strukturen, Mechanismen und Prozesse betrachtet, die in einer engen Verbindung zur Gehirnaktivität stehen bzw. diese möglich machen. Den Schlusspunkt von Kapitel 3 stellen Anmerkungen zu den Gliazellen dar, dem zweiten Zelltyp im Gehirn, deren Bedeutung bzw. Funktionalität im Zusammenhang mit Gehirnaktivität lange Zeit unterschätzt wurde. Auf die allgemeinen biologischen Grundlagen folgt im Zuge von Kapitel 4 die Aufarbeitung der allgemeinen physikalischen Grundlagen der Messung.²⁴ Hier richtet sich der Fokus auf die strukturelle Magnetresonanztomographie (MRT), welche die Grundlage der fMRT darstellt und die auf denselben physikalischen Messprinzipien beruht. Zur Abbildung des technischen Prozesses der Messung erfolgt im Kern die Auseinandersetzung mit folgenden Fragen: Worauf basiert die Messung? Wie ist es möglich, dreidimensionale Gehirnabbildungen zu erzeugen? Und, wie ist die Qualität der Messung zu bewerten bzw. wodurch wird sie beeinflusst? Abgerundet werden die Anmerkungen zu den allgemeinen physikalischen Grundlagen durch die Vorstellung der konkreten Messapparatur in Form des MR-Scanners und die Thematisierung verschiedener Sicherheitsaspekte. Aufbauend auf den Ausarbeitungen in Kapitel 3 und 4 wird in Kapitel 5 auf verschiedene fMRT-spezifische Sachverhalte eingegangen.

²³ Hierauf wird im Rahmen von *Kapitel 2.2.1 Entwicklung des operativen Marketings* noch genauer eingegangen.

²⁴ Mit dem Begriff „allgemeine Grundlagen“ ist gemeint, dass sich Kapitel 3 und 4 mit generellen biologischen und physikalischen Aspekten beschäftigen, deren Kenntnis unabdingbar ist, um ein tiefergehendes Verständnis für die spezielle biologische und physikalische Messgrundlage der fMRT zu erlangen.

Neben der speziellen biologischen Messgrundlage und der Signalentstehung im Zusammenhang mit der fMRT werden auch unterschiedliche Aspekte der Datenerhebung, die unausweichliche Vorverarbeitung der Daten wie auch die statistische Datenanalyse ausführlich dargelegt. Kapitel 5 endet mit der Beschreibung der eigenen analytischen Vorgehensweise im Zuge der eigenen fMRT-Untersuchung, deren Darstellung im Rahmen von Kapitel 6 erfolgt. Die eigene Vorgehensweise kann hierbei als ein seriöser Umgang bzw. ein Vorschlag angesehen werden, den speziellen Herausforderungen der Datenanalyse Rechnung zu tragen.

Im Gegensatz zur theoretischen Auseinandersetzung mit den verschiedenen Aspekten rund um das Messverfahren der fMRT ohne direkten Bezug zur Zieldisziplin, binden Kapitel 6 und 7 die Zieldisziplin wieder mit in die Betrachtung ein. Die bereits aufgearbeitete Theorie umsetzend erfolgt in Kapitel 6 die detaillierte Darstellung der eigenen fMRT-Studie zur neuronalen Wirkung von Sonderangebotssignalen im Rahmen von Kaufentscheidungen. Die eigene Untersuchung, die in Kooperation mit der Neuroimaging-Abteilung der Life & Brain GmbH der Universitätsklinik Bonn durchgeführt werden konnte, dient zum einen dazu als praktisches Anwendungsbeispiel einen realistischen Einblick in die Konzeption, Durchführung und generell den Aufwand i.V.m. einer fMRT-Studie zu gewähren. Nur durch die praktische Umsetzung des theoretischen Wissens in Form einer realen fMRT-Untersuchung kann ein tieferes Verständnis für den Prozess einer fMRT-Untersuchung mit seinen unterschiedlichen Entscheidungen erlangt werden. Zum anderen eignet sich dieses Beispiel, wie noch zu zeigen ist, auch sehr gut dafür, die konkreten Herausforderungen hinsichtlich der Interpretation der fMRT-Daten aufzuzeigen und somit deutlich zu machen, wie wichtig die Auseinandersetzung mit der Interpretationslogik ist. In der Folge widmet sich Kapitel 7 dem Interpretationsgedanken bzw. der Interpretationslogik. Hierbei wird zwischen der neuronalen und der handlungstheoretischen Interpretation unterschieden. Bei der neuronalen Interpretation geht es um die Frage, was eine gefundene Gehirnaktivierung in Bezug auf eine konkrete Untersuchungssituation bedeutet. Bei der handlungstheoretischen Interpretation steht die Frage im Mittelpunkt, inwieweit von den generierten fMRT-Daten auf konkrete Handlungen oder Entscheidungen geschlossen werden kann. In Bezug auf beide Interpretationsmöglichkeiten werden jeweils zunächst generelle Gedanken formuliert bevor es zur tatsächlichen Interpretation kommt.

Den Abschluss der vorliegenden Arbeit stellt Kapitel 8 dar. Mit dem Ziel, die eigene Position hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der fMRT im Bereich des Marketings darzustellen, erfolgt die Auseinandersetzung mit dem beschriebenen Spannungsfeld hinsichtlich der Beurteilung der Leistungsfähigkeit der fMRT. Gerade durch die kritische Reflexion der unterschiedlichen Positionen kann die eigene Position herausgestellt werden. Im Zuge der Begründung der eigenen Position fließen die einzelnen Erkenntnisse aus den Kapiteln 2 bis 7 ein. Die mühsam aufgearbeiteten Sachverhalte stellen in diesem Sinne das Fundament der Position des Autors dar, wodurch noch einmal die Ausführlichkeit ihrer Darstellung erklärt wird.

2 Allgemeiner und spezieller Anwendungsbereich

Ziel der vorliegenden Arbeit ist eine ganzheitlich methodenkritische Auseinandersetzung hinsichtlich der Anwendung der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) im Bereich des Marketings, um angemessen über die Möglichkeiten und Grenzen der fMRT in diesem Bereich zu diskutieren. Hierbei ist anzumerken, dass die fMRT ein Verfahren ist, welches in verschiedenen Zusammenhängen Verwendung findet. Ursprünglich dient sie der medizinischen Anwendung; mittlerweile hat sich ihr Anwendungsbereich jedoch immens - und über die Grenzen der medizinischen Anwendung und Forschung hinaus - ausgeweitet. Beschäftigt man sich mit der fMRT, so müssen zum einen, unabhängig vom konkreten Anwendungsbereich, verschiedene Aspekte in Bezug auf den generellen Messvorgang geklärt werden. Zum anderen muss man sich mit der Frage nach den Interpretationsmöglichkeiten bzw. der Übertragbarkeit der fMRT-Ergebnisse in den jeweiligen Zielbereich auseinandersetzen.

Bevor es um die Betrachtung der einzelnen relevanten Aspekte geht, gilt es an dieser Stelle zunächst, den theoretischen Hintergrund dieser Arbeit hinreichend abzubilden. Dazu erfolgt einleitend eine breite Darstellung des Fachgebiets der Neuroökonomie, da sie dabei hilft, das spezielle inhaltliche Anwendungsgebiet dieser Arbeit, das Neuromarketing, einzuordnen. Nachdem die Entwicklung des Begriffs der Neuroökonomie sowie eine Begriffsbestimmung hierzu ausgeführt werden, erfolgt die Darstellung des Neuromarketings, einem speziellen Anwendungsbereich der Neuroökonomie. Hierzu wird die perspektivische Entwicklung des operativen Marketings beschrieben und anschließend das engere und das weitere Begriffsverständnis des Neuromarketings diskutiert. Das Kapitel wird durch die Darstellung beispielhafter Anwendungen und die Zuordnung der vorliegenden Arbeit zum Neuromarketing im engeren Sinne abgerundet.

2.1 Allgemeiner Anwendungsbereich

2.1.1 Der Weg zur Neuroökonomie

Wie aus der Bezeichnung hervorgeht, kann die Neuroökonomie als eine Verknüpfung der Ökonomie bzw. der Wirtschaftswissenschaften mit den Neurowissenschaften verstanden werden. Aus diesem Grund ist es notwendig, kurz die grundlegenden Entwicklungen innerhalb der beiden Ursprungsdisziplinen zu skizzieren.

Um die Entwicklung innerhalb der *Ökonomie bzw. den Wirtschaftswissenschaften* zu erfassen,²⁵ sollte bei der *klassischen ökonomischen Theorie* angesetzt werden. Diese ist mit der Veröffentlichung des Werkes *Wealth of Nations* von Adam Smith²⁶ gleichzusetzen. Smith beschrieb darin einige zentrale Phänomene, um Entscheidungsverhalten und die Aggregation von Entscheidungen in Bezug auf Marktaktivität

²⁵ vgl. Glimcher, P. W.; Camerer, C. F.; Fehr, E.; Poldrack, R. A. (2009), S. 1 ff.

²⁶ vgl. Smith, A. (1776)

ten zu verstehen. Im Kern handelt es sich dabei um eine psychologische Betrachtungsweise. „*They were relatively ad hoc rules that explained how features of the environment influenced the behavior of a nation of consumers and producers.*“²⁷ Im Anschluss an diese klassische Auffassung entstanden verschiedene ökonomische Schulen, die heterogene Standpunkte vertraten.

Ab den 1930er Jahren entwickelte sich die *neoklassische ökonomische Theorie*. „*Beginning in the 1930s, a group of economists - most famously, Samuelson, Arrow, and Debreu - began to investigate the mathematical structure of consumer choice and behavior in markets (...).*“²⁸ Die stark mathematisierte Sicht der Neoklassik verhinderte zu diesem Zeitpunkt eine genauere Betrachtung der psychologischen Aspekte der Präferenz, da ein leistungsstarkes axiomatisches System²⁹ in der Lage war, unbeobachtbare Präferenzeigenschaften aufgrund beobachtbarer Entscheidungen abzuleiten. In der Hochphase erschien die neoklassische Ökonomie als eine sehr zuverlässige Möglichkeit, um wirtschaftliche Entscheidungen und Verhalten zu erklären. Eine zentrale Säule des neoklassischen Weltbildes besteht im Modell des *Homo oeconomicus*. Hierbei wird der Mensch als Wirtschaftssubjekt mit feststehenden Präferenzen verstanden, das völlig rational handelt und in jeder Aktion versucht, seinen Nutzen zu maximieren.³⁰

Eine gewisse Zeit lang war der neoklassische Ansatz sehr erfolgreich. Doch mit der Entwicklung der *Prospect Theory*³¹ läuteten Forscher wie Kahneman und Tversky einen Wendepunkt ein. Im Zuge dieser Phase zeigten diese und andere Forscher anhand verschiedener Experimente die Begrenztheit des neoklassischen Paradigmas auf, in dem sie fundamentale Axiome dieser Denkrichtung widerlegten. Aufgrund der zur neoklassischen Theorie widersprüchlichen Ergebnisse entwickelte sich ein neuer Ansatz der als *Verhaltensökonomie* bezeichnet wird.

Die Verhaltensökonomie fokussiert die, in der Neoklassik vernachlässigten, psychologischen Aspekte. Fast zeitgleich entstand auch die *experimentelle Ökonomie*. Ihr Hauptaugenmerk lag in der Verwendung von kontrollierten Experimenten zur Bewertung ökonomischer Theorien. „*The experimental economists began with the viewpoint that economic principles should apply everywhere (as principles in natural and physical sciences are presumed to); their view was that when theories fail in simple environments, those failures raise doubt about whether they are likely to work in more complex environments.*“³² Der Unterschied zwischen beiden Positionen kann folgendermaßen beschrieben werden. Die Verhaltensökonomie vertritt im Kern die Ansicht, dass die Einbeziehung psychologischer Konzepte die Analyse ökonomischer Sachverhalte verbessert. Hingegen liegt der Schwerpunkt der experimentellen

²⁷ Glimcher, P. W. et al. (2009), S. 1

²⁸ ebenda, S. 2

²⁹ Ein Axiom stellt den Grundsatz einer Theorie dar. Es bildet das Fundament, auf dem eine Theorie basiert. Ein Axiom wird laut Definition ohne Beweis angenommen und wird nicht weiter begründet. Ein axiomatisches System ist demnach eine Theorie bzw. Systematik, die auf einem Verbund mehrerer Axiome beruht.

³⁰ vgl. Glimcher, P. W. et al. (2009), S. 2

³¹ vgl. Kahneman, D.; Tversky, A. (1979)

³² Glimcher, P. W. et al. (2009), S. 4

Ökonomie in der Anwendung psychologischer Methoden, um die Überprüfung von ökonomischen Theorien zu verbessern.³³ Insgesamt ist die Entwicklung zu diesem Zeitpunkt als ein Spannungsfeld zu verstehen. Auf der einen Seite befanden sich die Vertreter der neoklassischen Theorie, die eine klare Theorie und eine relative gute Vorhersagequalität anboten. Auf der anderen Seite standen die Vertreter der Verhaltensökonomie und der experimentellen Ökonomie, die mit immer weiteren überzeugenden Beispielen die einzelnen Elemente der neoklassischen Theorie falsifizierten. Zunehmend konnten immer mehr Phänomene beobachtet werden, die nicht mit der neoklassischen Theorie zu erklären waren. Beispiele hierfür sind Konzepte wie Fairness, Reziprozität, Altruismus und moralische Bestrafung³⁴.

Neben der Entwicklung der ökonomischen Theorie ist auch die Geschichte der zweiten Ursprungsdisziplin, der *Neurowissenschaften*, zu betrachten.³⁵ Hier kann generell zwischen dem neurologischen und dem physiologischen Strang differenziert werden. Im Rahmen des *neurologischen Ansatzes* spielten Gehirnläsionen die zentrale Rolle. Sowohl Menschen wie auch Tiere mit Verletzungen in verschiedenen Bereichen des Gehirns dienten als Forschungsobjekte, indem sie mit verschiedenen Aufgaben konfrontiert wurden. „*The behavioral deficits of the subjects were then correlated with their neurological injuries and the correlation used to infer function.*“³⁶ Die Untersuchungen konzentrierten sich auf die Sensorik und die Bewegungskontrolle, da diese direkt beobachtbar sind und überdies das Stimulusmaterial einfach zu kontrollieren und zu quantifizieren war. Im Gegensatz dazu sind mentale Zustände schwerer erfassbar, da sie nicht direkt beobachtbar sind. „*Indeed, relating mental state to neurological damage requires some kind of theory (often a global one), and it was this theory that was largely absent during the classical period in neurology.*“³⁷

Der *physiologische Ansatz* befasste sich ebenfalls mit der Funktionsweise des Gehirns, allerdings wurde hierbei das Augenmerk auf verschiedene biologische Phänomene im Zusammenhang mit dem zentralen Nervensystem gerichtet und deren Verbindung zu unterschiedlichen Umweltreizen erörtert. „*During the classical period this more precise set of methodological tools was extremely powerful for elucidating basic features of nervous function, but was extremely limited in its applicability to complex mental states.*“³⁸ Die eingeschränkte Anwendbarkeit ergab sich vor allem durch die zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Messverfahren. Zum einen konnten diese Verfahren Gehirnaktivierungen nur in einem sehr begrenzten Ausmaß abbilden. Zum anderen wurden sie aufgrund ihrer invasiven Natur vorwiegend bei Versuchstieren eingesetzt. Im Ergebnis waren die Untersuchungen innerhalb dieses neurowissenschaftlichen Bereiches ebenfalls auf die grundlegende sensorische Verarbeitung beschränkt.

Erst nachdem eine Weiterentwicklung innerhalb beider Ansätze stattgefunden hatte,

³³ vgl. Glimcher, P. W. et al. (2009), S. 4

³⁴ vgl. Fehr, E.; Gächter, S. (2002)

³⁵ vgl. Glimcher, P. W. et al. (2009), S. 5 ff.

³⁶ ebenda, S. 5

³⁷ ebenda, S. 5

³⁸ ebenda, S. 5

war die Grundlage für die Integration der Neurowissenschaften in die Ökonomie gelegt. Der neurologische Strang öffnete sich der Psychologie, indem im Verlauf der Zeit auch psychologische Modelle Berücksichtigung fanden, um die Beziehung zwischen Gehirn und Verhalten besser zu erklären. Beim physiologischen Strang bestand die Weiterentwicklung vor allem im technischen Fortschritt hinsichtlich der Messverfahren, die Gehirnaktivierungen in der Folge adäquater abbilden konnten und zudem erlaubten, auch mentale Zustände im Menschen zu untersuchen. Im Ergebnis konnte ein besseres Verständnis der biologischen Prozesse bzw. Zusammenhänge erreicht werden.

In den späten 1990er Jahren entstand in der Folge der Entwicklungen innerhalb der Ökonomie und der Neurowissenschaften die *Neuroökonomie*. Die Situation der Ökonomie, war dadurch gekennzeichnet, dass das neoklassische Weltbild durch verschiedene experimentelle Ergebnisse stark in Frage gestellt wurde. Die Entwicklungen innerhalb der Neurowissenschaften führten zu erweiterten technischen Möglichkeiten und einem besseren Verständnis hinsichtlich verschiedener biologischer Prozesse. „*Neuroeconomics emerged from within behavioral and experimental economics because behavioral economists often proposed theories that could be thought of as algorithms regarding how information was processed, and the choices that resulted from that information-processing.*“³⁹ Über die verbesserte Erfassung von Gehirnaktivierungen und das damit einhergehende erweiterte Verständnis hinsichtlich der zugrunde liegenden Prozesse wurde die Abbildung dieser Informationsverarbeitungsprozesse in Aussicht gestellt. Zusammenfassend sollen im Zuge der Neuroökonomie verschiedene ökonomische Theorien und generell Entscheidungen mit Hilfe der apparativen Verfahren aus den Neurowissenschaften und dem bestehenden Wissen aus diesem Bereich, im Sinne einer Fundierung oder aber einer Herausforderung, geprüft werden. Da menschliche Entscheidungen und das daraus resultierende Verhalten vom Gehirn gesteuert werden, war es nur eine Frage der Zeit bis die neurowissenschaftlichen Methoden und das bestehende biologische Wissen in den Fachbereich der Ökonomie Einzug erhielten.

2.1.2 Neuroökonomie

Wie aus den bisherigen Ausführungen hervorgeht, stellt die Neuroökonomie die Integration der Neurowissenschaften in den Bereich der Ökonomie dar. Neuroökonomie kann folglich definiert werden „... *as the application of neuroscientific methods to analyze and understand economically relevant behavior.*“⁴⁰ Aus dieser Definition geht hervor, dass die Neuroökonomie in Bezug auf die Ökonomie keine eigenständige ökonomische Schule im Sinne einer eigenen Denkrichtung darstellt. Dies trifft auf die klassische Ökonomie, die Neoklassik und die Verhaltensökonomie zu. Die Neuroökonomie kann als eine Möglichkeit gesehen werden, verschiedene Theorien oder Ansätze auf einer tieferen Ebene, der neuronalen Ebene, zu prüfen.

³⁹ Glimcher, P. W. et al. (2009), S. 4

⁴⁰ Kenning, P.; Plassman, H. (2005), S. 344

Auf diese Weise können sowohl bestehende Theorien gestützt und somit weiter fundiert werden, aber auch aktuell geltende Theorien in Frage gestellt und somit Denkanstöße für die Generierung zutreffenderer Theorien gegeben werden. Unabhängig von Bestätigung oder Widerlegung ist generell ein tieferes Verständnis der zugrunde liegenden Prozesse zu erwarten. Der Ansatz der Neuroökonomie, der versucht ökonomisches Denken und Handeln über die Gehirnaktivität sichtbar zu machen, kann als Versuch verstanden werden, die geisteswissenschaftliche Perspektive der Ökonomie mit der naturwissenschaftlichen Perspektive der Neurowissenschaften in Beziehung zu setzen. Im Ergebnis bietet dieser Ansatz erweiterte Möglichkeiten, wirtschaftswissenschaftliche Entscheidungen und Verhaltensweisen zu erklären und zu verstehen.

Der Ansatz der Neuroökonomie und die damit verbundene Zielsetzung sind an *drei grundlegende Annahmen* gebunden.⁴¹ Damit von der neuronalen Aktivität auf wirtschaftliches Entscheiden und Verhalten geschlossen werden kann, muss zum einen gewährleistet sein, dass die eingesetzten neurophysiologischen Messverfahren in der Lage sind, die Aktivität eines Hirnareals zuverlässig zu erfassen. Dies gilt für die räumliche wie auch für die zeitliche Auflösung. Es muss zweitens davon ausgegangen werden, dass eine, über das verwendete Messverfahren, als aktiv identifizierte Gehirnregion in diesem Moment auch tatsächlich aktiv, entscheidungs- und somit verhaltensrelevant ist. Die dritte Annahme bezieht sich auf die Übertragbarkeit der Erkenntnisse. Zentrale Bedingung für eine Verallgemeinerung von Untersuchungsergebnissen im Bereich der Neuroökonomie ist, dass menschliche Gehirne über Personen hinweg weitestgehend vergleichbar sind, also eine relativ große interpersonelle Uniformität besteht. Sind die dargestellten Voraussetzungen nicht gegeben, so ist der Aussagegehalt der Neuroökonomie in Frage zu stellen.

Der zentrale Aspekt sowohl in Bezug auf die begriffliche Verankerung der Neuroökonomie wie auch in Hinsicht auf die damit verbundenen Annahmen ist die Verwendung von Messverfahren, um Gehirnaktivität zu erfassen. Hierbei kommen theoretisch mehrere Verfahren in Frage. Bei den vier bekanntesten Verfahren handelt es sich um die Elektroenzephalographie (EEG), die Magnetoenzephalographie (MEG), die Positronen-Emissions-Tomographie (PET) und die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT). Hinsichtlich der jeweils angewendeten Messgrundlage kann generell zwischen solchen Verfahren unterschieden werden, die elektromagnetische Veränderungen erfassen und denjenigen Verfahren, die auf Veränderungen des Hirnstoffwechsel basieren. Die EEG und die MEG zählen zur ersten Kategorie. PET und fMRT beruhen hingegen auf hirnstoffwechselbezogenen Veränderungen. Diese beiden Verfahren werden auch als bildgebende Verfahren bezeichnet, da im Ergebnis ihrer Anwendung hochauflösende dreidimensionale Gehirnabbildungen mit den entsprechenden Aktivierungen generiert werden können. Nachfolgend werden die vier genannten neurophysiologischen Messverfahren überblicksartig dargestellt.

⁴¹ vgl. Hain, C.; Kenning, P.; Lehmann-Waffenschmidt, M. (2007), S. 72

Das älteste neurophysiologische Verfahren, um Gehirnaktivität zu messen, ist die *Elektroenzephalographie (EEG)*⁴². Mittels dieses Verfahrens ist es möglich, oberflächennah elektrische Hirnpotenzialschwankungen zeitlich sehr genau zu erfassen. Wie in Kapitel 3⁴³ noch genauer ausgeführt wird, kommt es i.V.m. Gehirnaktivität in den betreffenden Gehirnregionen zu elektrischen Veränderungen, die über die EEG erfassbar sind. Die EEG verwendet hierfür mittlerweile bis zu 256 Messelektroden⁴⁴, die im Sinne einer Kappe bzw. eines Netzes am Kopf angebracht werden. Da die Messgrundlage, elektrische Aktivität, sehr schnell abläuft, ist die EEG in der Lage, aktive Gehirnbereiche nahe der Kopfoberfläche zeitlich sehr genau herauszustellen. Vorteile der EEG sind, dass sie nicht invasiv ist und somit nicht in den Körper eindringt, eine hohe zeitliche Auflösung besitzt und vergleichsweise geringe Kosten mit sich bringt. Die *Magnetoenzephalographie (MEG)*⁴⁵ stellt ein weiteres Verfahren zu Messung der Gehirnaktivität dar, das ähnliche Leistungswerte wie die EEG aufweist. Die bereits angesprochenen elektrischen Veränderungen im Zuge von Gehirnaktivität erzeugen gleichzeitig magnetische Signale, die im Rahmen der MEG über äußere Sensoren, sog. SQUIDS⁴⁶, aufgefangen werden können. Die Basis dieser Messung besteht folglich in den magnetischen Veränderungen im Zusammenhang mit Gehirnaktivität. Die MEG bietet, genau wie die EEG, eine hohe zeitliche Auflösung und ist ebenfalls nicht invasiv. Im Vergleich zur EEG kann bei der MEG zusätzlich von einer guten räumlichen Auflösung gesprochen werden. Allerdings erweist sich die MEG als relativ teuer und komplex. Beide genannten Messverfahren haben ihre Stärke in der zeitlichen Auflösung, die im Millisekunden-Bereich liegt. So ist es in beiden Fällen möglich, Gehirnaktivität zeitlich sehr genau zu detektieren, die nahe der Gehirnoberfläche auftritt. Tiefer liegende Gehirnregionen sind schwerer bzw. nicht zu erfassen. EEG und MEG sind daher im Ergebnis nicht dazu geeignet, alle anatomische Strukturen und ihre Funktionen präzise zu lokalisieren.

Im Defizit dieser beiden Verfahren liegt gerade der zentrale und gewichtige Vorteil der PET und der fMRT. Beide sog. bildgebende Verfahren ermöglichen eine 3D-Abbildung des Gehirns mit der zusätzlichen Markierung aktivierter Regionen. Im Gegensatz zur EEG und MEG beruhen diese Verfahren auf der Messung hirnstoffwechselbezogener Veränderungen, die mit Gehirnaktivität einhergehen. Sie bewerkstelligen dies jedoch auf unterschiedliche Weisen. Im Zuge der *Positronen-Emissions-Tomographie (PET)*⁴⁷ erfolgt die Injektion radioaktiv markierter Stoffe. Bspw. wird ein radioaktiver Stoff an Glukose gekoppelt. Neben Sauerstoff ist Glukose auf der einen Seite Teil des Stoffwechsels und auf der anderen Seite nötig, um die verschiedenen

⁴² vgl. Jäncke, L. (2005), S. 152 ff.; Dierks, T. (2005), S. 129 ff.; Graf, W.; Hamer, H. M. (2012), S. 325 ff.

⁴³ Kapitel 3 Gehirn und Gehirnaktivität - Biologische Grundlagen

⁴⁴ vgl. Hinrichs, H. (2010), S. 10

⁴⁵ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 190 ff.; Schnitzler, A.; Gross, J. (2005), S. 151 ff.; Rogers, R. L. (1994), S. 289 ff.

⁴⁶ **Superconducting QUantum Interference Devices**

⁴⁷ vgl. Cherry, S. R.; Dahlbom, M.; Phelps, M. E. (2006), S. 1 ff.; Jäncke, L. (2005), S. 136 ff.; Metter, E. J.; Hanson, W. R. (1994), S. 124 f.

Stoffwechselprozesse der Zellen aufrecht zu erhalten.⁴⁸ Nach einer gewissen Zeit gelangt die markierte Glukose in Folge von Gehirnaktivität vermehrt in den Gehirnbe- reich, in dem erhöhte Aktivität stattfindet. Gelangt die markierte Glukose in die Zelle, so werden in Folge der Instabilität des radioaktiven Stoffes Positronen⁴⁹ an die Um- gebung abgegeben. Trifft hierbei ein Positron auf ein Elektron, kommt es zu einer Annihilation bzw. Paarvernichtung⁵⁰. Durch das Aufeinandertreffen werden Photo- nen⁵¹ freigesetzt. Diese Strahlung aus dem Inneren der Zellen kann über geeignete Empfänger gemessen werden. Auf diese Art wird Gehirngewebe sichtbar gemacht, das in Folge erhöhter Gehirnaktivität viel Energie verbraucht und eine hohe Stoff- wechselrate aufweist. Festzuhalten bleibt, dass im Rahmen der PET keine Strahlung von außen eingesetzt wird. Vielmehr wird ein radioaktiver Stoff verabreicht, der zum Bestandteil des Körperstoffwechsels wird und im Endeffekt selbst aus dem Körper Strahlung aussendet. Mit Hilfe der PET kann die beschriebene Strahlung gemessen werden, die in Folge von Gehirnaktivität entsteht und verwendet wird, um diese zu indizieren. Die PET ist allerdings auf ein weiteres Verfahren angewiesen, um die Messung der Gehirnaktivität mit einer 3D-Gehirn-Abbildung zu verknüpfen. Für sich alleine gesehen, bietet die PET nur eine geringe räumliche Auflösung. In den meis- ten Fällen wird die PET daher mit einer strukturellen Magnetresonanztomographie (MRT) kombiniert. Die PET weist in Kombination mit einer MRT eine hohe räumliche Auflösung auf. In Bezug auf die zeitliche Dimension, weist die PET im Vergleich zu den anderen Verfahren eine relativ schwache Auflösung auf, da sich die Messung der Aktivitätsveränderung auf Prozesse konzentriert, die eine Minute und länger dauern.⁵² Dieses Messverfahren ist sehr aufwändig und teuer. Zudem muss mit radi- oaktiven Substanzen gearbeitet werden.

Das Verfahren der *funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT)*⁵³ beruht auf physiologischen Begleiterscheinungen, die mit Gehirnaktivität einhergehen. Grundla- ge der Messung ist die Veränderung der Sauerstoffsättigung des Blutes. Hierauf wird noch ausführlich in Kapitel 5.1⁵⁴ eingegangen. Im Rahmen der fMRT wird mit starken Magnetfeldern und Hochfrequenzimpulsen gearbeitet, um zum einen 3D- Abbildungen des Gehirns zu generieren und zum anderen um aktivierte von nicht- aktivierten Gehirnregionen zu unterscheiden. Die fMRT bietet faktisch die beste räumliche Auflösung, ist nicht invasiv und kommt ohne den Einsatz radioaktiv mar- kierter Substanzen aus. Der einzige Nachteil kann in der etwas geringeren zeitlichen Auflösung gesehen werden, die unter anderem daraus resultiert, dass die biologi-

⁴⁸ Im Rahmen von *Kapitel 5.1 Das MR-Signal im Rahmen der fMRT* wird noch genauer auf die Einzel- heiten eingegangen.

⁴⁹ Atome bestehen aus einem Atomkern und einer dazugehörigen Hülle. Der Atomkern besteht aus Positronen und Neutronen. Die Atomhülle besteht aus Elektronen. Positronen sind die Antiteilchen der negativ geladenen Elektronen. Sie sind positiv, also entgegengesetzt, geladen.

⁵⁰ vgl. Cherry, S. R.; Dahlbom, M.; Phelps, M. E. (2006), S. 5 ff.; Jäncke, L. (2005), S. 140 ff.

⁵¹ Jede elektromagnetische Strahlung besteht aus Photonen. Ein Photon entspricht folglich der kleinsten Menge elektromagnetischer Strahlung. Beim Aufeinandertreffen eines Protons und eines Elektrons entsteht im Ergebnis eine Strahlung von 2 Photonen.

⁵² vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 13

⁵³ vgl. Kapitel 5. Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

⁵⁴ Kapitel 5.1 Das MR-Signal im Rahmen der fMRT

sche Messgrundlage der fMRT in Bezug auf die Gehirnaktivität zeitlich um einige Sekunden verzögert erfolgt. Demnach ist die zeitliche Auflösung nicht so hoch wie bei der EEG oder der MEG, doch höher als bei der PET. Die fMRT erfasst Gehirnaktivität sekundenweise. „*Functional MRI provides a good balance of spatial and temporal resolution and thus is appropriate for a wide range of experimental questions.*“⁵⁵ fMRT-Untersuchungen sind zwar relativ kostenintensiv, dennoch haben sie sich aufgrund ihrer Vorzüge gegenüber den anderen beschriebenen Messverfahren durchgesetzt. Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT) wird im Bereich der Neuroökonomie ohne Zweifel am häufigsten eingesetzt, um Gehirnaktivität zu messen und abzubilden. Genau aus diesem Grund widmet sich die vorliegende Arbeit der Anwendung dieses zentralen neurophysiologischen Messverfahrens.

Nachdem die Neuroökonomie definiert wurde, auf die zentralen Annahmen im Zusammenhang mit diesem Ansatz eingegangen und auch verschiedene neurophysiologische Messverfahren kurz gegeneinander kontrastiert wurden, sollen abschließend einige interessante Forschungsgebiete aus dem Bereich der Neuroökonomie dargestellt werden, bevor sich der Fokus auf den speziellen Anwendungsbereich dieser Arbeit richtet.

Die neuroökonomische Forschung lässt sich zum einen dahingehend differenzieren, ob sich eine Untersuchung auf „*individuelles Entscheidungsverhalten im Kontext nicht-interaktiver Entscheidungen*“⁵⁶ (z.B. Präferenz, Risiko und Gedächtnis) bezieht oder auf „*strategisch-interaktive Entscheidungen eines Subjekts, für das die Konsequenzen seiner eigenen Entscheidungen auch von den Entscheidungen anderer Akteure abhängen*“⁵⁷ (z.B. soziale Präferenz, Altruismus und Fairness). Im ersten Fall, der sich auf individuelles Entscheiden bezieht, spricht man von *intrapersonalem Entscheidungsverhalten*. Den zweiten beschriebenen Fall bezeichnet man auch als *interpersonelles Entscheidungsverhalten*.

Neben dieser groben Unterscheidung kann anhand inhaltlicher Aspekte eine feinere Untergliederung neuroökonomischer Forschungsgebiete erfolgen. Der Bereich des *Neurofinance*⁵⁸ untersucht bspw. welche Prozesse bei finanziellen Entscheidungen auf neuronaler Ebene stattfinden. Von Interesse ist z.B. welche Gehirnregionen derartige Entscheidungen regulieren und in diesem Zusammenhang auch, welche Faktoren über Handelserfolg bzw. -misserfolg entscheiden. Im Rahmen des Neurofinance wird sowohl das Verhalten auf Finanzmärkten (Investitionen und Trading) als auch Konstrukte wie Vertrauen, Gier, Angst und Risiko betrachtet. Unter der Bezeichnung *Intertemporal Choice*⁵⁹ können Untersuchungen zusammengefasst werden, die sich mit ökonomisch relevantem Entscheidungsverhalten in Abhängigkeit von der Zeit beschäftigen. Es ist bspw. bereits bekannt, dass die gleiche entgeltliche Be-

⁵⁵ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 14

⁵⁶ Hain, C.; Kenning, P.; Lehmann-Waffenschmidt, M. (2007), S. 72

⁵⁷ ebenda, S. 72

⁵⁸ vgl. Bürger, C.; Weber, B. (2011); Elger, C. E.; Scharz, F. (2009); Kenning, P.; Mohr, P.; Plassmann, H. (2007)

⁵⁹ vgl. Carter, R. M.; Meyer, J. R.; Huettel, S. A. (2010); Kable, J. W.; Glimcher, P. W. (2007); Xu, L.; Liang, Z.-Y.; Wang, K.; Li, S.; Jiang, T. (2009)

lohnung weniger wert ist, wenn sie erst zu einem späteren Zeitpunkt realisiert werden kann. Hat man bspw. die Chance 50€ nach vier Tagen zu bekommen, anstelle derselben 50€ erst nach sechs Tagen, so wird dies i.d.R. mit einer höheren Wertigkeit verbunden und präferiert. Auch beim Vergleich der Situation, in der eine niedrigere Belohnung zu einem früheren Zeitpunkt in Aussicht gestellt wird, mit der Situation, in der eine höhere Belohnung erst später ausgezahlt wird, liegt die Präferenz i.d.R. auf der vom Wert her niedrigeren aber früher realisierbaren Variante. Doch wie lässt sich dieses Phänomen auf neuronaler Ebene erklären? Was ist dafür verantwortlich, dass besagtes Phänomen bei einigen Personen stärker und bei anderen Personen schwächer ausgeprägt ist? Die Grundthematik kann hierbei auf verschiedene Bereiche übertragen werden. So kann als weiteres Beispiel das Szenario verwendet werden, indem Personen dazu angehalten werden, ihren aktuellen CO₂-Ausstoß zu reduzieren, um die Erderwärmung in der Zukunft zu verringern. Ebenfalls könnte ein Fitnesstraining heute empfohlen werden, um den Grundstein für die zukünftige Gesundheit zu legen. Ein grundlegendes Element im Bereich der Intertemporal Choice besteht in der Frage nach der Selbstkontrolle. Ihr Verständnis ist zentral für die Erklärung der beschriebenen Phänomene. Folglich geht es im Kern darum zu erforschen, wodurch sich auf neuronaler Ebene ein höheres oder geringeres Maß an Selbstkontrolle ausdrückt bzw. wie die Regulation der Selbstkontrolle erfolgt und evtl. wie eine Veränderung bewirkt werden kann. Ein weiterer spannender Bereich der Neuroökonomie beschäftigt sich mit *Reward & Learning*. Im Fokus stehen hier Themen wie Belohnung, Motivation und Zufriedenheit. Eng damit verknüpft ist auch das *Neuroleadership*⁶⁰, im Sinne der Mitarbeiterführung. Im Zuge der vorliegenden Arbeit ist das *Neuromarketing*, ein weiterer Forschungsbereich innerhalb der Neuroökonomie, von besonderem Interesse. Grundlegend geht es hierbei um die Untersuchung marketingbezogener Fragestellung auf neuronaler Ebene.

2.2 Spezieller Anwendungsbereich

Das Ziel der Arbeit besteht letztlich in einer kritischen Beleuchtung methodischer Aspekte i.V.m. dem sog. Neuromarketing und der Darstellung der eigenen Position hinsichtlich der allgemeinen Leistungsfähigkeit der fMRT und ihrer konkreten Bedeutung für das Marketing. Im Sinne der Zielsetzung erfolgt an dieser Stelle die Einleitung in den speziellen Bereich des Neuromarketings, nachdem die Neuroökonomie bereits als Oberbegriff allgemein thematisiert wurde. Grundlegende Aspekte des Marketings sowie der Entwicklungsverlauf des operativen Marketings werden vorgestellt. Zudem wird das Konstrukt Neuromarketing über die Unterscheidung eines weiteren und engeren Begriffsverständnisses abgebildet, bevor genauer auf die zwei daraus resultierenden Perspektiven eingegangen wird.

⁶⁰ vgl. Elger, C. E. (2009); Peters, T.; Ghadiri, A. (2013); Fliessbach, K.; Weber, B.; Trautner, P.; Dohmen, T.; Sunde, U.; Elger, C. E.; Falk, A. (2007)

2.2.1 Entwicklung des operativen Marketings

Marketing wurde früher, teilweise heute noch, nur mit Verkauf und Werbung in Verbindung gebracht. Diese Sicht ist allerdings im Sinne einer adäquaten Definition viel zu eng. Über die Zeit hat sich das Begriffsverständnis des Marketings stark verändert. Mittlerweile werden viele verschiedene Funktionen, Prozesse und Zuständigkeiten mit dem Marketingbegriff assoziiert, die weit über Verkauf und Werbung hinausgehen. „Marketing is the activity, set of institutions, and processes for creating, communicating, delivering, and exchanging offerings that have value for customers, clients, partners, and society at large.“⁶¹ Generell kann festgehalten werden, dass der Schwerpunkt nicht auf dem schnellen Verkauf, sondern auf der Befriedigung der Kundenbedürfnisse, der langfristigen Kundenbindung und der gleichzeitigen Erreichung der verschiedenen Unternehmensziele liegt.⁶²

Betrachtet man das Marketing als Managementprozess, so versteht man darunter „... the process of setting goals for an organization (considering internal resources and market opportunities), the planning and execution of activities to meet these goals, and measuring progress towards their achievement.“⁶³ Die aufeinander aufbauenden und rückgekoppelten Teilprozesse auf dem Weg zur Erstellung und Umsetzung einer Marketingkonzeption sind Abbildung 1 zu entnehmen.

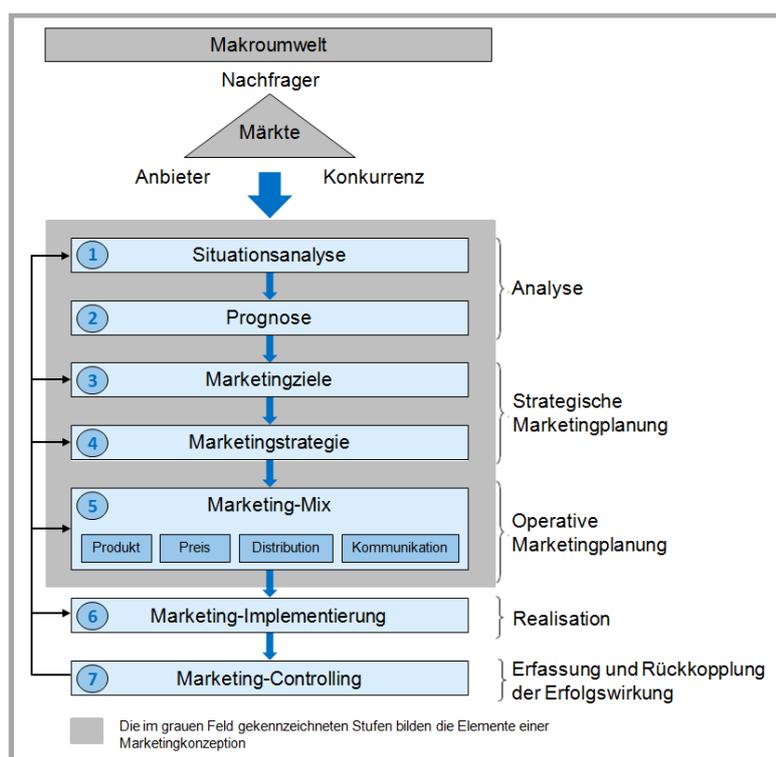


Abbildung 1: Aufgaben des Marketings als Managementprozess⁶⁴

⁶¹ <https://www.ama.org/AboutAMA/Pages/Definition-of-Marketing.aspx> (abgerufen am 26.05.2014)

⁶² vgl. Esch, F.-R.; Herrmann, A.; Sattler, H. (2011), S. 1

⁶³ <https://www.ama.org/resources/Pages/Dictionary.aspx?dLetter=M&dLetter=M> (abgerufen am 27.05.2014)

⁶⁴ Meffert, H.; Burmann, C.; Kirchgeorg, M. (2012), S. 20

Zu Beginn eines jeden Prozesses steht eine *Situationsanalyse*. Um zu klären, wo das eigene Unternehmen bzw. der Auftraggeber steht, werden Informationen gesammelt, um eine Aussage über unternehmensinterne wie auch -externe Gegebenheiten treffen zu können. Im Rahmen der *Prognose* werden mit Bezug zur Situationsanalyse in einem zweiten Schritt mögliche Potentiale bzw. Zukunftschancen abgeleitet. Nach der grundlegenden Analyse wird die strategische Marketingplanung festgelegt. Hierbei gilt es zuerst die langfristigen *Marketingziele* (ökonomische bzw. vorökonomische Ziele) zu definieren und anschließend adäquate *Marketingstrategien* zur Zielerreichung abzuleiten. Marktdurchdringung, Marktentwicklung und Diversifikation sind Beispiele für potentielle Strategien. Ist die strategische Marketingplanung fixiert, geht es im Zuge des operativen Marketings um die Auswahl und Planung konkreter Marketingmaßnahmen, um die festgelegte Strategie in Bezug auf die Zielsetzung zu verfolgen. Die zur Verfügung stehenden Maßnahmen bzw. Instrumente werden im sog. *Marketing-Mix* zusammengefasst. Dieser Mix an Optionen lässt sich generell in die traditionellen vier Ps (product, price, promotion, place)⁶⁵ untergliedern, wobei mittlerweile auch weitere Kategorien diskutiert werden. Der traditionelle Marketing-Mix ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Herausforderung i.V.m. dem Marketing-Mix besteht darin, die im Sinne der Zielerreichung passende Kombination der zur Verfügung stehenden Instrumente zu wählen. Mit dem festgelegten Marketing-Mix wird dann versucht, die relevanten Teilmärkte zu bearbeiten bzw. die anvisierten Zielgruppen zu erreichen.

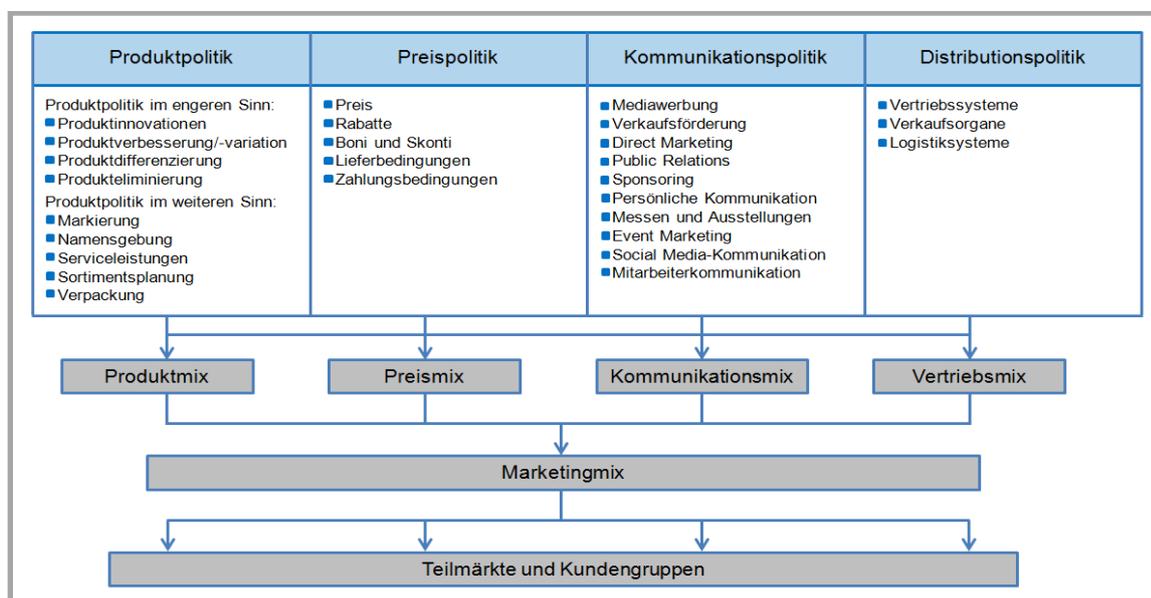


Abbildung 2: Die klassischen Marketinginstrumente (vier Ps) im Marketingmix⁶⁶

Im vorletzten Schritt des Managementprozesses geht es um die *Marketing-Implementierung*. Im Vordergrund steht an dieser Stelle des Prozesses die konkrete Umsetzung der erarbeiteten Marketingmaßnahmen. Hierzu muss die Aufbau- und Ablauforganisation effizient geplant werden und die jeweiligen Verantwortungsbereiche und Budgets zugewiesen werden. Den Abschluss des Prozesses bildet die

⁶⁵ Produktpolitik, Preispolitik, Kommunikationspolitik und Distributionspolitik

⁶⁶ Bruhn, M. (2012), S. 30

Überprüfung der Zielerreichung. Im Ergebnis des *Marketing-Controllings* können gegebenenfalls Anpassungen in den unterschiedlichen Teilprozessen vorgenommen werden.

Nachdem ein Überblick über den Marketingbegriff und die verschiedenen Teilprozesse gegeben wurde, konzentriert sich die Betrachtung nun auf das bereits erwähnte operative Marketing, genauer gesagt auf die *Entwicklung innerhalb des operativen Marketings*. Zum einen finden das neurowissenschaftliche Wissen bzw. die entsprechenden Messverfahren vor allem in diesem Bereich Anwendung. Zum anderen kann gerade über die Betrachtung der Entwicklung des operativen Marketings auch die allgemeine Relevanz der neurowissenschaftlichen Perspektive herausgestellt werden. Wie im weiteren Verlauf noch zu zeigen ist, kann der Nutzen der neurowissenschaftlichen Perspektive auch auf den strategischen Bereich ausgeweitet werden. Das bereits angesprochene immer breiter werdende Begriffsverständnis des Marketings ist letztlich der Marktentwicklung in Deutschland geschuldet.⁶⁷ Abbildung 3 zeigt die verschiedenen Entwicklungsphasen mit den jeweils zentralen Ausrichtungen.

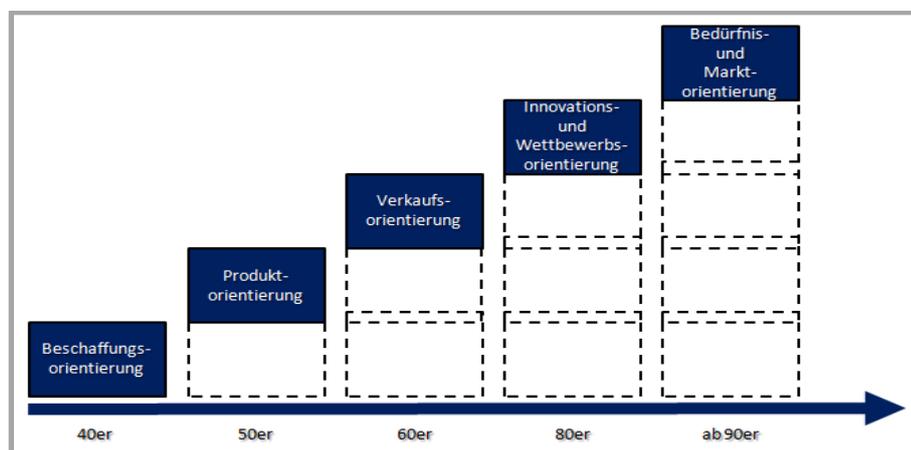


Abbildung 3: Entwicklungsstufen des Marketings⁶⁸

In der ersten Phase (40er Jahre) vor dem Ende des 2. Weltkrieges sah sich die Bevölkerung einer Mangelsituation gegenüber. Das oberste Ziel bestand in der Beschaffung von Rohstoffen und Betriebsmitteln. Diese Beschaffungsorientierung ist charakteristisch für diese erste Phase. In den 50er Jahren bzw. nach dem Kriegsende änderten sich die Stimmung und die Situation in Deutschland. Diese Zeit war geprägt durch den wirtschaftlichen Aufschwung, der in einer gesteigerten Nachfrage zum Ausdruck kam. Im Ergebnis entstand ein Verkäufermarkt, da die Nachfrage das Angebot überstieg. Die Reaktion auf die veränderten Umstände lag in der zunehmenden Steigerung der Produktion. Diese zweite Phase wurde durch Massenproduktion und die Entwicklung effizienter Produktionstechnologien bestimmt. Im Zeitverlauf ergaben sich nach diesem wirtschaftlichen Aufschwung zunächst Sättigungstendenzen bis hin zur vollständigen Umwandlung des Marktes in einen Käufermarkt (90er Jahren bis heute). Die Phasen auf dem Weg zum Käufermarkt sind mit zunehmen-

⁶⁷ vgl. Esch, F.-R.; Herrmann, A.; Sattler, H. (2011), S. 1 ff.

⁶⁸ ebenda, S. 2

dem Sättigungsgrad durch eine verstärkte Verkaufsorientierung (60er Jahre), eine Konzentration auf Innovation und Wettbewerb (80er Jahre) und schließlich in den 90er Jahren durch die Bedürfnis- und Marktorientierung gekennzeichnet.

Bezugnehmend auf die Abbildung der Marktentwicklung in Deutschland seit den 40er Jahren erfolgt an dieser Stelle die Darstellung der Entwicklung des operativen Marketings. Die erste Entwicklungsphase des operativen Marketings, die hier als *instrumentenbezogene Perspektive* bezeichnet wird, bezieht sich auf die Marktentwicklung vor den 90er Jahren. Durch die zeitlich variierenden Marktanforderungen entstanden in der logischen Konsequenz die einzelnen Einflussbereiche in Form der vier Ps des operativen Marketings: Product, Price, Promotion, Place. Im Fokus dieser ersten Entwicklungsstufe steht nicht der Konsument selbst, sondern die Entwicklung bzw. die Ansammlung der einzelnen Instrumente des Marketing-Mix.

Erst mit voranschreitender Marktsättigung bzw. dem Wandel vom Verkäufer- zum Käufermarkt (ab den 90er Jahre) sind die Unternehmen gezwungen, den Konsumenten in den Mittelpunkt der Betrachtung zu rücken. Es wird relevanter den Konsumenten zu verstehen, um Produkte besser abzusetzen. Verhaltenswissenschaftliche Ansätze zur Erklärung des Konsumentenverhaltens gewinnen ab dieser Phase an Bedeutung. Zum einen soll über diese ein tieferes Verständnis der Kaufentscheidungsprozesse ermöglicht werden. Zum anderen geht es auch um die Herausstellung der Wirkung einzelner Marketinginstrumente auf das Kaufverhalten. Der Begriff des Konsumentenverhaltens hat seinen Ursprung in den 70er Jahren und wird vor allem mit den Namen *Howard & Sheth*⁶⁹ (USA) und *Kroeber-Riel*⁷⁰ (Deutschland) assoziiert. „*Letztlich versucht die Konsumentenverhaltensforschung, Fragen nach dem „Warum“ und „Wie“ des Käuferverhaltens zu beantworten.*“⁷¹ Im Sinne eines Erkenntnisinteresses steht auf dieser zweiten Entwicklungsstufe, hier *psychologische bzw. verhaltenswissenschaftliche Perspektive* genannt, das bessere Verständnis des Konsumenten im Vordergrund. Hierzu wurden verschiedene Modelle und Erklärungsansätze erstellt, die verschiedene inter- und intrapersonale Bestimmungsfaktoren berücksichtigen. Zu diesen Bestimmungsfaktoren zählen bspw. die Konstrukte Aktiviertheit/ Involvement, Emotionen, Motive, Einstellungen, Werte, Persönlichkeit, sowie weitere interindividuelle Faktoren. Diese Konstrukte fungieren als intervenierende Variablen zur Erklärung des Kaufverhaltens und versuchen auf diese Weise die inneren Prozesse des Konsumenten mit Bezug zum Konsumverhalten abzubilden. Neben den genannten Konstrukten wurde die Betrachtung durch die Berücksichtigung des Lang- und Kurzzeitgedächtnisses erweitert, so dass zusätzlich auch Wissen, Denken und Lernen in die Modelle integriert wurden. Abbildung 4 zeigt beispielhaft ein Modell, das sowohl die Stimuli (S), nicht direkt beobachtbare Prozesse innerhalb des Konsumenten bzw. Organismus (O) und auch die beobachtbaren Reaktionen (R) erfasst. Im Ergebnis kann auf dieser Stufe, im Sinne einer Weiterentwicklung der sog. Black-Box-Modelle bzw. dem behavioristischen Forschungsansatz, mit den ersten Varian-

⁶⁹ vgl. Howard, J. A.; Sheth, J. N. (1969)

⁷⁰ vgl. Kroeber-Riel, W. (1972)

⁷¹ Kroeber-Riel, W.; Gröppel-Klein, A. (2013), S. 3

ten sog. S-O-R-Modelle gearbeitet werden. In Bezug auf Forschungsansätze kann die zweite Entwicklungsstufe des operativen Marketings mit dem neobehavioristischen und dem kognitiven Forschungsansatz verbunden werden.⁷²

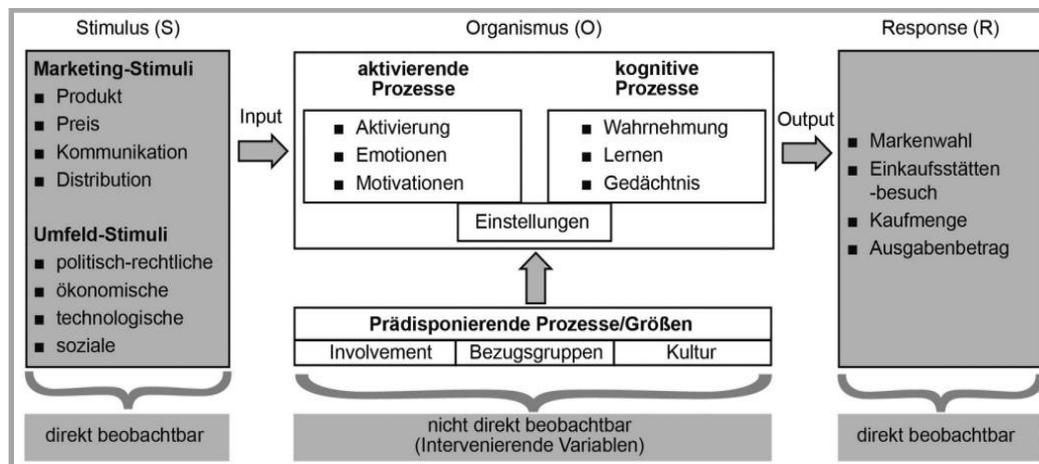


Abbildung 4: Beispielhaftes SOR-Modell des Konsumentenverhaltens⁷³

Die dritte Entwicklungsstufe ist ebenfalls im Sinne von SOR-Modellen zu verstehen, doch dieses Mal kann das Gehirn bzw. Gehirnaktivität mit in die Betrachtung eingeschlossen werden. Dies wird insofern als eine weitere Entwicklungsstufe aufgefasst, als dass das Gehirn das zentrale Entscheidungsorgan des Menschen darstellt. Jegliche Handlung ist vom Gehirn autorisiert. Möchte man Verhalten ursächlich erklären, muss eine genaue Auseinandersetzung mit den Funktionen und der Wirkweise des Gehirns erfolgen. Aufgrund der rasanten Entwicklung der neurophysiologischen Messverfahren und dem damit einhergehenden verbesserten Verständnis neuronaler Prozesse bestehen mittlerweile erweiterte Möglichkeiten, Konsumentenverhalten zu untersuchen und einen Erklärungsversuch zu unternehmen. Im Rahmen der zweiten Entwicklungsstufe des operativen Marketings wird der Organismus zwar ebenfalls in den Mittelpunkt gerückt, die Wirkung bzw. der Einfluss verschiedener Konstrukte berücksichtigt und sogar verschiedene apparative Verfahren, wie das Eyetracking oder die Messung des Hautleitwiderstands eingesetzt, um Konsumentenverhalten besser zu verstehen. Allerdings können die zugrundeliegenden neuronalen Prozesse und Wirkungen im Rahmen dieser Perspektive nur theoretisch vermutet bzw. unterstellt werden. Genau hierin ist die Beschränkung der zweiten Stufe bzw. der Mehrwert der dritten Entwicklungsstufe zu sehen. Die *neurophysiologische Perspektive* beschreibt somit die dritte Entwicklungsstufe des operativen Marketings. Hierbei kann neben den bereits bestehenden Theorien zum einen das neurowissenschaftliche Grundlagenwissen und zum anderen neues Wissen über die Anwendung neurophysiologischer Verfahren im Bereich des Marketing mit einfließen, um zu einem tieferen Verständnis des Konsumentenverhaltens zu gelangen.

⁷² vgl. Meffert, H.; Burmann, C.; Kirchgeorg, M. (2012), S. 102 ff.

⁷³ Foscht, T.; Swoboda, B. (2007), S. 30

2.2.2 Neuromarketing

Die dritte Entwicklungsstufe des operativen Marketings, die neurophysiologische Perspektive, kann mit dem Begriff *Neuromarketing* bzw. *Consumer Neuroscience* gleichgesetzt werden. Grundlegend kann Neuromarketing als eine Disziplin aufgefasst werden, „... die neurowissenschaftliche Erkenntnisse und Methoden nutzt, um die Grundlagen des für das Marketing relevanten Konsumentenverhaltens besser zu verstehen.“⁷⁴ Aus diesem allgemeinen Begriffsverständnis heraus haben sich mittlerweile zwei Teilbereiche mit jeweils unterschiedlichen Schwerpunkten herausgebildet. *Neuromarketing im engeren Sinne*⁷⁵ bezieht sich konkret auf die Anwendung apparativer Verfahren der Neurowissenschaften auf Marketingfragestellungen. Das Forschungsinteresse richtet sich hierbei sowohl auf die Wirkungen verschiedener Marketinginstrumente als auch auf das tiefere Verständnis des Kaufverhaltens bzw. der Kaufentscheidungen auf neuronaler Ebene. Im Rahmen dieser Perspektive wird in Bezug auf das Marketing versucht, über die Erfassung der Gehirnaktivität zu neurowissenschaftlichen Erkenntnissen zu gelangen. Einige Forscher sprechen den apparativen Verfahren zwar eine Notwendigkeit im Bereich der Grundlagenforschung zu, verbinden mit denselben Verfahren jedoch nur eine geringe Praxisrelevanz.⁷⁶ Trotz dieser Ansicht wird dennoch eine Integration der Hirnforschung in den Marketingbereich angestrebt; dies kommt in einem breiteren Verständnis des Neuromarketingbegriffs zum Ausdruck. Im Rahmen des *Neuromarketing im weiteren Sinne*⁷⁷ wird nicht mit apparativen Verfahren gearbeitet und auch keine Gehirnaktivität gemessen. Man geht davon aus, dass neurowissenschaftliche Grundlagenstudien bereits eine Fülle an Erkenntnissen erbracht haben, die man nutzen kann, auch ohne kostenintensive neurophysiologische Verfahren zu verwenden. Das Ziel besteht hierbei in der Generierung praxisorientierter Anwendungen, die auf den bereits vorhandenen neurowissenschaftlichen Erkenntnissen basieren. Im Ergebnis wird der Begriff des Neuromarketings weiter gefasst, indem man versucht, die Erkenntnisse und Verfahren verschiedener Disziplinen⁷⁸ für die Marketingpraxis zu nutzen.

Diese beiden unterschiedlichen Varianten des Neuromarketings sollen nachfolgend mit dem Ziel eines besseren Grundverständnisses mit Hilfe konkreter Beispiele dargestellt werden. Im Falle der weiter gefassten Definition werden hierzu die zwei bekanntesten Ansätze vorgestellt. Mit Bezug auf das engere Begriffsverständnis werden einige interessante fMRT-Studien mit ihren Ergebnissen skizziert.

2.2.2.1 Neuromarketing im weiteren Sinne

Die zwei bekanntesten Ansätze aus dem Bereich des Neuromarketings im weiteren Sinne sind die *Limbic-Map* von Häusel und das *Brand Code Management (BCM)* von

⁷⁴ Kenning, P.; Plassmann, H.; Ahlert, D. (2007), S. 57

⁷⁵ vgl. Häusel, H.-G. (2012a), S. 19; Felix, C. (2008), S. 7

⁷⁶ vgl. Scheier, C.; Held, D. (2012a), S. 23 ff.

⁷⁷ vgl. Scheier, C.; Held, D. (2012a), S. 25 ff.; Häusel, H.-G. (2012a), S. 19

⁷⁸ Hirnforschung, Marketing, Psychophysik, Entwicklungspsychologie, Künstliche Intelligenz, Kulturwissenschaften, Marktforschung und Kognitive Psychologie

Betrachtet man Abbildung 5 so wird deutlich, dass die Limbic-Map ein vielseitig einsetzbares Kategorisierungswerkzeug darstellt. Da Produktkategorien und Märkte i.d.R. jeweils durch spezifische Motive angetrieben werden, ist es generell möglich diese über die Limbic-Map zu analysieren. Die Limbic-Map kann ebenso dazu verwendet werden, den emotionalen Kern einer Marke zu erfassen oder eine Marke anhand der Limbic-Map zu positionieren. Desweiteren kann sie auch im Bereich der Zielgruppensegmentierung eingesetzt werden.

Die *neurobiologische Verankerung* der Emotionssysteme besteht darin, dass jedes System mit unterschiedlichen Neurotransmittern in Verbindung gebracht werden kann und über unterschiedliche Gehirnregionen bzw. Ansammlungen von Strukturen gesteuert wird. Es kann folglich sowohl neurochemisch wie auch neuroanatomisch zwischen ihnen differenziert werden.⁸⁸ In diesem Sinne spricht man auch von eigenständigen Emotionssystemen. Doch unabhängig von der Unterscheidung der drei Systeme arbeiten sie im Rahmen einer höheren Logik systematisch zusammen. „Während das Dominanz- und das Stimulanz-System zur Aktion und auch zum Risiko drängen, fungiert das Balance-System als Risiko begrenzende Gegenkraft.“⁸⁹ Neben der neurobiologischen Fundierung der Emotionssysteme, beruht auch die Kernposition dieses Ansatzes in Form der zentralen Bedeutung von Emotionen auf unterschiedlichen neurowissenschaftlichen Erkenntnissen. Häusel beschreibt diese mit dem Begriff der *emotionalen Wende*⁹⁰. Hierbei geht es um die Ablösung eines überholten durch ein realistischeres Menschenbild. Das *Menschenbild bis 1995* sah den Menschen als weitgehend bewusst und vernünftig agierendes Wesen. Diese Sicht spiegelte sich auch in der damaligen Vorstellung in Bezug auf die Funktionsweise im Gehirn wider. Man ging davon aus, dass sich das Gehirn in drei größere Bereiche unterteilen lässt, die jeweils unterschiedliche Funktionen aufweisen. Dem Neocortex bzw. der Großhirnrinde wurde die größte Relevanz beigemessen, da mit diesem Bereich Vernunft und Verstand verbunden wurden. Der Neocortex galt als das Machtzentrum. Den beiden tieferliegenden Regionen, dem Zwischenhirn und dem Hirnstamm, wurde hingegen kaum Beachtung geschenkt. Sie wurden mit Emotionen und Instinkten assoziiert, die letztlich nur beim Denken stören. Neben der Konzentration auf den Neocortex bestand ein weiterer charakteristischer Punkt des Menschenbildes darin, dass die drei genannten Bereiche als weitgehend unabhängig voneinander wahrgenommen wurden. Die Vorstellung einer klaren Ordnung im Gehirn und das Bild eines rationalen Menschen wurden durch verschiedene Erkenntnisse, die um 1995 verstärkt Gehör fanden, zunächst erschüttert und anschließend durch ein adäquateres Verständnis ersetzt. Häusel stützt sich bei dieser *Revolution im Gehirn* vor allem auf die Arbeiten von *Damasio* und *LeDoux*.

Im Fall von *Damasio*⁹¹ stammen die Erkenntnisse vor allem aus der Arbeit mit Patienten, die Schäden im präfrontalen Cortex (PFC) aufwiesen. Dieser zählt zum Neo-

⁸⁸ vgl. Häusel, H.-G. (2011), S. 30 ff.

⁸⁹ Häusel, H.-G. (2012b), S. 79

⁹⁰ vgl. Häusel, H.-G. (2012b), S. 71 ff.; Häusel, H.-G. (2011), S. 24 ff.

⁹¹ vgl. Damasio, A. R. (1994), Häusel, H.-G. (2012b), S. 73 f.

cortex und sollte daher in Anlehnung an das zuvor bestehende Bild (vor 1995) nur mit rationalen Dingen beschäftigt sein. Bei *Patient Elliot* bspw. musste aufgrund eines Tumors ein Teil des PFC entfernt werden. Nach dem Eingriff gab es keine Anzeichen von Gedächtnisproblemen und auch i.V.m. der Intelligenz konnte keine Veränderung festgestellt werden. Allerdings mangelte es Elliot nach dem Eingriff an Gefühlen. Im Ergebnis führte dies auch zu einer empfindlichen Störung seiner Entscheidungsfähigkeit. Damasio folgerte: „*[T]he cold-bloodedness of Elliot's reasoning prevented him from assigning different values of different options, and made his decision-making landscape hopelessly flat.*“⁹² Neben diesem besonderen Patienten, der dem Fall von *Phineas Gage*⁹³ sehr stark ähnelt, machte Damasio auch im Zuge von Glückspiel-Experimenten (Iowa Gambling Task) eine interessante Beobachtung.⁹⁴ Beim Vergleich von normalen Personen mit Patienten, bei denen eine Beschädigung des PFC vorlag, zeigte sich, dass die Patienten mit PFC-Schaden eine Veränderung der Gewinnwahrscheinlichkeit nicht wahrnahmen und im Ergebnis nicht in der Lage waren, gute Entscheidungen zu treffen. Gesunde Probanden berücksichtigten die Veränderung unbewusst nach einigen Spielen indem sie ihr Spielverhalten anpassten.

*LeDoux*⁹⁵ beschäftigte sich mit der Amygdala (Mandelkern). Dies gilt als ein wichtiges emotionales Bewertungssystem im Kopf. Er kam zu folgendem Ergebnis: „*Signale und Reize, die beispielsweise Furcht auslösen, werden direkt von der Amygdala verarbeitet und führen sofort zu Schreckensreaktionen des Körpers. Bewusstsein und Neocortex bekommen davon zunächst nichts mit.*“⁹⁶ Zeitlich verzögert erfolgt anschließend die Einschaltung des Großhirns. An Ratten untersuchte LeDoux zudem, was eine Entfernung der Amygdala bewirkt. Im Ergebnis trafen die Versuchstiere schlechte Entscheidungen, indem sie sich z.B. bedenkenlos einer Giftschlange näherten bzw. diese sogar in den Mund nahmen. Normalerweise stellt dies eine lebensbedrohliche Situation für die Ratten dar.

Im *Fazit der Erkenntnisse der beiden Forscher* kann festgehalten werden, dass Emotionen auch im vernünftigen Großhirn verarbeitet werden, der Einfluss des Unbewussten (Amygdala) auf das Bewusste (Neocortex) stärker ist als umgekehrt und dass Emotionen eine enorme Bedeutung im Rahmen von Entscheidungen zukommt. In Bezug auf ein realistisches Menschenbild kann herausgestellt werden, dass unbewusste Prozesse eine große Relevanz besitzen. Emotionen stellen zudem keine Störungen im Entscheidungsprozess dar, sondern im Gegenteil, ohne Emotionen sind keine guten Entscheidungen möglich. Da die Emotionsverarbeitung auch in Teilen des Neocortex stattfindet, ist die relativ simple Dreiteilung des Gehirns nicht län-

⁹² Damasio, A. R. (1994), S. 51

⁹³ vgl. ebenda, S. 3 ff.: Phineas Gage war 1848 Eisenbahnarbeiter und wurde während der Arbeit schwer am Kopf verletzt. Eine 1,10m lange und 3cm dicke Eisenstange durchbohrte seinen Schädel und zerstörte einen Teil des präfrontalen Cortex. Phineas Gage überlebte den Unfall, doch infolge der Schädigung verändert sich seine Persönlichkeit deutlich. Vorher als besonnen, freundlich und ausgeglichen bekannt, war Gage nach dem Unfall kindisch, impulsiv, unzuverlässig.

⁹⁴ vgl. Bechara, A.; Damasio, H.; Tranel, D.; Damasio, A. R. (1997)

⁹⁵ vgl. LeDoux, J. E. (1994); LeDoux, J. E. (1998); LeDoux, J. E. (1993); Häusel, H.-G. (2012b), S. 74

⁹⁶ Häusel, H.-G. (2012b), S. 74

ger haltbar. Generell muss auch von dem Verständnis eines vollständig rationalen Menschen Abstand genommen werden.

Mit Hilfe der unterschiedlichen neurowissenschaftlichen Erkenntnisse beruht Häusel's Weg zur Limbic-Map auf der Überzeugung, „... dass sich alle Entscheidungen im Wesentlichen aus dem Zusammenspiel der drei neurobiologischen Emotions- und Motivsysteme Dominanz, Balance und Stimulanz erklären“⁹⁷ lassen.

Der *Brand Code Management (BCM)-Ansatz* von Scheier⁹⁸ ist ein Ansatz zur systematischen Steuerung von Marken und Markenkommunikation, der sich auf den gesamten Markenführungsprozess bezieht. Zentral in Bezug auf das Verständnis von Marken ist hier zum einen die Einsicht, dass sie in Form von Netzwerken im Gehirn abgelegt sind, die dynamisch und daher veränderbar sind. Zum anderen beruht der Ansatz von Scheier auf der Annahme, dass Markennetzwerke aus der Ebene der Motive und der Ebene der Markenkontaktpunkte besteht. Zur Steuerung der Markenkontaktpunkte⁹⁹ verwendet Scheier sog. Codes, die die Verbindung zwischen dem Motivraum und den Markenkontaktpunkten darstellen.

Unter Codes versteht Scheier „mit kultureller Bedeutung aufgeladene Signale, welche den Kern einer Marke implizit codieren und transportieren.“¹⁰⁰ Scheier beschreibt vier grundlegende Codearten.¹⁰¹ *Sensorische Codes* umfassen alle Signale, die die Sinne stimulieren.¹⁰² *Episodische Codes* beziehen sich auf die erzählten Geschichten z.B. innerhalb eines Werbespots, über die ein konkreter Inhalt aus dem Motivraum übermittelt wird. Neben der konkreten Geschichte, die erzählt wird, beinhaltet der Kommunikationsprozess weitere Bedeutungsträger in Form von Symbolen. Als *symbolische Codes* können daher z.B. Protagonisten, verschiedene Gesten, aber auch Handlungsplätze und Markenlogos kategorisiert werden. Als letzte Codeart ist der *sprachliche Code* zu nennen. Hierbei konzentriert sich die Sicht auf geschriebene und gesagte Worte, also die sprachlichen Elemente einer Kommunikation.

In Bezug auf den bereits angesprochenen Motivraum ist anzumerken, dass dieser vergleichbar mit der *Limbic-Map* von Häusel ist und daher an dieser Stelle nicht explizit aufgeführt wird.¹⁰³ Im Unterschied zur Limbic-Map werden die drei Hauptachsen des Motivraums als Erregung, Autonomie und Sicherheit bezeichnet. Auch hier werden Mischformen zwischen den Hauptachsen berücksichtigt.

Letztlich zielt der Brand Code Management-Ansatz aus Sicht einer konkreten Marke darauf ab, jeden Markenkontaktpunkt nach Motivklassen und Codes zu analysieren. Aufbauend auf dem Analyseergebnis kann dann an jedem Kontaktpunkt die Bedeu-

⁹⁷ Häusel, H.-G. (2012b), S. 74

⁹⁸ vgl. Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 242 ff.; Scheier, C.; Held, D. (2012a), S. 173 ff.

⁹⁹ Als Markenkontaktpunkt kann jeder Berührungspunkt eines Konsumenten mit der Marke verstanden werden. Jegliche Form von Werbung, die Verpackung, ein Verkaufsstand und evtl. eine Filiale sind Beispiele für Markenkontaktpunkte.

¹⁰⁰ Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 242

¹⁰¹ vgl. Scheier, C.; Held, D. (2012a), S. 76 ff.

¹⁰² Hintergrundmusik ist ein Beispiel für einen sensorischen Reiz, je nach Kontaktpunkt kann z.B. auch Haptik ein Thema sein. Ebenso kann die Farbe Magenta i.V.m. der Deutschen Telekom als sensorischer Code verstanden werden.

¹⁰³ Scheier erkennt Häusel's Leistung in Bezug auf das Emotions-Gesamtmodell an.

tung des Markennetzwerkes stringent kommuniziert werden. Diese gezielte Kommunikation erfolgt über die Verwendung von Codes, die mit der inhaltlichen Ausrichtung der Marke in Bezug auf den Motivraum abgestimmt sind. Von entscheidender Bedeutung im Rahmen der Analyse ist der Einsatz von Verfahren, die die *implizite Bedeutung* fokussieren. Dies sind Verfahren wie z.B. reaktionszeitbasierte Verfahren, tiefenpsychologische Verfahren¹⁰⁴ oder auch Verfahren aus den Kulturwissenschaften wie die objektive Hermeneutik¹⁰⁵.

Für Scheier bestand die Motivation hinter dem Brand Code Management-Ansatz in einer Unzufriedenheit mit der gegenwärtigen Marketing- und Marktforschungspraxis. Für ihn existieren bereits seit längerem genügend Erkenntnisse aus verschiedenen Disziplinen, allerdings fehlte bisher das geeignete Instrument um eine Implementierung dieses Wissens zu gewährleisten. Ähnlich wie bei Häusel sind auch bei Scheier mehrere Ansatzpunkte zu erkennen, an denen allgemein interdisziplinäres aber auch speziell neurowissenschaftliches Wissen in den eigenen Ansatz einfließt. Seine Bewertung unzureichender Praxisanwendungen kommt besonders in der kritischen Auseinandersetzung mit vier bislang geltenden Marketingparadigmen zum Ausdruck. Das weitverbreitete *Hemisphären-Modell* beschreibt das erste zur Diskussion stehende Paradigma. Hierunter versteht man die Zweiteilung des Gehirns in den linken rationalen Teil und den rechten emotionalen Teil. Der Ursprung dieses Modells besteht in Untersuchungen mit Personen, die einen durchtrennten Corpus Callosum (Balken) aufwiesen, sog. Split-Brain-Patienten.¹⁰⁶ Die Probanden konnten bspw. keine Informationen lesen, die in ihrer linken Gesichtshälfte präsentiert wurden. Da die kontralaterale Verarbeitung eingehender sensorischer Reize¹⁰⁷ zu dieser Zeit bereits bekannt war, und Lesen einen rationalen Prozess darstellt, folgerte man aus dieser Beobachtung, dass Lesen nicht mit der rechten Gehirnhälfte zusammenhängt, sondern exklusiv linksseitig verortet ist. Gerade der Corpus Callosum, der mit über 200 Mio. Nervenfasern eine starke Verbindung zwischen den beiden Gehirnhälften herstellt¹⁰⁸, fehlte allerdings im Fall der untersuchten Split-Brain-Patienten. Im Ergebnis sind beide Gehirnhälften als rational, im Sinne von kognitiv, und ebenso als emotional zu bezeichnen. Die anfänglich beschriebene Zweiteilung ist wissenschaftlich nicht haltbar und somit auch für die Praxis wenig hilfreich, da man von einem Gegensatz ausgeht, den es im Gehirn nicht gibt. „*Tatsächlich ist jedoch das Hemisphären-*

¹⁰⁴ Hierzu zählen verschiedene Verfahren wie bspw. projektive Verfahren, die an den grundlegenden, treibenden aber unterbewussten Bedürfnisstrukturen interessiert sind.

¹⁰⁵ Hierbei geht es nicht darum, den vom Autor gemeinten Sinn nachzuvollziehen, sondern den latenten (also unbewussten) Sinn eines Kommunikationsmittels herauszustellen. Man ist folglich an der objektiven (also der empfängerbezogenen) Bedeutung interessiert.

¹⁰⁶ vgl. Gazzaniga, M. S.; Bogen, J. E.; Sperry, R. W. (1965); LeDoux, J. E.; Wilson, D. H.; Gazzaniga, M. S. (1977)

¹⁰⁷ Unter kontralateraler Verarbeitung versteht man die auf das Gehirn bezogene rechtsseitige Verarbeitung von sensorischen Reizen, die an der linken Körperseite entstehen und umgekehrt. Alles was mit dem linken Auge gesehen wird, wird im Endeffekt auf die rechte Gehirnhälfte bzw. rechte Seite des visuellen Cortex projiziert. Dasselbe gilt für taktile Erfahrungen. Erfolgt eine Stimulierung des rechten Armes, so findet man eine linksseitige Aktivierung im somatosensorischen Cortex.

¹⁰⁸ vgl. <http://dasgehirn.info/entdecken/anatomie/das-corpus-callosum/> (abgerufen am 02.06.2014)

*Modell integraler Teil des modernen Marketings und zieht sich bis zur täglichen Diskussion, ob der Kunde sachlich-rational und textlastig oder emotional und bildhaft angesprochen werden soll.*¹⁰⁹

Eine weiteres Paradigma, das Scheier kritisch bewertet, ist das *AIDA-Modell*¹¹⁰. Dieses Werbewirkungsmodell beruht auf der Annahme, dass ohne bewusste Aufmerksamkeit keine Wirkung entsteht. Es beschreibt die Werbewirkung als eine lineare Abfolge der Prozesse A(ttention), I(nterest), D(esire) und A(ction)¹¹¹. Folgt man diesem Modell, so kann Marketing als Kampf um die Aufmerksamkeit des Konsumenten beschrieben werden. Im Zuge dieses Wettstreits kommt es häufig zum Einsatz sog. Aufmerksamkeitswaffen.¹¹² Diese sollen vor allem Aufmerksamkeit auslösen, haben allerdings in den meisten Fällen nichts mit der beworbenen Marke zu tun und stören dadurch die Kommunikationswirkung. Das AIDA-Modell wird meistens als veraltet und vereinfacht beschrieben und in diesem Sinne als unzureichend beurteilt. In der Praxis findet es sich allerdings an vielen Stellen wieder. Untersuchungen aus verschiedenen Bereichen zeigen, „... dass Signale (...) auch dann wirken, wenn sie nicht explizit und bewusst gesehen werden, weil sie etwa nur peripher oder nebenbei (low involvement) verarbeitet werden. Das Gehirn verarbeitet beispielsweise Reize am Bildschirmrand auch dann, wenn Probanden die Mitte des Bildschirms fixieren.“¹¹³ Ohne das periphere Sehen, welches einem unbewussten Abtastprozess ähnelt, könnte das Gehirn nicht entscheiden, worauf sich die Aufmerksamkeit als nächstes richten soll. Über unterschiedliche Untersuchungsergebnisse konnte die Bedeutung der unbewussten Prozesse herausgestellt werden. Die Orientierung am AIDA-Modell ist folglich nicht zu empfehlen, dennoch ist es in der Praxis immer noch häufig Grundlage verschiedener Pretestverfahren.

Auch in der Vorstellung, dass *Kommunikations- bzw. Werbewirkung nur i.V.m. Erinnerung* besteht, sieht Scheier einen weiteren Diskussionspunkt. Er vertritt die Position, dass Signale auch dann wirken können, wenn sie nicht explizit erinnert werden. Als anschauliches Beispiel für seine Ansicht führt Scheier eine TV-Kampagne der Foodmarke Amoy, *Straight to the Wok (STW)*¹¹⁴, an.¹¹⁵ Als der TV-Spot hinsichtlich ungestützter und gestützter Werbeerinnerung getestet wurde, schnitt dieser mit 15% bzw. 20% katastrophal ab. Nach der Ausstrahlung des Werbespots zeigte sich allerdings ein anderes Bild. Der Verkauf stieg signifikant um 17% an, und zwar nach jeder Ausstrahlung. Infolge der Ausstrahlungen konnten zudem auch Markenkern und Markenbekanntheit gesteigert werden. „Die Zahlen zeigen, dass die Zielgruppe etwas über die Marke bzw. das Produkt gelernt hat, nur der Zugriff auf die Quelle (den

¹⁰⁹ Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 233

¹¹⁰ vgl. Strong, E. K. (1925): Das AIDA-Modell geht auf E. St. Elmo Lewis (1898) zurück; Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 233

¹¹¹ 1. Aufmerksamkeit, 2. Interesse, 3. Drang, 4. Handlung

¹¹² Darunter versteht man bspw. den Einsatz von Prominenten, das Werben mit Sex und auch das Brechen von Tabus.

¹¹³ Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 233

¹¹⁴ Im Zuge des TV-Spots wird die Zubereitung eines Nudelgerichts (STW-Nudeln) im Wok in Zeitlupe gezeigt. Die Kernbotschaft des Spots besteht in der Aussage, dass man mit Hilfe von STW-Nudeln so schnell lecker kochen kann, dass man den Prozess in Zeitlupe darstellen muss.

¹¹⁵ vgl. Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 234

*Spot) ging verloren.*¹¹⁶ Scheier argumentiert mit der sog. *Quellenamnesie*¹¹⁷. Diese bezeichnet das Phänomen, dass man sich an etwas erinnert, aber nicht mehr weiß, woher das Wissen stammt. Die Möglichkeit einer Quellenamnesie ergibt sich durch die separate Abspeicherung von gelernten Inhalten und der jeweiligen Quelle des Wissens. Im semantischen Gedächtnis werden die Inhalte abgespeichert, im episodischen Gedächtnis die jeweiligen Quellen. Im Ergebnis weiß bspw. jeder, dass eins plus eins zwei ergibt, doch wann und von wem man dies konkret gelernt hat, daran kann man sich i.d.R. nicht mehr erinnern. *„Werbung ist also um ein Vielfaches wirksamer, als die üblichen Umfragen und Studien (z.B. Recall- bzw. Awareness-Messungen in Trackings) nahe legen.“*¹¹⁸

Das letzte Paradigma, das Scheier thematisiert, ist das sog. *Relevant Set*¹¹⁹. Dieses Paradigma beinhaltet die Aussage, dass i.V.m. einer konkreten Produktkategorie, die theoretisch aus allen verfügbaren Produkte bzw. Marken gebildet wird, ein für die Kaufentscheidung relevanter Bereich und ein irrelevanter Bereich existiert. Innerhalb des relevanten Bereiches lassen sich die Produkte anhand ihrer Relevanz ordnen, was zur Vorstellung einer kontinuierlichen Reihenfolge führt. Diese Vorstellung zählt zum festen Bestandteil der Markentheorie. *„Kommunikation hat das Ziel, unser Produkt oder unsere Marke in der Einkaufsliste stetig nach oben zu bringen.“*¹²⁰ Da die meisten Instrumente zur Erfolgsmessung von Werbekampagnen auf dem Gedanken des Relevant Set beruhen, geht es folglich um die Verbesserung des Rangplatzes im Kopf. Durch die aktuelle Forschung wird die Annahme einer kontinuierlichen Rangordnung allerdings stark in Frage gestellt. Hiernach gibt es nur zwei Plätze im Kopf des Konsumenten, Platz 1 und den Rest. Anders ausgedrückt besteht ein viel größerer Unterschied zwischen Platz 1 und dem Rest als unter den restlichen Alternativen. Dies wird auch als *Winner-Take-All-Effekt*¹²¹ bezeichnet. Es spielt folglich eine viel unbedeutendere Rolle, ob eine Marke an zweiter oder dritter Position liegt. *„Anstatt also zu versuchen mit vielen Werbekontakten den Rangplatz in den Köpfen vieler Konsumenten um einen Platz zu verbessern, scheint es aussichtsreicher, mit wenigen gezielten Kontakten diejenigen zu überzeugen, bei denen die Chance auf den ersten Platz besteht.“*¹²²

Im Sinne eines Fundaments des Brand Code Management-Ansatzes ist neben den bereits beschriebenen Positionen die *Fokussierung auf das Unbewusste bzw. die Macht der impliziten Verarbeitungsprozesse* herauszustellen.¹²³ Auch an dieser Stelle zeigt sich, wie das bereits bestehende Wissen in die Ausgestaltung des Ansatzes einfließt. Zentral für den Ansatz von Scheier ist die Erkenntnis, dass im Gehirn zwei von Grund auf verschiedene Systeme existieren. Zum einen gibt es den sog. *Piloten*, der auch *System 2* bzw. *explizites System* genannt wird. *„Der Pilot enthält alle Emo-*

¹¹⁶ Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 234

¹¹⁷ vgl. Schacter, D. L.; Harbluk, J. L.; McLachlan, D. R. (1984); Shimamura, A. P.; Squire, L. R. (1987)

¹¹⁸ Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 234

¹¹⁹ vgl. Runia, P.; Wahl, F.; Geyer, O.; Thewissen, C. (2011), S. 47 ff.

¹²⁰ Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 234 f.

¹²¹ vgl. Deepe, M.; Schwindt, W.; Kugel, H.; Plassmann, H.; Kenning, P. (2005)

¹²² Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 235

¹²³ vgl. Scheier, C.; Held, D. (2012a), S. 59 ff.

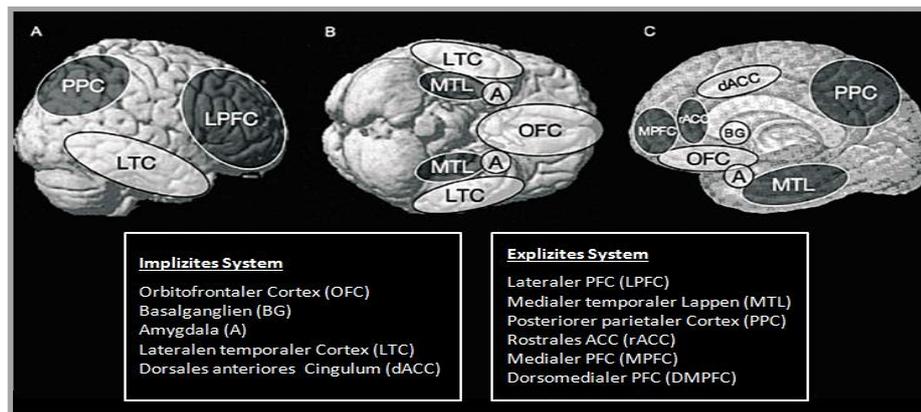


Abbildung 7: Implizites und explizites System auf neuronaler Ebene¹²⁸

Im Resümee steht für Scheier fest: „Die Bedeutung des impliziten Systems - des unbewussten Autopiloten im Kopf - wurde lange unterschätzt, heute jedoch ist klar: Dieses System ist entscheidend für Verhalten, seine Bedeutung für das Marketing ist enorm.“¹²⁹ I.V.m. Markenkommunikation, wie bei jeglicher Informationsverarbeitung, wird folglich der Großteil der Informationen bzw. Signale implizit verarbeitet. In Form des Brand Code Management-Ansatzes trägt Scheier dieser Überzeugung Rechnung, indem die implizite Kommunikation in den Fokus gerückt wird und über den Einsatz geeigneter Verfahren¹³⁰ analysiert und gesteuert wird.

Sowohl die Limbic-Map als auch das Brand Code Management sind gute Beispiele für das Neuromarketing im weiteren Sinne. Durch die Ausführungen sollte deutlich werden, dass beide Ansätze neurowissenschaftliche und weitere interdisziplinäre Erkenntnisse jeweils auf ihre eigene Art berücksichtigen. Dieser Einfluss ist sowohl im ansatzbezogenen Grundlagenbereich¹³¹ wie auch im speziellen Schwerpunktbereich¹³² zu erkennen. Inhaltlich erlauben beiden Ansätze mit Hilfe des bestehenden interdisziplinären Wissens eine neue bzw. andere Sicht auf die Dinge und ermöglichen dadurch eine detailliertere Vorgehensweise. Im Ergebnis können durch beide Ansätze instrumentenbezogene und auch strategiebezogene Implikationen abgeleitet werden. Abschließend bleibt festzuhalten, dass die aus den beschriebenen Überlegungen und Ansichten entstandenen Ansätze selbst keine neurophysiologischen Verfahren einsetzen, um zu praxisbezogenen Implikationen zu gelangen.

2.2.2.2 Neuromarketing im engeren Sinne

Nachdem bereits die generellen Unterschiede zwischen dem weiteren und engeren Verständnis des Neuromarketingbegriffs herausgestellt wurden und im vorangegangenen Unterkapitel über die Auseinandersetzung mit der Limbic-Map und dem Brand Code Management-Ansatz spezieller auf die weitere Sicht eingegangen wurde, wer-

¹²⁸ angelehnt an: Scheier, C., Held, D. (2012b), S. 116

¹²⁹ Scheier, C.; Held, D. (2008), S. 237

¹³⁰ Es erfolgt ein Rückgriff auf Verfahren aus unterschiedlichen Disziplinen. Neurophysiologische Verfahren finden allerdings im Zuge des Brand Code Management-Ansatzes keine Anwendung.

¹³¹ Häusel: Paradigmawechsel bzw. emotionale Wende; Scheier: vier Marketing-Paradigmen

¹³² Häusel: Emotionssysteme; Scheier: implizites System bzw. implizite Informationsverarbeitung

den nachfolgend einige bekannte fMRT-Studien mit ihren Ergebnissen aufgearbeitet, um den Leser für das Neuromarketing im engeren Sinne zu sensibilisieren. Diese Darstellung ist nicht erschöpfend und greift lediglich einige Beispiele heraus, die im Laufe der Zeit entstanden sind. Anzumerken ist, dass jede fMRT-Untersuchung über einen fundierten theoretischen Teil verfügt, der i.d.R. in der Ableitung von Hypothesen mündet. Da hier zunächst ein Überblick über verschiedene Studien geben werden soll, werden die studienbezogenen theoretischen Einzelheiten an dieser Stelle in den Hintergrund gerückt. Im Zuge der eigenen fMRT-Untersuchung¹³³ wird dieser wichtige Teil an einem konkreten Beispiel ausführlich dargestellt. Im Rahmen des Neuromarketings im engeren Sinne werden explizit apparative Verfahren der Neurowissenschaften eingesetzt, um über die Erfassung der Gehirnaktivität Rückschlüsse auf die Wirkung verschiedener Marketinginstrumente und auf die zugrunde liegenden Prozesse im Rahmen von Kaufentscheidungen zu ziehen. Die Darstellung konzentriert sich auf fMRT-Studien, da sich dieses Messverfahren zum einen, aufgrund seiner Vorzüge als dominantes Instrument durchgesetzt hat. Zum anderen besteht das Anliegen der vorliegenden Arbeit gerade in der kritischen Betrachtung des Neuromarketings im engeren Sinne mit einem konkreten Bezug zum Verfahren der fMRT.

*Erk et al.*¹³⁴ beschäftigten sich mit den neuronalen Eigenschaften von kulturellen Objekten, die mit Wohlstand und sozialer Dominanz assoziiert werden. Im Rahmen der Untersuchung wurden frontale Abbildungen von Sportwagen, Limousinen und Kleinwagen verwendet, um unterschiedliche Ausprägungen hinsichtlich der kulturellen Wertigkeit darzustellen. Im Kern wurde vermutet, dass Sportwagen im Gegensatz zu den anderen Autotypen soziale Verstärker repräsentieren, was zu einer erhöhten Aktivierung des Belohnungssystems führen sollte. Zur Überprüfung der Hypothese wurden im MR-Scanner liegende Männer darum gebeten, für die unterschiedlichen Autos Attraktivitätsbeurteilungen auf einer 5-stufigen Skala abzugeben.

Im Ergebnis konnte in Bezug auf die Aufgabenstellung zunächst einmal herausgestellt werden, dass die Sportwagen signifikant attraktiver wahrgenommen wurden als die anderen Autos. Hinsichtlich der neuronalen Perspektive zeigten sich vor allem beim Vergleich zwischen Sportwagen und Kleinwagen signifikante Aktivierungsunterschiede. Sportwagen erzeugen vor allem eine stärkere Aktivierung im ventralen Striatum (VS) und im orbitofrontalen Cortex (OFC). Beide Strukturen zählen zum Belohnungssystem und werden unter anderem mit Belohnungsantizipation bzw. potenziell belohnenden Reizen verbunden. Ein weiteres interessantes Ergebnis hinsichtlich der Wahrnehmung von Sportwagen bestand in einer erhöhten Aktivierung des fusiformen Gyrus, einer Gehirnregion, die auf die Verarbeitung von Gesichtern spezialisiert ist. Die Autoren schließen daraus, dass „... cars are processed in a similar way to faces. Evidence for this suggestion comes from the fact that nearly all subjects described the headlights of the cars as eye-like with the cars facing the observer. If this is true, one might expect that attractive cars seen from the back or the side would not elicit activation in the ventral striatum. An interesting observation support-

¹³³ vgl. Kapitel 6 Eine fMRT-Studie zur Wirkung von Sonderangebotssignalen bei Kaufentscheidungen

¹³⁴ vgl. Erk, S.; Spitzer, M.; Wunderlich, A. P.; Galley, L.; Walter, H. (2002)

*ing our suggestion is the activation of the fusiform face area [...], especially by attractive cars in our study.*¹³⁵ Im Fazit der Studie kann festgehalten werden, dass unterschiedliche Autotypen unterschiedlich verarbeitet werden.

*McClure et al.*¹³⁶ setzten sich mit der Frage nach dem Einfluss kultureller Informationen auf die Präferenzbildung auseinander. Zur Bearbeitung der Fragestellung verglichen sie die Präferenz in Bezug auf die Getränke Coca-Cola und Pepsi. Dieser Vergleich bot sich an, da beide Getränke hinsichtlich der Inhaltsstoffe fast identisch sind und sich hauptsächlich durch die Marke unterscheiden. Konkret interessierte sie, welche Gehirnareale stärker aktiviert sind, wenn Wissen über eine Produktmarke vorhanden ist im Vergleich zur Situation, in der keine Markeninformation gegeben ist. Im Zuge dieser fMRT-Studie wurden den Probanden je nach Gruppenzugehörigkeit unterschiedliche visuelle Reize (rotes bzw. gelbes Licht, Coca-Cola-Dose oder Pepsi-Dose) gezeigt, auf die zeitverzögert eine Getränkezufuhr folgte. Diese systematische Zufuhr von Coca-Cola bzw. Pepsi wurde über ein Pumpsystem realisiert. Es gab vier Gruppen. Zwei Gruppen stellten sich einem Blindtest, d.h. sie wurden nicht mit Markeninformationen konfrontiert, sondern tranken nacheinander zwei Getränke (vorher sahen sie jeweils entweder ein gelbes oder ein rotes Licht) und trafen anschließend eine Auswahlentscheidung bezüglich ihrer Präferenz. Den Teilnehmern war bekannt, dass einmal Coca-Cola und das andere Mal Pepsi verabreicht wurde. Sie wussten allerdings nicht wann. Gruppe 3 stellte den semianonymen Test für Coca-Cola dar. Die Probanden sahen zum einen eine Abbildung der Marke Coca-Cola und bekamen anschließend einen Schluck Coca-Cola. Die zweite Getränkezufuhr erfolgte ohne Markeninformation, anstatt einer Marke kündigte hier ein gelber Lichtreiz die Verabreichung einer kleinen Getränkemenge an. Hierbei konnte es sich entweder um Coca-Cola oder um Pepsi handeln. Es konnte also durchaus sein, dass sich hinter dem zweiten Getränk ebenfalls Coca-Cola verbirgt. Anschließend musste auch in diesem Fall eine Präferenzentscheidung getroffen werden. Die vierte Gruppe ist vergleichbar mit Gruppe 3, da hier nicht die Marke Coca-Cola eingeblendet wurde, sondern Pepsi. Es handelte sich folglich um den semianonymen Test für Pepsi. Als letztes ist zum Design anzumerken, dass es sowohl eine Trainings- wie auch eine Testphase gab. Zunächst wurde jede Gruppe darauf trainiert, dass ein bestimmter Reiz eingeblendet wird und nach 6s die Getränkezufuhr erfolgte. Im Rahmen der Testphase wurde das Getränk allerdings erst nach 10s verabreicht. Auf diese Weise antizipierten die Probanden bereits nach 6s die Reaktion auf ein konkretes visuelles Signal, also bspw. Coca-Cola nachdem eine Coca-Cola-Dose eingeblendet wurde und Pepsi im Falle einer Pepsi-Dose.

Im Blindtest ergab sich in Bezug auf die Präferenzentscheidung ein ausgeglichenes Bild hinsichtlich der Entscheidung für Coca-Cola oder Pepsi. Bei der konkreten Präferenzentscheidung konnte eine Aktivierung des ventromedialen präfrontalen Cortex (VMPFC) herausgestellt werden, der auch in Verbindung zur Verarbeitung sensorischer Informationen steht. „*This area of the brain is strongly implicated in signaling*

¹³⁵ Erk, S. et al. (2002), S. 2501

¹³⁶ vgl. McClure, S. M.; Li, J.; Tomlin, D.; Cypert, K. S.; Montague, L. M.; Montague, P. R. (2004)

*basic appetitive aspects of reward.*¹³⁷ Bei Gruppe 3, dem semianonymen Test für Coca-Cola, fiel die Präferenzentscheidung deutlich zu Gunsten der mit der Coca-Cola-Dose angekündigten Möglichkeit aus. Auf neuronaler Ebene konnten für die Marke Coca-Cola mehrere Aktivierungen berichtet werden. Es handelt sich hierbei um Gehirnstrukturen, die mit Emotionen, Belohnung, aber auch mit dem Abruf von Markenwissen verbunden werden. Hinsichtlich Gruppe 4, dem semianonymen Test für Pepsi, konnte kein signifikanter Unterschied beim Vergleich der Auswahlentscheidung zwischen Getränken, die als Pepsi gelabelt waren, und Getränken, die ohne konkrete Markeninformation zugeführt wurden, berichtet werden. Des Weiteren ergaben sich auf der neuronalen Ebene keine signifikanten Aktivierungen bezüglich der Marke Pepsi. Im Ergebnis zeigte diese Studie die neuronalen Eigenschaften einer starken Marke bzw. den Unterschied zwischen starken und schwachen Marken auf. Starke Marken sind in der Lage stark zu emotionalisieren und stellen insofern Belohnungen dar. McClure et al. ziehen folgendes Fazit: *„However, in the case of Coke and Pepsi, sensory information plays only a part in determining people’s behavior. Indeed, brand knowledge (at least in the case of Coke in our study) biases preference decisions and recruits the hippocampus, DLPFC, and midbrain. Our results suggest that the VMPFC and hippocampus/DLPFC/midbrain might function independently to bias preferences based on sensory and cultural information, respectively. Coke and Pepsi are special in that, while they have very similar chemical composition, people maintain strong behavioral preferences for one over the other.*¹³⁸

Deepe et al.¹³⁹ untersuchten genau wie McClure et al.¹⁴⁰ den Einfluss der Marke auf Kaufentscheidungen. Beide Untersuchungen lagen zeitlich nah beieinander und bearbeiteten im Kern dieselbe Fragestellung¹⁴¹. Im Ergebnis können Deepe et al. zum einen die Ergebnisse von McClure et al. unterstützten, zum anderen aber auch ein tieferes Verständnis hinsichtlich der Fragestellung erreichen.

Für die fMRT-Untersuchung wurden zwei Gruppen mit jeweils unterschiedlichen Stimuli konfrontiert. Gruppe 1 bestand nur aus Frauen, Gruppe 2 nur aus Männern. Die Frauengruppe wurde mit Auswahlentscheidungen konfrontiert, die jeweils zwei Marken beinhalteten. Ihre Aufgabe war es, eine mentale Kaufentscheidung hinsichtlich der dargebotenen zwei Marken zu treffen. Dasselbe galt auch für die Männergruppe. Der Unterschied zwischen beiden Gruppen bestand lediglich im Stimulusmaterial. Während die Frauen zwischen unterschiedliche Kaffeemarken wählen sollten, wurden die Männer mit unterschiedlichen Biermarken konfrontiert. Die beiden geschlechtsbezogenen Produkte boten sich, wie auch Coca-Cola und Pepsi bei McClure

¹³⁷ McClure, S. M. et al. (2004), S. 384

¹³⁸ ebenda, S. 383 f.

¹³⁹ vgl. Deepe, M. et al. (2005)

¹⁴⁰ vgl. McClure, S. M. et al. (2004)

¹⁴¹ Es ist durchaus denkbar, dass zwei Forschungsgruppen parallel und unabhängig an derselben Fragestellungen arbeiten. Dies ist eine äußerst interessante Situation, da auf der einen Seite eine zeitlich nahe Replikation ein Forschungsergebnis bekräftigen kann. Auf der anderen Seite können durch unterschiedliche Ergebnisse entweder inhaltliche oder methodische Probleme i.V.m. den Untersuchungen aufgedeckt werden oder aber ein tieferes Verständnis i.V.m. der generellen Fragestellung erreicht werden.

re et al., vor allem dadurch an, dass die einzelnen Kaffee- und Biersorten anhand ihrer Inhaltsstoffe keine gravierenden Unterschiede aufweisen. Das zentrale Auswahlkriterium liegt folglich in der Marke bzw. dem Brand. Der gravierende Unterschied zur Untersuchung von McClure et al. besteht in der Berücksichtigung der Lieblingsmarke. Während McClure et al. dies nicht explizit abgefragt hatten, konnte diese Information im Rahmen der Analyse von Deepe et al. mit in die Betrachtung einfließen. Durch diese zusätzliche Information konnte im Zuge der Analyse ein TD-DD-Design verwendet werden. Hierbei liegen zwei experimentelle Bedingungen vor. Zum einen gibt es Stimuli, die die Lieblingsmarke (target) im Rahmen einer Kaufentscheidung einer anderen Marke (diverse) gegenüberstellen. Dies ist der TD-Fall. Zum anderen kann eine Kaufentscheidung auch dadurch charakterisiert werden, dass keine der beiden angebotenen Marken die Lieblingsmarke repräsentiert (2x diverse). Dies ist der DD-Fall. Aufgrund des TD-DD-Designs können die signifikanten Aktivierungen i.V.m. der Lieblingsmarke herausgestellt werden.

Die Ergebnisse von Deepe et al. decken sich insofern mit denen von McClure et al., dass auch sie für die Lieblingsmarke eine erhöhte Aktivierungen in Bereichen feststellten, die mit der Emotionsverarbeitung und Belohnung verbunden werden. Lieblingsmarken sind per Definition starke Marken und sollten daher nachvollziehbarerweise ein ähnliches neuronales Aktivierungsmuster aufweisen wie starke Marken (z.B. Coca-Cola bei McClure et al.). Die Untersuchung von Deepe et al. brachte aber auch tiefere Erkenntnisse hinsichtlich der Kaufentscheidung mit sich. Im Falle der Lieblingsmarke konnten neben den signifikanten Aktivierungen auch signifikante Deaktivierungen berichtet werden. Es handelte sich um Bereiche, die mit dem Arbeitsgedächtnis, Planung und allgemeinen Denkprozessen assoziiert werden. Diese Regionen bzw. kognitiven Prozesse wurden quasi durch die Anwesenheit der Lieblingsmarke unterdrückt und durch die starken Emotionen, die zusätzlich das Bild der Lieblingsmarke zeichnen, dominiert. Die beobachteten Deaktivierungen wurden mit dem Begriff der kortikalen Entlastung belegt, der mit vielen theoretischen Überlegungen im Einklang steht. Unter dem *Winner-Take-All-Effekt* bzw. *First-Choice-Brand-Effekt* versteht man diesen deutlichen neuronalen Unterschied zwischen der Lieblingsmarke und allen anderen Marken eines Produktbereichs. In Bezug auf die Kaufentscheidung erfolgt im Falle der Lieblingsmarke eine Komplexitätsreduktion. Die Reduktion ist gekennzeichnet durch eine Unterdrückung verschiedener kognitiver Prozesse und einer relativ schnellen emotionalen Entscheidung zu Gunsten der Lieblingsmarke. Herauszustellen ist, dass die beschriebene kortikale Entlastung nur i.V.m. der Lieblingsmarke gefunden werden konnte.

*Plassmann, Kenning & Ahlert*¹⁴² führten eine fMRT-Untersuchung durch, um die neuronale Basis von Kundenloyalität zu erforschen. Vor dem Hintergrund, dass loyale Kunden ein Vielfaches des Umsatzes von disloyalen Konsumenten generieren, wollten sie wissen, was loyale von disloyalen Kunden neuronal unterscheidet.

¹⁴² vgl. Plassmann, H.; Kenning, P.; Ahlert, D. (2007)

In Bezug zur Fragestellungen konnten die Forscher auf die Kundendaten eines großen Kaufhauses aus dem Textileinzelhandel zurückgreifen und auf diese Weise loyale (A-Kunden) und disloyale Kunden (C-Kunden) identifizieren. Für eine entsprechende Kategorisierung musste eine Person bestimmte Kriterien für die letzten 6 Monate erfüllt haben. Als A-Kunde galt eine Person, wenn sie monatlich 250€ oder mehr beim Händler ausgab und zudem mindestens fünf Mal in einem Monat beim Händler einkaufen ging. Die Personen, die im Monat höchstens 50€ beim Händler ausgaben und höchstens ein Mal pro Monat shoppen gingen, wurden als C-Kunden kategorisiert. Wie bei Deepe et al.¹⁴³ wurde auch hier mit dem TD-DD-Design gearbeitet. Als Target (T) galt der Brand des Auftraggebers, auf dessen Kundendaten sich die Kunden-Kategorisierung bezog. Als Diverse (D) wurden drei andere Brands verwendet. Den Probanden wurden wiederholt neutrale Kleidungsstücke zum Kauf angeboten. Innerhalb jedes Kaufangebotes mussten die Probanden entscheiden, bei welchem der zwei zur Auswahl stehenden Händler sie das Kleidungsstück lieber kaufen würden. Das Stimulusmaterial bestand folglich aus mehreren TD- und DD-Stimuli.

Die stärkste Aktivierung lag bei A-Kunden im Striatum vor. Zudem fanden sich noch weitere Aktivierungen im ventromedialen präfrontalen Cortex (VMPFC) und im anterioren cingulären Cortex (ACC). Diese Aktivierung stimmen mit den Aktivierungen hinsichtlich des First-Choice-Brand-Effektes in der Studie von Deepe et al. überein. „Deepe et al. described the network as an emotion-based and self-referencing information processing mode during brand choice.“¹⁴⁴ Wie dieses Ergebnis zeigt, sollte es bei der Kundenbindung vor allem darum gehen, eine emotionale Bindung zum Unternehmen bzw. zum Brand zu erreichen. Dies kann nach Meinung der Forscher eher über personalisierte Anschreiben und emotionale Events erreicht werden, als durch das Anbieten spezieller Hard- oder Software i.V.m. dem betreffenden Unternehmen.

Kenning et al.¹⁴⁵ interessierten sich im Rahmen ihrer Forschung für die Frage, wie Werbung im Gehirn verarbeitet wird. Sie wollten aufdecken, welches neuronale Aktivierungsmuster attraktiver Print-Werbung zugrunde liegt. Sie gingen davon aus, dass die wahrgenommene Attraktivität einer Anzeige mit einer erhöhten Aktivierung in visuellen Regionen einhergeht. Zudem vermuteten sie eine erhöhte Aktivierung in Gehirnstrukturen, die mit der Emotionsverarbeitung und Belohnung zusammenhängen. Das Stimulusmaterial bestand aus 10 attraktiven, 10 neutralen und 10 unattraktiven Anzeigen, die von den Probanden mehrmals in Bezug auf die empfundene Attraktivität beurteilt werden sollten.

In Bezug zu attraktiven Anzeigen konnten verschiedene Aktivierungen gemeldet werden, die im Endeffekt die aufgestellten Hypothesen unterstützten. In Bezug zur Hypothese, die eine erhöhte Aktivierung in visuellen Arealen aufgrund der erhöhten visuellen Aufmerksamkeit bzw. Attraktivität vermutete, ist anzumerken, dass auch

¹⁴³ vgl. Deepe, M. et al. (2005)

¹⁴⁴ Plassmann, H.; Kenning, P.; Ahlert, D. (2007), S. 737

¹⁴⁵ vgl. Kenning, P.; Plassmann, H.; Kugel, H.; Schwindt, W.; Pieper, A.; Deppe, M. (2007)

eine erhöhte Aktivierung im fusiformen Gyrus berichtet wurde. Diese Aktivierung könnte auf der einen Seite die Hypothese stützen, auf der anderen Seite könnte sie aber auch auf die Anwesenheit von Gesichtern zurückzuführen sein. Bei den attraktiven Anzeigen war auf fünf Stimuli ein positiver Gesichtsausdruck vorhanden, bezogen auf die unattraktiven Anzeigen lagen nur zwei Gesichter vor. Kenning et al. kommen zu folgendem Ergebnis: „*As hypothesized, one key finding of our study was that perceived ad attractiveness correlated with activations in brain areas that are a) part of the brain's reward system and b) involved in emotional processing.*“¹⁴⁶ Die Forscher schließen daraus, dass „*[a]ttractive ads can act as rewarding stimuli.*“¹⁴⁷

Plassmann et al.¹⁴⁸ setzten sich mit den Mechanismen des Marketings auseinander, die in der Lage sind, Entscheidungen zu beeinflussen. Konkret betrachteten sie, in Bezug auf das Produkt Wein, den Einfluss des Preises als nicht intrinsische Eigenschaft des Weines auf die erfahrene Zufriedenheit bzw. die Genusswahrnehmung¹⁴⁹. Die Relevanz des Themas ergibt sich aus der folgenden Aussage: „*This type of influence is valuable for companies, because EP serves as a learning signal that is used by the brain to guide future choices.*“¹⁵⁰ Um den Einfluss einer Preisvariation herauszustellen, wurden Probanden im Zuge eines fMRT-Experiments, wie bei McClure et al.¹⁵¹ mit Hilfe eines Pumpsystems, mit unterschiedlichen Weinen konfrontiert und dazu aufgefordert, ihre erfahrene Zufriedenheit und die Geschmacksintensität zu beurteilen. Die Probanden dachten, dass sie wiederholt fünf verschiedene Cabernet Sauvignons trinken sollten, um zu untersuchen, wie lange eine Geschmacksbeurteilung dauert und dass die unterschiedlichen Weine durch den Verkaufspreis identifiziert werden. In Wirklichkeit bestand die kritische Manipulation darin, dass zwei Weine mit jeweils zwei unterschiedlichen Preisen verabreicht wurden. Es handelt sich in diesem Fall faktisch zweimal um denselben Wein, nur dass dieser sowohl mit einem niedrigeren Preis als auch mit einem höheren Preis präsentiert wurde. Im Zuge des Experiments wurden insgesamt drei unterschiedliche Weine verwendet. Wein 1 wurde sowohl zu seinem normalen Verkaufspreis (\$5) als auch zu einem höheren Preis (\$45) angeboten. Wein 2 wurde mit einer \$90- (normaler Verkaufspreis) und einer \$10-Preisetikettierung verabreicht. Der dritte Wein hatte einen Verkaufspreis von \$35 und wurde nur in dieser Form eingesetzt.

Bei der Beurteilung der erfahrenen Zufriedenheit konnte sowohl für Wein 1 (normaler Verkaufspreis \$5) als auch für Wein 2 (normaler Verkaufspreis \$90) ein signifikanter Unterschied zwischen der höheren und niedrigeren Preisauszeichnung festgestellt werden. Der Wein mit dem höheren Preis führte in beiden Fällen zu einer höheren Zufriedenheit. Hinsichtlich der Geschmacksintensität konnte kein signifikanter Unterschied berichtet werden. Für beide Weine ergab sich auf neuronaler Ebene i.V.m. dem teureren Wein eine erhöhte Aktivierung des bilateralen medialen orbitofrontalen

¹⁴⁶ Kenning, P. et al. (2007), S. 295

¹⁴⁷ ebenda, S. 295

¹⁴⁸ vgl. Plassmann, H.; O'Doherty, J.; Shiv, B.; Rangel, A. (2008)

¹⁴⁹ im Englischen: *Experienced Pleasantness (EP)*

¹⁵⁰ Plassmann, H. et al. (2008), S. 1050

¹⁵¹ vgl. McClure, S. M. et al. (2004)

Cortex (mOFC) und des anliegenden rostralen anterioren cingulären Cortex (rACC). Des Weiteren fanden die Forscher heraus, dass sich der Preiseffekt beim günstigeren Wein (normaler Verkaufspreis \$5) stärker auf den mOFC auswirkt als beim teureren Wein (normaler Preis \$90). Interessanterweise konnte kein Effekt der Preisvariation in primären gustatorischen Arealen festgestellt werden. „*A natural interpretation is that the top-down cognitive process that encode the flavor expectancies are integrated with the bottom-up sensory components of the wine in the mOFC, thus modulating the hedonic experience of flavor, but that the flavor expectancies generated by the change in prices do not impact more basic sensory representations.*“¹⁵²

Tusche, Bode & Haynes¹⁵³ beschäftigten sich mit der Frage, ob die Beurteilung eines Objektes und damit in Verbindung stehende Entscheidungsprozesse auf die bewusste Verarbeitung objektbezogener Reize angewiesen sind. Im Rahmen einer fMRT-Untersuchung verglichen sie hierzu die Ergebnisse von zwei Probandengruppen. Den Probanden der ersten Gruppe, der High Attention-Gruppe, wurden für eine kurze Zeit verschiedene Autos gezeigt, die sie anschließend anhand ihrer Attraktivität auf einer 4-stufigen Skala beurteilen sollten. Bei der zweiten Gruppe, der Low Attention-Gruppe, ging es nicht um eine Attraktivitätsbeurteilung, sondern um eine Fixationsaufgabe. Im Zentrum der visuellen Darstellung wurde ein schwarzes Quadrat positioniert, welches alle 800ms entweder zur linken oder rechten Seite geöffnet wurde. Aufgabe der Probanden war es, entsprechend der jeweiligen Öffnung den korrespondierenden Reaktionsknopf (links bzw. rechts) zu betätigen. Während die Probanden der Low Attention-Gruppe die Fixationsaufgabe bewältigten, wechselte der Hintergrund zwischen zwei Varianten. Zunächst wurde für eine kurze Zeit (2.4s) ein Auto im Hintergrund der Fixationsaufgabe abgebildet. Danach folgte eine etwas längere Phase (7.2-12s), in der das schwarze Quadrat lediglich vor einem weißen Hintergrund präsentiert wurde. Anschließend wiederholte sich der beschriebene Hintergrundwechsel erneut. Die Phase, in der ein Auto den Hintergrund der Fixationsaufgabe darstellt, kann als Low-Attention-Phase bezeichnet werden. Es ist derselbe Stimulus wie in der High Attention-Gruppe, doch dieses Mal ist die Aufmerksamkeit der Probanden im Idealfall auf die Fixationsaufgabe gerichtet. In der Folge werden die Autos nur peripher wahrgenommen. Im Anschluss an die Untersuchung konnte diesbezüglich gezeigt werden, dass die Aufmerksamkeit durch die Fixationsaufgabe effektiv von der Wahrnehmung der Autos abgezogen wurde. Bei einem anschließenden Recognition-Test hatten die Probanden der High Attention-Gruppe eine Hitrate von 0.97, diejenigen aus der Low Attention-Gruppe lediglich eine Hitrate von 0.63. Ein weiteres Indiz für die aufmerksame Bearbeitung der Fixationsaufgabe bestand in einem Anteil an richtigen Antworten in Bezug auf die Öffnung des Quadrates von 89%. Im Anschluss an die fMRT-Messung wurden alle Probanden, ohne darüber im Vorfeld der Untersuchung in Kenntnis gesetzt zu werden, zu ihrer *Willingness to buy* i.V.m. den gezeigten Autos befragt. Ziel dieser Studie war es nämlich anhand der neuronalen Aktivierungen die *Willingness to buy* vorherzusagen. Im Ergebnis gelang

¹⁵² Plassmann, H. et al. (2008), S. 1052

¹⁵³ vgl. Tusche, A.; Bode, S.; Haynes, J.-D. (2010)

die Vorhersage durch Aktivierungen in der Insula und im medialen präfrontalen Cortex (MPFC). Interessanterweise funktionierte dies sowohl für die High Attention-Gruppe als auch für die Low Attention-Gruppe. Die Autoren schlussfolgern, dass „... *neural evaluation of products and associated choice-related processing does not necessarily depend on attentional processing of available items.*“¹⁵⁴

Um das Potenzial bzw. die Leistungsfähigkeit des dominanten neurophysiologischen Messverfahrens, der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), realistisch ab- bzw. einschätzen zu können, ist ein grundlegendes Verständnis hinsichtlich der angewandten Methode unabdingbar. Im Anschluss an die inhaltliche Einbettung der fMRT in den Bereich des Marketings setzen sich die Kapitel 3 bis 7 daher mit unterschiedlichen allgemeinen und speziellen methodischen Aspekten der fMRT auseinander. Wie bereits im Zuge der Abbildung der perspektivischen Entwicklung des operativen Marketings¹⁵⁵ angedeutet wurde, ergeben sich durch die neurophysiologische Perspektive erweiterte Möglichkeiten, den Konsumenten und die Wirkung von Marken, Kommunikation und Produkten auf ihn zu erforschen. Durch den Einsatz neurophysiologischer Messverfahren, und hier insbesondere der fMRT, eröffnen sich bislang nicht vorhandene Möglichkeiten, den Konsumenten und seine internen Abläufe zu verstehen. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung von Gehirnschans liefert die fMRT scheinbar ganz eindeutig und intuitiv nachvollziehbare Ergebnisse. Doch wie eindeutig, intuitiv und vor allem aussagekräftig sind die mit Hilfe der fMRT generierten Daten tatsächlich? Worauf basiert die Messung? Wie entsteht eine dreidimensionale Gehirnabbildung, in der die aktivierten Gehirnregionen farblich markiert werden? Was beeinflusst die Qualität der Messung? Welche Herausforderungen bestehen im Zusammenhang mit der Erstellung eines fMRT-Experiments? Wie werden die erzeugten Daten analysiert? Wie gestaltet sich die Interpretation der Ergebnisse? Die Ausführungen in den Kapiteln 3 bis 7 dienen der Beantwortung dieser Fragen.

¹⁵⁴ Tusche, A.; Bode, S.; Haynes, J.-D. (2010), S. 8024

¹⁵⁵ vgl. Kapitel 2.2.1 Entwicklung des operativen Marketings

3 Gehirn und Gehirnaktivität - Biologische Grundlagen

Nachdem sich Kapitel 2 mit einem Anwendungsbereich der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT), der Neuroökonomie und hier genauer mit dem Neuromarketing, auseinander gesetzt hat und auch grundlegend die verschiedenen neurophysiologischen Messverfahren gegenübergestellt hat, steht in Kapitel 3 die Gehirnaktivität als allgemeine biologische Grundlage der Messung im Fokus. Diese soll ausführlich erörtert werden, damit in einem späteren Kapitel¹⁵⁶ konkret auf das biologische WAS der fMRT-Messung eingegangen werden kann.

Zunächst wird das Gehirn, als Teil des zentralen Nervensystems und als allgemeines Objekt des Interesses, thematisiert. Im Anschluss an die Darstellung des Grundaufbaus wird dann die funktionelle Einheit des Gehirns, die Nervenzelle¹⁵⁷, und allgemein Gehirnaktivität genauer betrachtet, da letztlich über die Messung mittels neurophysiologischer Verfahren generell und der fMRT speziell herausgestellt werden soll, welche Gehirnbereiche in bestimmten Situationen aktiv sind.

Um einen Einblick in die Funktionsweise des Gehirns zu gewinnen und um zu verstehen was genau mittels fMRT gemessen wird, ist es unerlässlich, sich mit der Entstehung und den weiteren Folgen neuronaler Aktivität auseinander zu setzen. Um zu veranschaulichen, wie Nervenzellen funktionieren bzw. wie sie kommunizieren, wird ihr Aufbau besprochen und elektrische Potenziale in der Betrachtung berücksichtigt, die letztlich für die Informationsübertragung in Form einer synaptischen Übertragung eine notwendige Voraussetzung darstellen. Die Ausführungen zu den biologischen Grundlagen werden dadurch abgerundet, dass auch der zweite Zelltyp im Gehirn, die Gliazelle, kurz beleuchtet wird, da ihre Rolle im Zusammenspiel mit den Neuronen lange Zeit unterschätzt wurde.

3.1 Das Gehirn

Das Gehirn stellt die zentrale Steuereinheit des Menschen dar. Es ist das entscheidende Organ, das mit der (über-)lebenswichtigen Aufgabe betraut ist, das Verhalten eines Organismus an die Umweltbedingungen anzupassen. Das Erstaunliche daran ist, dass das Gehirn dieser Aufgabe nachkommt, ohne über einen direkten Kontakt mit der Umwelt zu verfügen. Über die verschiedenen Sinnesorgane ist es dem Gehirn möglich, die Umwelt wahrzunehmen und die eingehenden Informationen auf der Grundlage angeborener und erlernter Kriterien bzw. Schablonen zu interpretieren. Mit Hilfe dieser Deutung steuert das Gehirn letztendlich das menschliche Verhalten. Es löst die notwendigen Prozesse aus, die dazu führen, dass sich Menschen generell belohnungsversprechenden Dingen zuwenden und verlustsugerierende Reize vermeiden.

Der Schlüssel für die Informationsaufnahme, -weiterleitung und -verarbeitung liegt in den funktionellen Einheiten des Gehirns, den Nervenzellen bzw. ihrer Verknüpfung untereinander. Die Nervenzellen reagieren hierbei nur auf elektrische Signale bzw.

¹⁵⁶ vgl. Kapitel 5.1.1 Neurovaskuläre Kopplung

¹⁵⁷ Die Begriffe „Nervenzelle“ und „Neuron“ werden synonym verwendet.

chemische Substanzen, die in dieser Form in der Natur nicht vorkommen. Damit das Gehirn durch Umweltreize stimuliert werden kann, müssen diese durch die einzelnen Sinnesrezeptoren in neuroelektrische bzw. neurochemische Signale umgewandelt werden. Durch diese Übersetzung von Umweltreizen in Nervenerregungen verschwinden zunächst alle spezifischen Eigenschaften. Dieses Phänomen wird als „*Unspezifität oder Neutralität neuronaler Erregungen gegenüber ihrer Herkunft und Bedeutung*“¹⁵⁸ bezeichnet. Die Kernaussage lautet hierbei „...*, dass Modalitäten und Qualitäten von Sinnesreizen durch den Ort der Verarbeitung im Gehirn festgelegt werden und nicht durch die Beschaffenheit der damit verbundenen neuronalen Aktivität.*“¹⁵⁹ Theoretisch weisen alle neuronalen Erregungen dieselbe Struktur auf. Auf diese Weise können die unterschiedlichen Nervenerregungen gemeinsam verarbeitet werden. Am Ende des Informationsverarbeitungsprozesses werden die ursprünglichen Qualitäten über den jeweiligen Ort im Gehirn rekonstruiert, an dem sie letztlich verarbeitet werden. Die Sinnesrezeptoren sind allerdings nicht nur als Übersetzer gefragt, sondern erfüllen auch eine Filterfunktion. Sie wirken insofern als Filter, als dass nur ein kleiner Bruchteil der eingehenden Informationen bewusst verarbeitet wird. Jede Sekunde muss entschieden werden, worauf die Aufmerksamkeit gerichtet wird.

Das Gehirn wird ständig mit drei typischen Schwierigkeiten konfrontiert, die sich in den folgenden Fragen widerspiegeln: Mit welchen der vielen Dinge, die unsere Sinnesorgane potentiell erregen, will oder muss sich unser Gehirn genauer befassen? Welches Verhalten löst es im Körper aus?¹⁶⁰ Wie wird das was wir letztlich tun bewertet?

Alles was wir tun, wird vom Gehirn bewertet¹⁶¹. Diese Bewertungen sind essenziell für eine mögliche Verhaltenskorrektur und allgemein für die Verhaltensanpassung und somit für den gesamten Prozess der Verhaltenssteuerung. Zu bewerten ist grob gesprochen, ob ein bestimmtes Verhalten gut oder schlecht war, ob es Lust oder Unlust hervorgerufen hat und ob das Ergebnis den Erwartungen entsprochen hat. Das Ergebnis dieser Bewertungen wird dann im Gedächtnis verankert und drückt sich häufig in Gefühlen aus, man spricht dann auch von emotionaler Konditionierung¹⁶². Die Relevanz von Bewertungen ergibt sich daraus, dass das Gedächtnis als hochdynamisches System¹⁶³ angesehen werden kann. Durch das Wechselspiel von Entscheidungen, darauf basierenden Erfahrungswerten und Bewertungen dieser Erfahrungswerte wird das Verhalten letztendlich im Sinne einer Situationsadäquanz ausgerichtet. Dieser Prozess erfolgt meistens unbewusst. Es gibt einen starken Zusammenhang zwischen der Steuerung der Aufmerksamkeit, der Handlungsplanung und -entscheidung und der Verhaltensbewertung. Bindeglied zwischen diesen drei Bereichen sind das Gedächtnis und Gefühle. Dieser Feedback-Mechanismus resultiert in

¹⁵⁸ Roth, G. (2003), S. 82

¹⁵⁹ ebenda, S. 82

¹⁶⁰ Jeder Mensch hat in vielen Situationen die Möglichkeit, ganz unterschiedliche Dinge zu tun.

¹⁶¹ vgl. Roth, G. (2009), S. 147 ff.; Roth, G. (2001), S. 451 f.

¹⁶² vgl. Roth, G. (2009), S. 144 ff.

¹⁶³ vgl. Roth, G. (2001), S. 278 f.

einer mittel- bis langfristigen Verhaltenssteuerung mit dem Ziel generell automatische Programme für ein situationsangepasstes Verhalten auszulösen.

Neben der Steuerung menschlichen Verhaltens in Folge externer Reize besteht eine weitere Kernaufgabe des Gehirns in der Kontrolle der vegetativen Funktionen des Körpers.¹⁶⁴

3.1.1 Allgemeines zur Gehirnanatomie

Das Nervensystem besteht anatomisch gesehen, wie in Abbildung 8 dargestellt, aus dem zentralen (ZNS) und dem peripheren Nervensystem (PNS).¹⁶⁵ Das ZNS besteht aus dem Gehirn und dem Rückenmark, das PNS¹⁶⁶ besteht aus dem restlichen Nervengewebe, also den Hirnnerven und den Spinalnerven. Das PNS verbindet das ZNS mit den verschiedenen Organen, indem es über afferente Bahnen Informationen von den Organen zum Gehirn leitet und über efferente Bahnen den entsprechenden Organen Informationen vom Gehirn übermittelt.

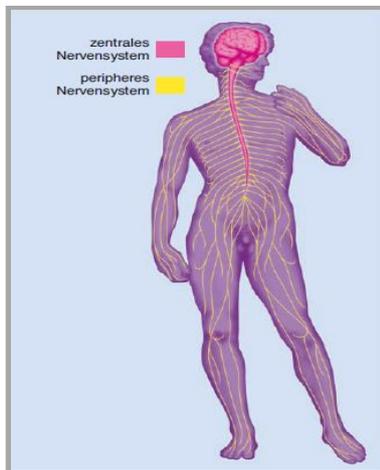


Abbildung 8: ZNS und PNS¹⁶⁷

Ein ausgewachsenes Gehirn wiegt zwischen 1250 und 1450 Gramm und ist ca. 1400 cm³ groß. Im Normalfall erreicht ein ausgewachsenes Rückenmark ungefähr eine Länge von 50 Zentimeter und erstreckt sich über eine Fläche von ca. 150 cm³. In Bezug zum Gesamtkörpergewicht ist der Anteil des ZNS mit knapp 3% einer 50 kg wiegenden Frau und ungefähr 2% eines 70 kg schweren Mannes relativ klein. Trotz des relativ kleinen Anteils ist seine Aufrechterhaltung sehr ressourcenintensiv. Unabhängig davon ob ein Mensch schläft oder wach ist, erhält das Gehirn trotz dieser Relation immerhin ungefähr 15% des Herzoutputs, verbraucht ungefähr 20% des Körpersauerstoffs und wandelt einen konstanten prozentualen Anteil an Körper-Glukose um.¹⁶⁸

¹⁶⁴ z.B. Atmung, Kreislauf, Hormonhaushalt, Schlaf- und Wachrhythmus

¹⁶⁵ vgl. Kandel, E. R. (1996), S. 74; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 58 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 78 ff.; Thompson, R. F. (2001), S. 11 ff.; Schandry, R. (2011), S. 110 f.

¹⁶⁶ vgl. Parker, S. (2008), S. 82 ff.

¹⁶⁷ Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 58

¹⁶⁸ vgl. Woolsey, T. A.; Hanaway, J.; Gado, M. H. (2008), S. 7 f.

Da sich die vorliegende Arbeit mit der Messung der Gehirnaktivität beschäftigt, wird im Folgenden Bezug zum Gehirn als Teil des ZNS genommen.

Das Gehirn besteht grundlegend aus zwei Zelltypen. Dies sind zum einen die Nervenzellen oder auch Neuronen und zum anderen die Gliazellen. Die Neuronen sind mit der Verarbeitung und Weiterleitung von Information betraut, die Gliazellen unterstützen dabei die Neuronen in ihrer Funktion, indem sie deren Effektivität und Effizienz erhöhen¹⁶⁹. Auf diese Zelltypen wird im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch eingegangen. Groben Schätzungen zufolge besteht das Gehirn aus bis zu einer Billionen Nervenzellen, also 10^{12} (1.000.000.000.000), die jeweils mehrere tausend Verbindungen mit anderen Nervenzellen aufweisen. „Die Vielfalt der Verknüpfungen im menschlichen Gehirn scheint daher fast unbegrenzt.“¹⁷⁰ Gliazellen sind im Vergleich zu Nervenzellen kleiner und kommen daher im Gehirn zehn Mal so häufig vor.

Das Gehirn ist in einem Flüssigkeitsmantel, dem Liquor, eingebettet. Dieser dient der Polsterung des Gehirns, stellt wichtige Nährstoffe zur Verfügung und ist auch für den Abtransport von Stoffwechselprodukten verantwortlich.¹⁷¹ Wie kein anderes Organ ist das Gehirn durch mehrere Hirnhäute und einen soliden Knochenmantel vor Einflüssen von außen geschützt. Das Gehirn selbst ist allerdings schmerzempfindlich. Aus diesem Grund können Operationen am offenen Gehirn teilweise bei Bewusstsein der Patienten durchgeführt werden. Da jede noch so kleine Region im Gehirn Tausende bis Millionen von Nervenzellen umfasst, kann diese Eigenschaft unter Umständen nützlich sein. So ist ein Patient, falls nötig, in der Lage Auskunft darüber zu geben, was durch eine mechanische oder elektrische Reizung einer bestimmten Hirnregion ausgelöst wird.

Grob gesprochen besteht das Gehirn aus der grauen und der weißen Substanz.¹⁷² Der Unterschied zwischen beiden hängt mit den Eigenschaften der funktionellen Einheit des Gehirns, der Nervenzelle, zusammen, auf die noch genauer eingegangen wird. Die graue Substanz besteht aus den Zellkörpern von Nervenzellen und bildet die Großhirnrinde¹⁷³ wie auch tiefer liegende¹⁷⁴ Kerne¹⁷⁵. Bei der weißen Substanz handelt es sich um die Fortsätze der Nervenzellen, die verschiedene Bereiche grauer Substanz als Leitungsbahnen miteinander verbinden. Prinzipiell befindet sich die weiße Substanz im inneren Bereich des Gehirns und wird von der grauen Substanz umgeben. Im inneren Bereich des Gehirns bzw. in tiefer gelegenen Bereichen sind allerdings auch einige Kerne eingebunden.

Wie bereits angesprochen erhält das ZNS über unterschiedliche Nerven Informationen aus dem PNS. Ein Nerv besteht hierbei aus mehreren Bündeln von Nervenfa-

¹⁶⁹ vgl. Woolsey, T. A.; Hanaway, J.; Gado, M. H. (2008), S. 5; Bösel, R. M. (2006), S. 25; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 24 f.

¹⁷⁰ Thompson, R. F. (2001), S. 3

¹⁷¹ vgl. Kirchbaum, C. (2008), S. 302; Menche, N. (2007), S. 153

¹⁷² vgl. Kirchbaum, C. (2008), S. 267; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 9; Woolsey, T. A.; Hanaway, J.; Gado, M. H. (2008), S. 5 ff.

¹⁷³ Cortex cerebri bzw. Cortex

¹⁷⁴ subkortikal: unterhalb des Cortex liegend

¹⁷⁵ Nervenzellen sind fast immer zu funktionalen Einheiten zusammengefasst. Kleine Ansammlung von Nervenzellkörpern werden als Nucleus bzw. Kern bezeichnet, größere Ansammlungen als Felder, Gebiete oder Areale.

ern, also aus Bündeln von Fortsätzen der Nervenzellen.¹⁷⁶ Der tatsächliche Reiz wird über die entsprechenden Sinnesrezeptoren in neuroelektrische bzw. neurochemische Signale umgewandelt und über die afferenten Nerven zum Gehirn weitergeleitet. Die Modalität eines Reizes wird nicht durch die Aktivität einzelner Nervenzellen determiniert, sondern durch den Ort im Gehirn festgelegt, an dem die Erregung verarbeitet wird. So führt eine neuronale Erregung in der Sehrinde des Menschen zu einer visuellen Empfindung. Submodalitäten (Qualitäten) eines Reizes, beim Sehen, z.B. Farbe oder Kontrast, werden ebenfalls durch den Verarbeitungsort festgelegt. Modalität, Submodalität und Ort der Reizverarbeitung werden nicht durch die Aktivität einer einzelnen Nervenzelle repräsentiert, sondern durch die Aktivität vieler, miteinander verbundener Nervenzellen, also eines Nervenzellnetzes.¹⁷⁷ Kann die Aktivität verschiedener Neuronen oder -netze im Sinne einer Bündelung der Erregung zusammengeführt werden, so spricht man von Konvergenz. Wird die Erregung eines Neuronen oder eines Netzes von Neuronen zu mehreren anderen Neuronen bzw. -netzen übertragen, spricht man von Divergenz.¹⁷⁸ Die Kombination von Konvergenz und Divergenz stellt eine fast unendliche Fülle von gegenseitigen Beeinflussungsmöglichkeiten von Nervenzellen, Nervenzellnetzen, Kernen und Arealen im Gehirn dar.

Wird bei Untersuchungen über aktivierte Gehirnregionen gesprochen, so werden zusätzlich zu den einzelnen Strukturen auch unterschiedliche Richtungstermini¹⁷⁹ verwendet, um eine präzisere Angabe hinsichtlich der betroffenen Gehirnbereiche machen zu können. Da es eine Vielzahl von Richtungstermini gibt, sollen hier nur die gängigsten vorgestellt werden. Bei den Richtungstermini ist zu beachten, dass das Gehirn des Menschen und des Menschenaffen aufgrund des aufrechten Gangs oben im rechten Winkel zur Körperachse liegt. Bei vielen anderen Tieren liegt das Gehirn entlang der Körperachse. So gibt es einige Bezeichnungen, die nicht direkt intuitiv nachvollziehbar sind. Bspw. gibt es die Lagebezeichnungen dorsal (rückenseitig) und ventral (bauchseitig). Bei Lebewesen, deren Gehirn entlang der Körperachse verläuft, bedeutet rückenseitig in Bezug auf das Gehirn automatisch oben (zur Schädeldecke hin gelegen) und bauchseitig unten (zum Kinn gelegen). Dieselbe Bedeutung haben dorsal und ventral auch in Bezug auf das menschliche Gehirn, allerdings erschließt sich dies hier nicht intuitiv. Bei rückenseitig und bauchseitig würde man intuitiv auf hinten (zum Hinterkopf gelegen) und vorne (zur Stirn hin gelegen) schließen, was mit den Begriffen allerdings nicht gemeint ist. Da die meisten Richtungstermini in einem relativen Bezug zum Körper stehen und damit unabhängig von der genauen Gehirnlage sind, können sie eins zu eins übersetzt werden. Die Bezeichnungen anterior und posterior stehen für die Vorder- und Rückseite, also Richtung Stirn bzw. Hinterkopf. Medial und lateral stehen für Gehirnstrukturen die zur Mitte hin bzw. zu den Seiten liegen. Bei einer parietalen Lage handelt es sich um eine Position in Be-

¹⁷⁶ vgl. Kirchbaum, C. (2008), S. 195

¹⁷⁷ vgl. Roth, G. (2010), S. 243 f.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 183 f.

¹⁷⁸ vgl. Schandry, R. (2011), S. 226 f.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 305; Klinker, R.; Pape, H.-C.; Kurtz, A.; Silbernagel, S. (2009), S. 636; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 193

¹⁷⁹ vgl. Schandry, R. (2011), S. 109; Carlson, N. R. (2004), S. 79

zug auf das Scheitelbein des Schädels, das einen Teil des Hinterkopfes darstellt. Die gesuchte Struktur würde sich folglich scheidelseitig befinden.

Eine Darstellung einiger Lagebezeichnungen in Bezug auf das Gehirn findet sich in Abbildung 9. Neben den Richtungstermini sind dieser Abbildung auch die Verläufe der drei Schnittebenen zu entnehmen, über welche ein Gehirn im Rahmen einer entsprechenden Untersuchung generell zu betrachten ist.

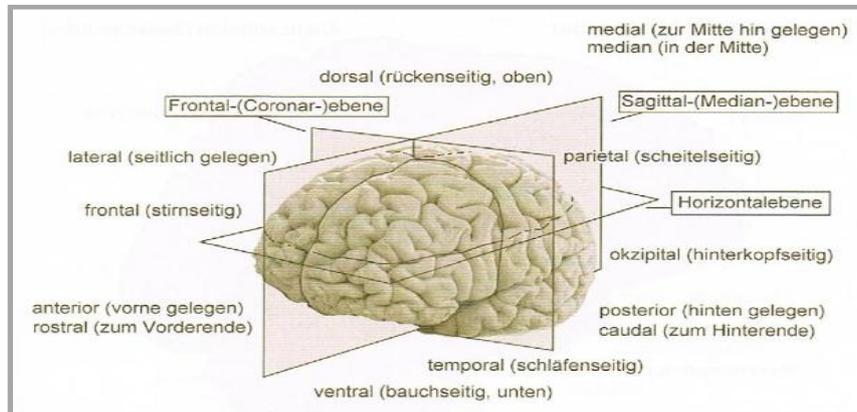


Abbildung 9: Häufig verwendete Lagebezeichnungen¹⁸⁰

Die Schnittebenen¹⁸¹ bezeichnen die drei grundlegenden Perspektiven, in denen dreidimensionale Gehirnaufzeichnungen betrachten werden können. Beim Coronar-, Frontal- bzw. Querschnitt wird das Gehirn quasi von vorne nach hinten in mehrere Schichten geteilt.¹⁸² Würde man für diesen Prozess ein Messer verwenden, befände sich die Messerspitze bspw. auf der rechten und der Messergriff auf der linken Kopfseite. Auf diese Weise würde das Gehirn von vorne nach hinten in Scheiben geschnitten werden. Diese Schnittebene steht im rechten Winkel zur Körperachse. Im Gegensatz dazu verläuft der Horizontal-, Axial- bzw. Transversalschnitt entlang der Körperachse. Hierbei wird das Gehirn von oben nach unten in verschiedene Schichten zerlegt. Die letzte Schnittebene wird als Sagittal- bzw. Medianschnitt bezeichnet. Sie verläuft parallel zur Körperachse, d.h. man teilt das Gehirn von links nach rechts in mehrere Schichten.

¹⁸⁰ Bösel, R. M. (2006), S. 51

¹⁸¹ vgl. Carlson, N. R. (2004), S. 79 f.

¹⁸² Es ist vergleichbar mit dem Schneiden eines gerade gekauften Brotes beim Bäcker, das in einer Schneidemaschine von vorne nach hinten in mehrere Brotscheiben geteilt wird.

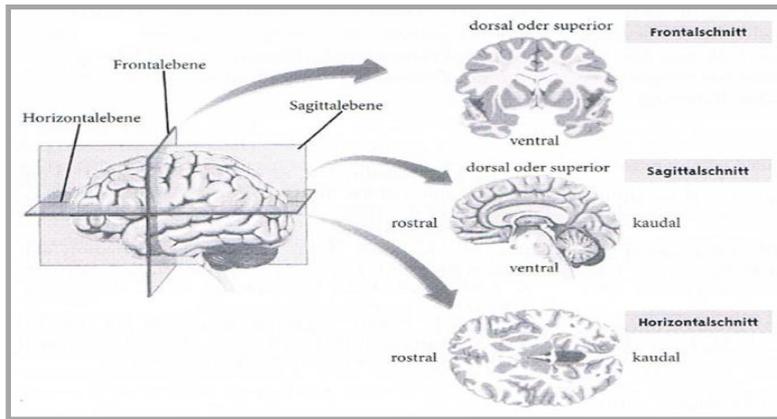


Abbildung 10: Anatomische Schnittebenen und Lagebezeichnungen¹⁸³

Abbildung 10 zeigt im Sinne der Gehirnschnitte exemplarisch Schichten für die drei Schnittebenen mit einigen Lagebezeichnungen in Bezug zu den jeweiligen Ebenen.

3.1.2 Grundaufbau des Gehirns

Grob gesehen kann man das Gehirn in vier Bereiche untergliedern. Von unten nach oben sind dies der Hirnstamm im unteren Teil des Gehirns mit Verbindung zum Rückenmark, das hinter dem Hirnstamm liegende Kleinhirn, das oberhalb des Hirnstamms liegende Zwischenhirn und abschließend der entwicklungsgeschichtlich jüngste Teil, das Endhirn. Wie Abbildung 11, in der die einzelnen Teile farblich unterschieden werden, zu entnehmen ist, können End- und Zwischenhirn zum Großhirn zusammengefasst werden.

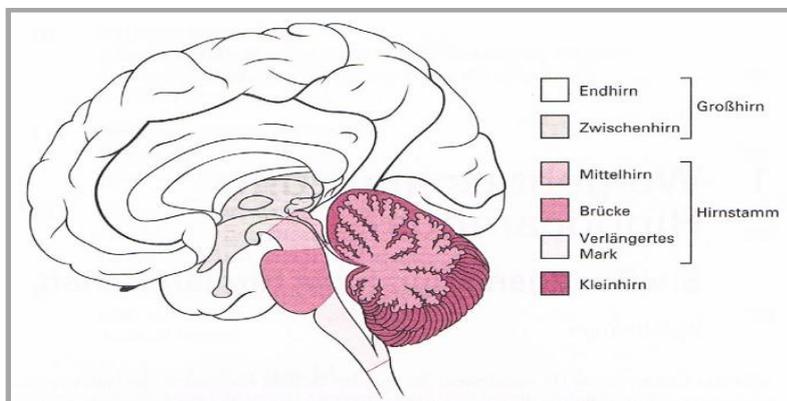


Abbildung 11: Sagittalschnitt durch das Gehirn¹⁸⁴

Der *Hirnstamm*¹⁸⁵ kann als eine zentrale Schnittstelle im Gehirn angesehen werden. Aufgrund seiner Lage stellt er eine Verbindung zwischen Rückenmark, Kleinhirn und Großhirn dar. Er besteht aus dem Verbund von verlängertem Mark (Medulla oblongata), der Brücke (Pons) und dem Mittelhirn (Mesencephalon). Hierbei stellt die *Medulla oblongata* in ihrer Eigenschaft als Fortsatz des Rückenmarks in das Gehirn

¹⁸³ Schandry, R. (2011), S. 108

¹⁸⁴ Bertram, W. (2007), S. 2

¹⁸⁵ vgl. Schandry, R. (2011), S. 118 ff., S. 121 ff.; Schandry, R. (1998), S. 25 ff.; Bösel, R. M. (2006), S. 81 ff., S. 93 ff.; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 596 ff.; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 72 f.; Kandel, E. R. (1996), S. 81 ff.; Bertram, W. (2007), S. 3 f.

den untersten Teil des Hirnstamms dar. Die Verknüpfung von Gehirn und Rückenmark erfolgt über bereits erwähnte auf- und absteigende Nervenstränge. Zusätzlich enthält die *Medulla oblongata* eine Reihe lebenswichtiger Kerne von Nervenzellen (Nuclei), die eine wichtige Rolle im Rahmen der vegetativen Steuerung, z.B. Atmung, Herzschlag und Darmfunktion einnehmen.¹⁸⁶ Die *Brücke* dient zum einen als Durchgangsstation für alle Nervenfasern und kann in diesem Sinne als Verlängerung der *Medulla oblongata* verstanden werden. Wie bei der *Medulla oblongata* befinden sich auch innerhalb der *Brücke* verschiedene Kerne, die eine Verbindung zwischen dem darüber liegenden Großhirn und dem dahinter liegenden Kleinhirn herstellen. Zusätzlich verknüpfen sich überkreuzende Fasern in der unteren Hälfte der *Brücke* auch den Hirnstamm und das Kleinhirn. *Brücke* und *Medulla oblongata* werden gemeinsam auch als *Rautenhirn (Rhombencephalon)* bezeichnet. Das *Mittelhirn* ist der höchstgelegene Teil des Hirnstamms, in dem die röhrenartige Grundstruktur des Rückenmarks noch erhalten ist. Es besteht im oberen Teil aus dem *Tectum (Dach)*, welches wichtige Zellansammlungen für das Seh- und Hörsystem aufweist. Im größeren unteren Teil des Mittelhirns, dem *Tegmentum (Haube)*, liegen Kerne der Hirnnerven, die für die Steuerung der Augenbewegung und die Kontrolle unterer Hirnabschnitte zuständig sind. Zudem befinden sich hier auch der *Nucleus ruber*, eine große Kernregion, und die *Substantia nigra*, die bei der Bewegungskontrolle eine wichtige Rolle spielen.

Der gesamte Hirnstamm wird von einem Netzwerk, der sog. *Formatio reticularis* durchzogen. Sie besteht aus vielen kleinen Kernen und deren Verknüpfungen durch Nervenfasern. Diese Struktur ist zentral für die Kontrolle lebenswichtiger Körperfunktionen sowie von Bewusstseinszuständen.

Das *Kleinhirn*¹⁸⁷ (Cerebellum) liegt dem Hirnstamm, wie in Abbildung 11 zu sehen, quasi von hinten auf. Es befindet sich im unteren hinteren Bereich des Gehirns. Aufgrund zahlreicher Lappen, die von Furchen durchzogen sind, erhält das Kleinhirn von außen betrachtet ein stark gefaltetes Aussehen. Die Zellkörper der Nervenzellen bilden hier eine zwei bis drei Millimeter dicke Rinde, die die darunter liegende weiße und graue Substanz im Sinne einer Oberflächenschicht umschließt. Diese Kleinhirnrinde und die Kerne unter ihr erhalten Impulse vom Gleichgewichtsorgan, von den sensorischen Fasern, aus dem Hirnstamm und verschiedenen Bereichen der Großhirnrinde. Im Sinne abgehender (efferenter) Leitungen ziehen motorische Fasern weg vom Kleinhirn hin zu Strukturen wie z.B. dem Thalamus und dem Hirnstamm. Neben einigen anderen Aufgaben besteht die Hauptaufgabe des Kleinhirns in der Koordination der Motorik.

¹⁸⁶ Ist die *Medulla oblongata* aus irgendeinem Grund in ihre Funktionalität beeinträchtigt, führt dies i.d.R. zum Tod. Im Gegensatz dazu stirbt ein Mensch nicht unbedingt, wenn größere Teile des Großhirns ausfallen. Ist in einem solchen Fall die *Medulla oblongata* intakt, kann ein Mensch zumindest im Koma weiterleben.

¹⁸⁷ vgl. Schandry, R. (2011), S. 120 f.; Bösel, R. M. (2006), S. 16; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 604 ff.

Oberhalb an den Hirnstamm angrenzend befindet sich das *Zwischenhirn*¹⁸⁸ (Diencephalon). Die größte Struktur in diesem Bereich ist der *Thalamus*. Dieser dient als wichtige Schalt- und Integrationszentrale für Sinneseindrücke aus dem gesamten Nervensystem. Ankommende Informationen der Sinnesorgane werden an die Großhirnrinde weitergeleitet. Im äußeren Erscheinungsbild besteht der Thalamus aus zwei kleinen ovalen Strukturen, je eine innerhalb jeder Gehirnhälfte. Als weitere wichtige Struktur innerhalb des Zwischenhirns ist der *Hypothalamus* zu nennen. Dieser liegt unterhalb des Thalamus, wie schon sein Name verrät, und besteht aus einer Gruppe kleiner Kernregionen, die in unmittelbarer Nähe zur *Hirnanhangsdrüse*, der sog. *Hypophyse*, liegen. Die Steuerung dieser zentralen Hormondrüse erfolgt über Nerven aus dem Hypothalamus. Werden an dieser Stelle Hormone freigesetzt, so sind diese selbst in der Lage, sich auf andere Hormondrüsen auszuwirken, indem sie die Freisetzung anderer Hormone kontrollieren. Auf diese Weise stellen Hypothalamus und Hypophyse ein übergeordnetes Kontrollsystem dar. Der Hypothalamus kann folglich als eine zentrale Einheit zur Steuerung des vegetativen Nervensystems angesehen werden und ist zudem auch in die Regulation von Gefühlen involviert. Des Weiteren weist er neben zahlreichen Gehirnregionen auch eine Verbindung mit dem limbischen System auf. Dieses System wird durch verschiedene Strukturen gebildet, welche an der Emotionsverarbeitung beteiligt sind.

Wie im Falle des Kleinhirns bilden die Zellkörper der Nervenzellen auch im *Endhirn*¹⁸⁹ (Telencephalon) eine zwei bis drei Millimeter dicke Oberflächenschicht, die sog. Großhirnrinde. Diese ist der entwicklungsgeschichtlich jüngste Teil des Gehirns und wird daher auch Neocortex genannt. Visuell ist die Großhirnrinde durch viele aus der Hirnmasse hervortretende Hirnwindungen (Gyri) und den dazugehörigen Vertiefungen, den sog. Furchen (Sulci), gekennzeichnet. Der Vorteil dieser speziellen Struktur liegt in einer Oberflächenvergrößerung. Allgemein kann man die Großhirnrinde in vier Lappen untergliedern, die in Abbildung 12 dargestellt sind: Stirn- (Frontal-), Scheitel- (Temporal-), Schläfen- (Parietal-) und Hinterhauptslappen (Okzipitallappen).

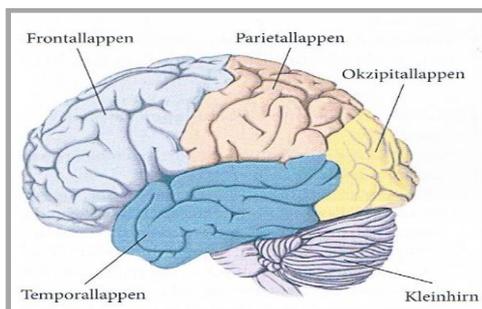


Abbildung 12: Lappengliederung und Rindenfelder der linken Hemisphäre des Großhirns¹⁹⁰

¹⁸⁸ vgl. Bösel, R. M. (2006), S. 17 f.; Schandry, R. (2011), S. 128 ff.; Schandry, R. (1998), S. 30 ff.; Carlson, N. R. (2004), S. 100; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 75 ff.; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 73 f., S. 78

¹⁸⁹ vgl. Schandry, R. (2011), S. 137 f., S. 152 ff.; Thompson, R. F. (2001), S. 20 ff.; Kandel, E. R. (1996), S. 83 ff.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 87 ff.

¹⁹⁰ Schandry, R. (2011), S. 152

Im Gegensatz zur Kleinhirnrinde weist die Großhirnrinde eine regionale Gliederung auf. Untersuchungen von Personen mit unterschiedlichen Arten von Hirnschäden weisen darauf hin, dass bestimmte Regionen der Großhirnrinde auf ganz spezifische Fähigkeiten und Sinnesmodalitäten spezialisiert sind. Mit Hilfe dieser Perspektive kann die Cortexoberfläche in mehrere Felder oder Regionen aufgeteilt werden, z.B. in die motorische Rinde, Seh- und Hörrinde. Generell wird zwischen primären Rindenfeldern und Assoziationsfeldern unterschieden. Die primären Rindenfelder sind inhaltlich insofern stark eingeschränkt bzw. spezialisiert, als dass sie jeweils nur Informationen gleicher Qualität erhalten und verarbeiten. Visuelle oder akustische Empfindungen stellen bspw. den jeweils spezifischen Input dar, d.h. es existieren für die Verarbeitung jeder Art von Sinneseindrücken spezifische Neuronennetzwerke, die die spezifische Information zu korrespondierenden Großhirnrindenbereichen weiterleiten. Im Gegensatz zu den primären Rindenfeldern erfolgt in den Assoziationscortices, als Orte komplexerer Verarbeitungsprozesse, eine Integration der Information aus verschiedenen Bereichen. Erst durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Rindenfelder sind ganzheitliche Eindrücke bzw. komplexere Funktionen möglich. Der Bereich zwischen Großhirnrinde und Zwischenhirn wird durch weiße Substanz ausgefüllt, die mit einzelnen Endhirnkernen, den sog. *Basalganglien*, versehen ist.

Nachdem der Aufbau des Gehirns anhand einzelner Gehirnbereiche bisher eher aufgrund von anatomischen Gesichtspunkten erfolgte, soll abschließend kurz ein Bereich bzw. eine Ansammlung von Gehirnstrukturen betrachtet werden, die funktionell gesehen mit der Emotionsverarbeitung in Verbindung steht. Diese Darstellung ist insofern interessant, da Emotionen, wie bereits in Kapitel 2.2.2.1¹⁹¹ angesprochen, unabdingbar für Entscheidungen und somit generell für das menschliche Verhalten sind. Es handelt sich hierbei um das *limbische System*, welches teilweise zum Zwischenhirn, teilweise zum Endhirn gezählt wird. Jede der im Folgenden angesprochenen Strukturen ist funktional mit anderen Steuerzentren in anderen Gehirnbereichen verbunden.

Es besteht zwar eine grobe Vorstellung von den hochkomplexen Prozessen, die das Verhalten steuern, doch das genaue Zusammenspiel der Gehirnbereiche ist bei Weitem nicht ausreichend erforscht. Das limbische System ermittelt unter anderem die Bedeutung eines Objektes. Während der Entscheidungsphase ist allerdings auch der Neocortex aktiv. Da hier verschiedene Erfahrungen inklusive der entsprechenden Konsequenzen i.V.m. verschiedenen Objekten gespeichert sind, steht der Neocortex dem limbischen System beratend zur Seite. *„Ist dieser Gehirnteil geschädigt, stehen die Lebenserfahrungen nicht mehr zur Verfügung. Es kommt zu Handlungen, die unüberlegt und der Situation unangemessen sind.“*¹⁹² Bereits hieran sieht man die Verknüpfung zwischen dem Neocortex und den tiefer liegenden Strukturen bei der Emotionsverarbeitung. Das limbische System besteht aus verschiedenen Gehirnstrukturen. Nachfolgend sollen einige der bekannteren Strukturen kurz vorgestellt werden.

¹⁹¹ Kapitel 2.2.2.1 Neuromarketing im weiteren Sinne

¹⁹² Häusel, H.-G. (2012a), S. 97

Eine dieser Strukturen ist die *Amygdala*¹⁹³, die aufgrund ihrer Form auch als Mandelkern bezeichnet wird. Sie existiert in beiden Gehirnhälften und empfängt von allen Hirnzentren Informationen, die Sinneseindrücke aufnehmen. Zudem erhält es auch vom Thalamus Informationen. Insofern gilt sie als mächtige Schaltzentrale. Dieses System belegt einkommende Impulse mit positiven und negativen Bewertungen. Die Amygdala ist aber nicht nur maßgeblich an der emotionalen Bewertung von Objekten beteiligt, sondern auch für die emotionale Bewertung von Gesichtern wichtig. Sie spielt eine zentrale Rolle beim Wiedererkennen von Situationen, der Analyse von Gefahren und ist wesentlich für die Entstehung von Angst verantwortlich. Die enorme Bedeutung der Amygdala wird dann sichtbar, wenn diese Region beschädigt bzw. nicht funktionsfähig ist. Mensch und Tier verhalten sich in der Folge unkontrolliert, gleichgültig und zahm. Erklären lässt sich dies folgendermaßen: *„Erst die Bewertung durch die Amygdala gibt der Welt Sinn! Und erst durch diese Bedeutungsgebung wird unser Organismus dazu aktiviert, Reize mit negativer Bedeutung zu vermeiden und solche mit positiver Bedeutung aufzusuchen!“*¹⁹⁴

Der *orbitofrontale* und der *ventromediale präfrontale Cortex*¹⁹⁵ stellen zwei Regionen des früher als nur mit rein rationalen bzw. vernunftbezogenen Prozessen verbundenen Neocortex dar, die gemeinsam eine starke emotionale Einheit bilden. Der orbitofrontale Cortex ist ähnlich wie die Amygdala an der Bewertung von Objekten beteiligt. Zudem werden hier emotionale Erinnerungen sowohl abgespeichert wie auch bei der Beurteilung von Umweltinformationen berücksichtigt. Der ventromediale präfrontale Cortex ist ebenfalls mit der Verarbeitung des emotionalen und motivationalen Wertes von externen Reizen betraut. Des Weiteren ist diese Struktur im Rahmen sozialer Kognitionen und hier genauer der *Theory of Mind* eingebunden. Sie ist folglich in die Antizipation emotionaler Reaktionen anderer Menschen involviert.

Oberhalb des Balken (Corpus callosum) liegt der *Gyrus Cinguli*¹⁹⁶. Dieser stellt eine wichtige Verbindung zwischen dem limbischen System und dem Neocortex dar. Es gilt als das zentrale Konfliktzentrum im Gehirn und ist insofern im Fall von Emotions- und Motivkonflikten aktiviert. In seiner Funktion als Konfliktzentrum ist es auch an der Berechnung von Zukunftserwartungen beteiligt. Zudem werden hier Einschätzungen der Schmerzhaftigkeit von Erlebnissen vorgenommen.

Der *Hippocampus*¹⁹⁷, der aufgrund seines äußeren Erscheinungsbildes auch Seeperdchen genannt wird, ist ebenfalls in beiden Hemisphären angesiedelt. Er gilt als emotionales Lernzentrum und beeinflusst *„... was wie in welcher Weise an Inhalten gespeichert wird, wobei der Speicherort die Großhirnrinde und nicht der*

¹⁹³ vgl. Häusel, H.-G. (2005), S. 44 ff.; Roth, G. (2003), S. 21, S. 146 ff.; Kandel, E. R. (1996), S. 619 ff.

¹⁹⁴ Häusel, H.-G. (2005), S. 46 f.

¹⁹⁵ vgl. Häusel, H.-G. (2007), S. 224; Häusel, H.-G. (2012a), S. 280; <http://www.gehirn-atlas.de/belohnungssystem.html> (abgerufen am 08.08.2013)

¹⁹⁶ vgl. Häusel, H.-G. (2007), S. 225 f.; <http://www.gehirn-atlas.de/cingulum.html> (abgerufen am 08.08.2013)

¹⁹⁷ vgl. Roth, G. (2003), S. 22, S. 98 ff.; Schandry, R. (2011), S. 144 ff.; Häusel, H.-G. (2005), S. 48; Häusel, H.-G. (2007), S. 226

*Hippocampus ist.*¹⁹⁸ Auf diese Weise spielt der Hippocampus eine wichtige Rolle bei der Überführung von Gedächtnisinhalten aus dem Kurzzeit- in das Langzeitgedächtnis. Im Sinne der Gedächtniskonsolidierung erfolgt hier Verknüpfung der neuen Inhalte mit bereits abgespeicherten Gedächtnisinhalten.¹⁹⁹ Werden beide Hippocampi entfernt, ist die Bildung neuer Erfahrungen nicht möglich; bereits bestehende Erfahrungen bleiben davon allerdings unberührt. Der Hippocampus ist ebenfalls beteiligt, wenn Objekt- und Situationsmerkmale mit emotionaler Bewertung verknüpft werden. Der *Nucleus Accumbens*²⁰⁰ und sein Stellenwert für den Menschen wurden erstmals durch Selbststimulationsexperimente an Ratten deutlich.²⁰¹ Im Rahmen dieser Untersuchung waren die Ratten in der Lage, über das Betätigen eines Hebels diese spezielle Hirnregion zu stimulieren. Im Ergebnis stimulierten sich die Ratten in einer so hohen Quantität, dass man diese Region mit dem Lustempfinden in Verbindung brachte. Aus diesem Grund wird der Nucleus Accumbens auch als Lustkern bezeichnet. Diese zufällige Erkenntnis wurde im Laufe der Zeit immer wieder bestätigt. Generell dient der Nucleus Accumbens als Sensor für positive Schlüsselreize und ist somit für die Belohnungsvorhersage zuständig. Er ist eine wichtige Zwischenstation auf dem Weg vom Wunsch zur Handlung. Der Nucleus Accumbens ist Teil des Striatum. Oft wird daher auch eine Aktivierung des ventralen Striatums in Belohnungssituationen berichtet.

Beim *Hypothalamus* handelt es sich um den „... „Feldweibel“ im limbischen Systems“²⁰². Wie bereits weiter oben dargestellt, bildet der Hypothalamus zusammen mit der Hypophyse ein übergeordnetes Kontrollsystem. Durch die Hormonausschüttung setzt es quasi die von den zuständigen Teilen des limbischen Systems generierten Bewertungen um, indem es durch die Beeinflussung des vegetativen Nervensystems in der Lage ist, Gefühle und motivationale Verhaltensweisen zu regulieren. Im Ergebnis kommt es zu einer Aktivierung des Körpers.

Eine weitere Struktur, die zum limbischen System gezählt wird und sich unterhalb des Balkens (Corpus callosum) befindet, ist das *Septum (Area septalis)*²⁰³. Es ist beteiligt, wenn es um pessimistische oder ängstliche Einschätzung von gegenwärtigen oder zukünftigen Situationen geht. Auf diese Weise übt das Septum einen hemmenden Einfluss aus. Da dieser Teil des limbischen Systems auch in Folge einer vorhergesagten, aber ausgebliebenen Belohnung aktiviert wird, kann er Hippocampus und Hypothalamus nicht nur anatomisch, sondern auch funktionell verbinden. Durch negative Erfahrungen, in Form nicht erfolgter Belohnung, können Verhaltensweisen oder bisherige Bewertungen besser in Hinblick auf Situationsadäquanz eingeschätzt und im Gedächtnis neu abgespeichert werden. Dieser neu gespeicherte Inhalt bringt auch Konsequenzen für das vegetative System mit sich, das stark durch den Hypo-

¹⁹⁸ Roth, G. (2003), S. 22

¹⁹⁹ vgl. ebenda, S. 98

²⁰⁰ vgl. Spitzer, M. (2007), S. 100 ff.; Bösel, R. M. (2006), S. 103 f.; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 78; Häusel, H.-G. (2007), S. 226 f.

²⁰¹ vgl. Olds, J.; Milner, P. (1954)

²⁰² Häusel, H.-G. (2012a), S. 280

²⁰³ vgl. Häusel, H.-G. (2012a), S. 280; <http://dasgehirn.info/entdecken/anatomie/das-septum> (abgerufen am 08.08.2013)

thalamus beeinflusst wird. Das Septum stellt in diesem Sinne eine wichtige Schnittstelle zwischen Emotionen, Gedächtnis und vegetativem System dar.

Abschließend soll der *Gehirnstamm*²⁰⁴ näher beleuchtet werden. In diesem Zusammenhang wurde bereits erläutert, dass er hinsichtlich der vegetativen Funktionen eine wichtige Rolle inne hat. Unter anderem ist der Gehirnstamm daher auch in die Schlaf-Wach-Aktivierung eingebunden und verknüpft Informationen aus dem Körperinneren mit Außeninformationen zu einem Gesamteindruck. Der Gehirnstamm sorgt für die „*Aufrechterhaltung des emotionalen und physiologischen Gleichgewichts*“²⁰⁵.

Abbildung 13 zeigt einige der vorgestellten Bereiche des limbischen Systems.

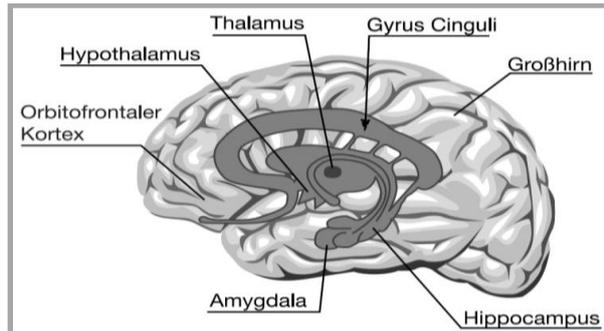


Abbildung 13: Teile des limbischen Systems²⁰⁶

3.2 Die funktionelle Einheit des Gehirns

„Die Leistungen des Gehirns beruhen auf seiner strukturellen und funktionellen Organisation - also darauf, wie Neuronen im Schaltplan des Gehirns vernetzt sind und wie sie zusammenarbeiten und sich gegenseitig beeinflussen.“²⁰⁷ Aus diesem Grund richtet sich der Fokus auf die funktionelle Einheit des Gehirns, die Nervenzelle. Um zu verstehen, wie Nervenzellen funktionieren bzw. wie sie kommunizieren, gilt es, ihren Aufbau darzustellen und die Zellmembran wie auch elektrische Potenziale zu berücksichtigen, die letztlich für die synaptischen Übertragungen, die Kommunikationsform der Nervenzellen, eine entscheidende Rolle spielen. Auch der zweite Zelltyp im Gehirn, die Gliazelle, deren Funktionalität kontrovers diskutiert wird, soll kurz vorgestellt werden.

3.2.1 Die Nervenzelle

Die Nervenzelle bzw. das Neuron stellt eine einzelne Zelle dar. Ein typisches Neuron besteht aus einem Zellkörper mit einem Zellkern sowie aus einer Reihe von faserartigen Fortsätzen, die davon abstrahlen. Grob betrachtet hat jedes Neuron zwei Aufgaben. Es dient sowohl der Informationsübermittlung an andere Zellen als auch dem Informationserhalt von anderen Zellen. Um diesen Aufgaben gerecht zu werden, besteht zwischen Neuronen eine funktionelle Verbindung, die als Synapse bezeichnet

²⁰⁴ vgl. Häusel, H.-G. (2012a), S. 281

²⁰⁵ ebenda, S. 281

²⁰⁶ Häusel, H.-G. (2005), S. 45

²⁰⁷ Thompson, R. F. (2001), S. 29

wird. Die Synapse ist der Ort, an dem ein Neuron Informationen auf andere Zellen überträgt. Ein Neuron im Gehirn kann mehrere tausend synaptische Kontakte mit anderen Nervenzellen aufweisen. Wenn das Gehirn 10^{12} Neuronen enthält, so besitzt es mindestens 10^{15} Synapsen. Es existiert folglich eine schier unbegrenzte Vielfalt an Verknüpfungen.

Wie in Abbildung 14 dargestellt ist, besteht eine Nervenzelle aus einem Zellkörper und etlichen Fortsätzen. Einer dieser Fortsätze ist das Axon (Neurit), die restlichen zählen zu den Dendriten.

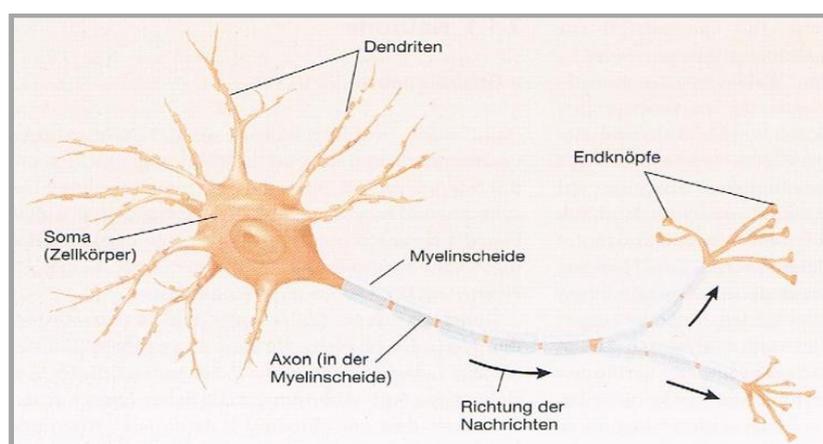


Abbildung 14: Die Nervenzelle²⁰⁸

Das Axon kann sich zwar verzweigen und eigene Fortsätze aussenden, doch an jedem Nervenzellkörper entspringt lediglich ein einziges Axon. Das Axon bzw. seine Verzweigungen enden in besonderen Verdickungen, den synaptischen Endknöpfchen, welche im Endeffekt *Synapsen* mit anderen Zellen ausbilden. In den Endknöpfchen befinden sich *Vesikel*²⁰⁹, die chemische Transmitter enthalten bzw. speichern. Diese Neurotransmitter werden mit Erfüllung entsprechender Bedingungen an den Synapsen freigesetzt. Innerhalb der Nervenzelle weist das Axon zwei Hauptfunktionen auf.²¹⁰ „Zum einen leitet es Information in Form von Aktionspotentialen vom Zellkörper zu den synaptischen Endigungen, woraufhin eine synaptische Übertragung stattfindet.“²¹¹ Zum anderen erfolgt entlang des Axons der sog. anterograde und retrograde Transport.²¹² Hierbei handelt es sich zum einen um den Transport chemischer Substanzen vom Zellkörper zu den Synapsen (anterograd) und umgekehrt von den Synapsen zum Zellkörper zurück (retrograd). Die Beförderung der chemischen Substanzen erfolgt über die *Mikrotubuli*, winzige Leitungen, die sich vom Zellkörper bis zu den Axonendigungen erstrecken. Wie schnell die Informationsweiterleitung abläuft, hängt zunächst einmal von der Größe des Axons ab. Mit zunehmender Dicke steigt auch seine Leistungsfähigkeit.²¹³ Zudem gibt es auch

²⁰⁸ Carlson, N. R. (2004), S. 36

²⁰⁹ vgl. Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 8

²¹⁰ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 36 ff.

²¹¹ ebenda, S. 36

²¹² vgl. Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 20 ff.; Carlson, N. R. (2004), S. 41; Thompson, R. F. (2001), S. 36 ff.

²¹³ vgl. Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 43

*myelinisierte Axone*²¹⁴, d.h. dass das Axon von einer fetthaltigen Substanz namens Myelin umhüllt wird. Liegt eine Myelinisierung vor, wird die Information im Vergleich zu einem nackten Axon um ein Vielfaches schneller weitergeleitet. Der Axonhügel - die Stelle an der das Axon den Zellkörper verlässt - ist nackt. Der grundsätzliche elektrochemische Prozess ist jedoch in marklosen wie auch in myelinisierten Axonen identisch.

Das Gegenstück zum Axon stellen die *Dendriten*²¹⁵ dar. Hierbei handelt es sich um alle übrigen Fasern, die vom Nervenzellkörper abgehen. Durch die Dendriten erhält die Nervenzelle ihr typisches Aussehen, indem sie einem Baum mit vielen Ästen ähnelt. Die genaue Ausgestaltung der Dendriten ist relativ heterogen in Bezug auf die Anzahl und das Ausmaß der Fortsätze. Es gibt sowohl Nervenzellen, die eine stark limitierte Anzahl kurzer Dendriten aufweisen, wie auch solche mit einer sehr hohen Anzahl. Die Funktionalität der Dendriten liegt in der Informationsaufnahme. Hierbei wirkt sich die verhältnismäßig große Anzahl von Dendriten positiv auf die reizaufnehmende Oberfläche der Nervenzelle aus. Da sowohl die Informationsweiterleitung wie auch die Informationsaufnahme bzw. der Signalempfang von anderen Zellen über synaptische Verbindungen mit anderen Nervenzellen erfolgt, sind die Dendriten und der Zellkörper oft von sehr vielen Synapsen übersät. Im Cortex kann man an den einzelnen Dendriten der Nervenzellen diesbezüglich kleine pilzähnliche Vorsprünge erkennen. An jedem dieser Vorsprünge besteht eine Verbindung mit dem Axon einer anderen Nervenzelle. Diese Vorsprünge werden dendritische Dornen bzw. Dornfortsätze genannt.²¹⁶ Ein typisches Neuron in der Großhirnrinde besitzt auf diese Weise Tausende von Synapsen mit anderen Zellen.

In Bezug auf die innere Struktur kann zunächst festgehalten werden, dass jede Zelle von einer Membran, einer Lipid-Doppelschicht, umgeben wird, die sie vom Extrazellulärraum abgrenzt. Diese Membran spielt, mit den in ihr enthaltenen Proteinen, hinsichtlich der Informationsübertragung eine entscheidende Rolle und wird im weiteren Verlauf noch genauer betrachtet. Die Zelle enthält zu einem Großteil *Zytoplasma*²¹⁷, welches einer halbflüssigen, geleeartigen Substanz ähnelt und ca. zu 85 Prozent aus Wasser besteht. In dieser Substanz befinden sich kleine spezialisierte Strukturen, sog. *Organellen*. Da an dieser Stelle nicht auf alle Aspekte eingegangen werden kann, werden hier nur einige für die Betrachtung der neuronalen Aktivität wichtige Organellen betrachtet.

Im Zellkörper aber auch im Axon und im Endknöpfchen befinden sich *Mitochondrien*²¹⁸. Sie haben eine einfache, aber unabdingbare Hauptaufgabe. Sie stellen sog. Bioenergie in Form von Adenosintriphosphat (ATP) zur Verfügung und können daher

²¹⁴ vgl. Kirchbaum, C. (2008), S. 190; Thompson, R. F. (2001), S. 46, S. 77; Schandry, R. (2011), S. 73

²¹⁵ vgl. Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 48; Thompson, R. F. (2001), S. 40 ff.; Schandry, R. (2011), S. 55

²¹⁶ vgl. Abbildung 15: Die Nervenzelle, Zellkörper, Synapse an Synapse

²¹⁷ vgl. Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 4 f.

²¹⁸ vgl. Schandry, R. (2011), S. 47; Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 5 f.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 39 f.; Thompson, R. F. (2001), S. 35

als die „*Kraftwerke der Zelle*“²¹⁹ bezeichnet werden. ATP ist ein Molekül und stellt eine universelle Form unmittelbar verfügbarer Energie dar. Die meisten Prozesse innerhalb der Zelle benötigen Energie.²²⁰ Eine Ausnahme stellt das sog. Aktionspotenzial bzw. die Weiterleitung eines Aktionspotenzials dar; hierfür wird keine Energie benötigt. Dieser allgemeine Mechanismus mit dessen Hilfe Axone Information vom Zellkörper zu den Endigungen transportieren, wird im weiteren Verlauf noch genauer thematisiert. Neben den Mitochondrien existieren noch weitere wichtige Strukturen innerhalb der Zelle. Das *Endoplasmatische Reticulum (ER)*²²¹ ist eine Hohlraumstruktur, die einen Großteil des Zytoplasmas in der Zelle durchzieht. Ist es mit Ribosomen, Komplexen aus Proteinen, besetzt, so wird es als raues ER bezeichnet. Der *Golgi-Apparat*²²² stellt ebenfalls ein zellinternes Membransystem dar und erfüllt gemeinsam mit dem rauen ER die wichtige Funktion, chemische Substanzen zu produzieren und zu speichern.²²³ Im rauen ER erfolgt hierfür zuerst die Synthese der Substanzen. In einem weiteren Schritt werden die Substanzen dann im Golgi-Apparat im Sinne einer Speicherung in kleinen Vesikeln verpackt. In Form von Vesikeln werden sie abschließend über die Mikrotubuli das Axon entlang in die synaptischen Endigungen transportiert und für den Einsatz gelagert. Wie noch zu erläutern ist, nehmen diese chemischen Substanzen eine zentrale Rolle im Rahmen der neuronalen Kommunikation ein.

Abbildung 15 zeigt zusammenfassend die beschriebenen charakteristischen Eigenschaften einer Nervenzelle.

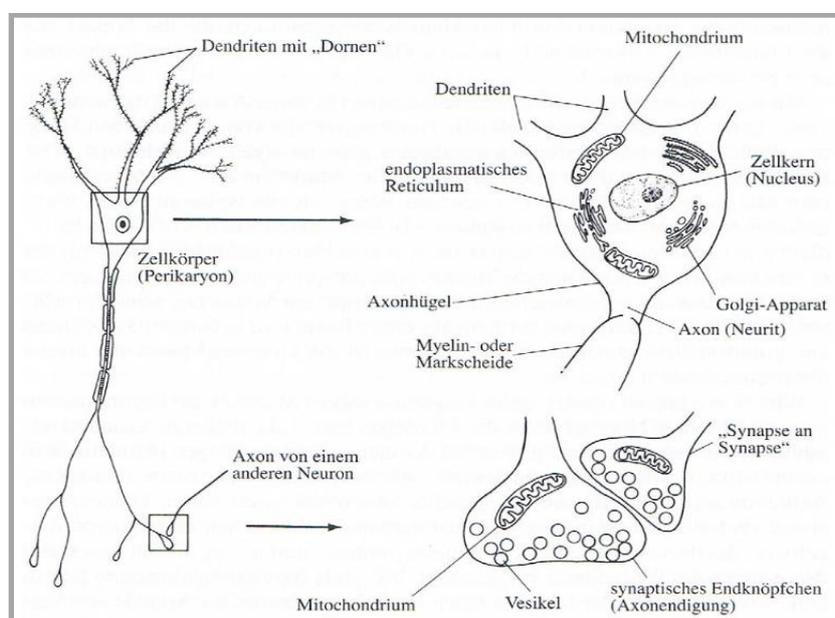


Abbildung 15: Die Nervenzelle, Zellkörper, Synapse an Synapse²²⁴

²¹⁹ Schandry, R. (2011), S. 47

²²⁰ Hierauf wird noch genauer in *Kapitel 5.1.1 Neurovaskuläre Kopplung* eingegangen.

²²¹ vgl. Schandry, R. (2011), S. 48

²²² vgl. ebenda, S. 48 f.

²²³ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 36

²²⁴ ebenda, S. 34

3.2.2 Die Nervenzellmembran, Ruhe- und Aktionspotenzial

Das Aktionspotenzial stellt neben der synaptischen Übertragung²²⁵ einen der grundlegenden spezialisierten Prozesse in bzw. zwischen Nervenzellen dar. Um ihre Funktionsweise zu verstehen, bedarf es zunächst einer genaueren Betrachtung der zugrunde liegenden Eigenschaften der Neuronenmembran.

Die Fähigkeit der Nervenzelle, Informationen weiterzuleiten und auf andere Zellen zu übertragen, ist der Beschaffenheit ihrer Außenmembran geschuldet. Der allgemeine Aufbau der *Neuronenmembran* entspricht dem anderer Zellmembranen²²⁶. Auch hier dient die Zellwand dem Schutz der Zelle vor schädlichen Substanzen aus dem Extrazellulärraum. Sie schottet das Zellinnere allerdings nicht komplett vom Zelläußeren ab. Dadurch, dass die Membran von Ionenkanälen durchzogen ist, können bestimmte geladene Teilchen, sog. Ionen²²⁷, ins Zellinnere hineinströmen bzw. aus dem Zellinneren hinausströmen. Wie bereits erwähnt, trennt die Membran das Zellinnere vom Zelläußeren, wobei zwischen beiden ein Spannungsunterschied besteht. Infolge dessen weist jede Nervenzelle über ihre Membran eine elektrische Spannung von ca. einem Zehntel Volt auf²²⁸.

Allgemein betrachtet ist die Zellmembran eine aus zwei dünnen Schichten bestehende Struktur. Auf der einen Seite ist sie relativ flexibel. In Folge dessen kann sie ihre Form leicht verändern. Auf der anderen Seite ist sie stabil genug, um schädlichen Substanzen den Zugang in die Zelle zu verweigern. Der Austausch zwischen einer Zelle und ihrer Umgebung erfolgt allein über die Zellmembran. Für die Erfüllung ihrer Aufgaben ist es sehr hilfreich, dass sich die Neuronenmembran zu einem Großteil aus Fettsäuren zusammensetzt. Die Fettsäuren, in diesem Fall auch Phospholipide genannt, bestehen jeweils aus einem Phosphorsäurekopf und zwei Fettsäureschwänzen, die Kohlenwasserstoffketten darstellen. Gerade die Schwänze dieser Fettsäuren meiden den Kontakt mit Wasser. Tritt eine Schicht solcher Fettsäuren in Kontakt mit Wasser, so orientieren sich die Phosphorsäureköpfchen zum Wasser hin, wohingegen sich die Fettsäureschwänzchen vom Wasser abwenden. Fügt man nun eine weitere Schicht mit Fettsäuren sowie mehr Wasser hinzu, so dass die beiden Fettsäureschichten komplett von Wasser umgeben sind, bildet sich im Ergebnis eine symmetrische Doppelschicht. Die Köpfchen wenden sich jeweils nach außen dem oberhalb und unterhalb befindlichen Wasser zu, während die Schwänze quasi das Schichtinnere darstellen, indem sie sich zwischen den beiden Schichten von Phosphorsäureköpfchen anordnen.²²⁹ In Bezug auf die Zellmembran einer Nervenzelle liegt eine vergleichbare Situation vor. Da sie sowohl innerhalb wie auch außerhalb der Zelle mit Wasser konfrontiert ist, bildet diese Lipid-Doppelschicht die Grundstruktur der Zellmembran.²³⁰

²²⁵ vgl. Kapitel 3.2.3 Die synaptische Übertragung

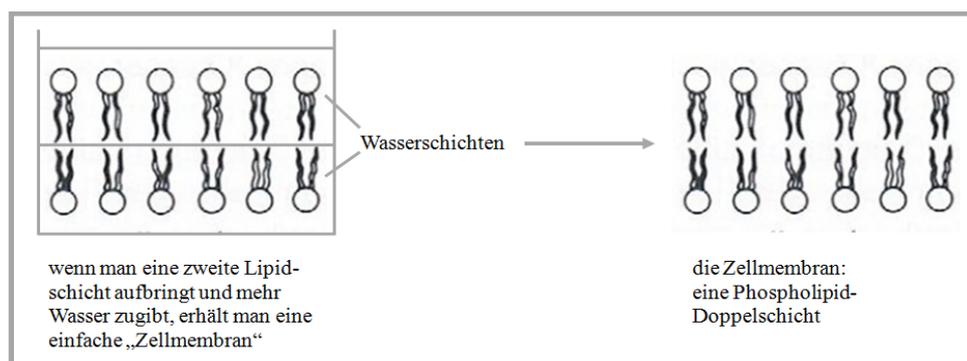
²²⁶ vgl. Kirchbaum, C. (2008), S. 300

²²⁷ vgl. Kirchbaum, C. (2008), S. 143; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 61

²²⁸ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 53

²²⁹ vgl. Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 15; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 14; Schandry, R. (2011), S. 50; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 61 f.; Thompson, R. F. (2001), S. 53 ff.

²³⁰ vgl. Abbildung 16: Lipid-Doppelschicht

Abbildung 16: Lipid-Doppelschicht²³¹

In Bezug zur Neuronenmembran besteht eine zentrale Eigenschaft darin, dass sie durch sehr kleine, hoch selektive Durchgängen gekennzeichnet ist. Bei diesen *Ionenkanälen*²³² „... handelt es sich nicht um einfache Löcher, sondern um spezielle Membranproteine, die jeweils eine Art Tunnel durch die gesamte Lipid-Doppelschicht bilden.“²³³ Auf der einen Seite ist dieser Durchgang viel zu eng, als dass ihn größere Strukturen, wie bspw. Zuckermoleküle, passieren können, auf der anderen Seite ist er weit genug, um kleinere Ionen hindurch zu lassen. Die im Rahmen der Erregung von Nervenzellen und der Weiterleitung von Informationen relevanten Ionen sind die Na^+ -, Cl^- -, K^+ - und Ca^{2+} -Ionen. „Die elektrische Ladung eines Atoms hängt von der Differenz zwischen der Anzahl der Protonen und der Elektronen ab.“²³⁴ Natriumionen fehlt ein Elektron²³⁵, was dazu führt, dass diese Ionen positiv geladen sind. Dies ist auch an der Schreibweise Na^+ zu erkennen. Im Gegensatz zu den Natriumionen besitzen Chlorionen ein zusätzliches Elektron. Sie weisen daher eine einfache negative Ladung auf. Die dritte relevante Ionenart, die Kaliumionen, stellen Ionen mit einer einfachen positiven Ladung dar und bei den Calciumionen, Ca^{2+} , handelt es sich sogar um zweifach positiv geladene Ionen. Anders als die drei erstgenannten Ionen, kommen die Calciumionen erst im Rahmen der synaptischen Übertragung zum Tragen. Aus diesem Grund wird ihre Rolle bzw. Wirkung erst im weiteren Verlauf thematisiert. Ionenkanäle reagieren hochselektiv auf die einzelnen Ionen²³⁶, so dass für jede der genannten Ionenarten eigene Kanäle existieren. Die Verteilung der spezifischen Ionenkanäle ist allerdings in den einzelnen Abschnitten der Nervenzelle sehr unterschiedlich. Die Dichte der Kanäle ist i.d.R. nicht so hoch. „Es liegen Schätzungen vor, nach denen auf eine Million Membranmoleküle gerade ein Natriumkanal kommt. [...] Über die gesamte Membran gesehen gibt es jedoch sehr viele solcher Kanäle.“²³⁷ Wie Abbildung 17 zu entnehmen ist, kann in Bezug auf die Axonmembran eine grobe Unterscheidung der Ionenkanäle in offene und verschlossene Kanäle vorgenommen werden. Ein offener Ionenkanal verfügt hierbei nicht über

²³¹ Thompson, R. F. (2001), S. 55

²³² vgl. Kirschbaum, C. (2008), S. 143 f.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 65 f.; Kandel, E. R. (1996), S. 122 ff.; Thompson, R. F. (2001), S. 56 ff.

²³³ Thompson, R. F. (2001), S. 56

²³⁴ Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 61

²³⁵ Ein Elektron ist ein negativ geladenes Teilchen.

²³⁶ vgl. Schandry, R. (2011), S. 68 f.

²³⁷ Thompson, R. F. (2001), S. 57 f.

einen Verschlussmechanismus und ist insofern theoretisch ständig durchlässig, wohingegen ein verschlossener Ionenkanal ein spannungsgesteuertes Tor aufweist, das in Ruhephasen geschlossen ist. Wird eine bestimmte spannungsbezogene Schwelle überschritten, springen diese Tore auf und ermöglichen den entsprechenden Ionen den Ein- oder Ausstrom in oder aus der Zelle. Allgemein können Ionenkanäle gänzlich dem verschlossenen oder offenen Typen angehören. Oftmals verfügen spezifische Ionenkanäle entlang der Axonmembran sowohl über offen als auch über verschlossene Kanäle.

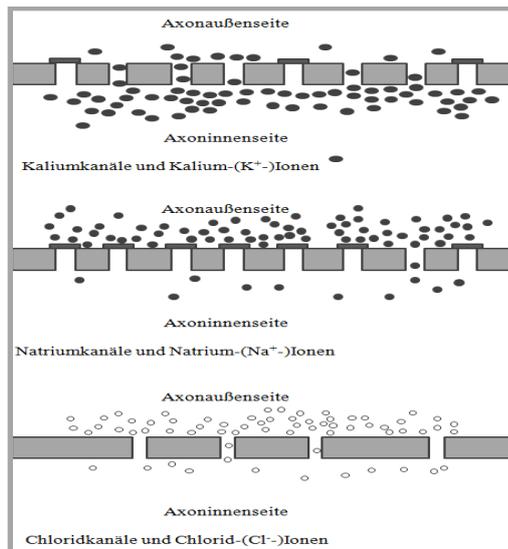


Abbildung 17: Ionenkanäle in Bezug zu den entsprechenden Ionen²³⁸

Wie Abbildung 17 zeigt, gehören Kaliumkanäle hauptsächlich zum offenen Typ, d.h. dass eine beträchtliche Menge K^+ -Ionen durch die Membran hin und her fließen kann. Die Natriumkanäle sind größtenteils geschlossen und die Chloridkanäle i.d.R. offen. Fraglich ist, ob bestimmte Ionen, z.B. Na^+ -Ionen, gelegentlich durch offene K^+ -Kanäle fließen. „Allgemein verhält sich die Membran allerdings so, als seien die Ionenkanäle typspezifisch.“²³⁹

Wie bereits erwähnt, weisen die meisten Zellen in Ruhephasen über ihre Membran einen verhältnismäßig großen Spannungsunterschied von fast einem Zehntel Volt auf. Dieses sog. *Ruhepotenzial* kommt durch das Vorhandensein der Ionenkanäle und die Aktivität der sog. Natrium-Kalium-Pumpe zustande. Im Folgenden geht es um die Mechanismen, über die solche Ionenkanäle zum einen das Ruhepotenzial und zum anderen das Aktionspotenzial einer Membran erzeugen bzw. regulieren. In Bezug auf die Nervenzelle lassen sich folglich zwei Zustände unterscheiden. Zum einen kann sich ein Neuron in einer Ruhephase befinden, d.h. dass es nicht stimuliert wird und in diesem Sinne keine Information weiterleitet. Zum anderen kann neuronale Aktivität vorliegen; hier wird die Nervenzelle entsprechend stimuliert und leitet in der Folge eine Information weiter.

²³⁸ Thompson, R. F. (2001), S. 58

²³⁹ ebenda, S. 59

Während einer Ruhephase liegt zwischen Zellinnerem und Extrazellulärraum ein Spannungsunterschied von ungefähr -70mV vor.²⁴⁰ Dieser Wert wird als *Membran- bzw. Ruhepotenzial* bezeichnet und weist diesen konstanten Wert meist über einen längeren Zeitraum auf. Der negative Spannungsunterschied²⁴¹ kommt dadurch zustande, dass sich im Zellinneren eine beträchtliche Menge an Proteinen mit einer negativen Nettoladung befinden, außerhalb der Zelle jedoch nur wenige vorhanden sind. Zu diesem Ungleichgewicht kommt es, da die negativ geladenen Proteine zu groß sind, um die Zelle durch die relativ kleinen Ionenkanäle zu verlassen. Die Zellmembran ist für sie nicht permeabel.

Beim Ruhepotenzial handelt es sich um ein Fließgleichgewicht, da die Nervenzelle durch die Existenz von offenen Ionenkanälen nach außen hin nicht abgeschlossen ist. Um dieses Gleichgewicht herzustellen, werden die Diffusionskraft, die elektrostatische Kraft und die Natrium-Kalium-Pumpe benötigt. In Bezug auf die Nervenzelle ist die *Diffusionskraft*²⁴² diejenige Kraft, die bewirkt, dass sich die einzelnen geladenen Teilchen gleichmäßig auf das Zellinnere und Zelläußere verteilen. Die *elektrostatische Kraft*²⁴³ sorgt dafür, dass sich Teilchen mit gleicher Ladung voneinander abstoßen und solche mit entgegengesetzter Ladung anziehen. Erfolgt aufgrund einer Zellaktivierung eine Störung des Fließgleichgewichts, so wird die ursprüngliche Ionenkonzentration zellintern und -extern durch die *Natrium-Kalium-Pumpe* wiederhergestellt. Aus diesem Grund tragen alle drei Kräfte zur Entstehung, Aufrechterhaltung und Wiederherstellung des Ruhepotenzials bei.

Wie aus der bisherigen Ausführung hervorgeht, spielt die Durchlässigkeit der einzelnen Ionenkanäle eine entscheidende Rolle für die Entstehung des Ruhepotenzials. Da die Entstehung des Ruhepotenzials im Wesentlichen einen passiven Vorgang darstellt, sind die zeitweise geschlossenen Ionenkanäle hierbei ohne Bedeutung. Zentral sind die ständig geöffneten Kanäle. Wie in Abbildung 17 skizziert, gibt es in Hinblick auf die Kaliumkanäle mehr offene als geschlossene Kanäle. Kalium kann daher relativ leicht in die Zelle einströmen. Im Vergleich dazu müssten die Chlorionen noch leichter in die Zelle gelangen können, denn sie gehören generell dem offenen Kanaltyp an. Allerdings weist die Neuronenmembran deutlich weniger Chlorionenkanäle auf. Zudem gibt es aufgrund der elektrostatischen Kraft ein geringeres Bestreben der Cl^- -Ionen in das ohnehin negativere Zellinnere zu gelangen. Aus diesem Grund befinden sich deutlich mehr Chlorionen außerhalb der Zelle. Im Endeffekt „vermag K^+ die Membran ungefähr doppelt so leicht zu durchdringen wie Cl^- .“²⁴⁴ Die am häufigsten vorkommenden Ionenkanäle sind die Na^+ -Kanäle. Allerdings kommt es hier sehr selten vor, dass ein Kanal offen ist, so dass diese Ionen und Ionenkanäle nur einen minimalen Einfluss auf die Entstehung eines Ruhepotenzials haben.

²⁴⁰ vgl. Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 85

²⁴¹ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 59 ff.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 69 f.; Kandel, E. R. (1996), S. 144 f.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 35 f.; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 85 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 53

²⁴² vgl. Schandry, R. (2011), S. 65 f.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 15 f.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 18 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 52; Roth, G. (2010), S. 57 ff.

²⁴³ vgl. Schandry, R. (2011), S. 61, S. 64 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 52; Roth, G. (2010), S. 57 ff.

²⁴⁴ Thompson, R. F. (2001), S. 62

Na^+ -Ionen findet man ähnlich wie die Cl^- -Ionen vorwiegend außerhalb der Zelle allerdings aufgrund der Tatsache, dass Na^+ -Kanäle generell zum geschlossenen Kanaltyp zählen. Im Ergebnis hat es Na^+ in der Phase eines Ruhepotenzials „... zwanzigmal schwerer, die Membran zu passieren, als K^+ “²⁴⁵. Das Ruhepotenzial ist folglich in erster Linie ein K^+ -Diffusionspotenzial. Diese Abhängigkeit ist jedoch, wie beschrieben, nicht perfekt.

Das Ruhepotenzial liegt bei ca. -70mV und kann nur unter der Bedingung aufrecht erhalten werden, dass sich die Verteilung der Ionen im Zellinneren und -äußeren nicht entscheidend verändert. Da allerdings immer ein paar wenige offene Na^+ -Ionenkanäle vorhanden sind, „... können trotz der geringen Permeabilität der Nervenzellmembran für die positiven Natriumionen ständig einige wenige dieser Ionen in die Zelle diffundieren. Das negative Potenzial des Zellinneren müsste deshalb langsam zurückgehen“²⁴⁶. Der Na^+ -Einstrom senkt in diesem Fall das Ruhepotenzial und führt zugleich zu einem entsprechenden Ausstrom von K^+ -Ionen. Logischerweise kann das Ruhepotenzial unter rein passiven Bedingungen nicht aufrecht erhalten werden. Das System befindet sich nicht im Gleichgewicht. Die intra- und extrazellulären Konzentrationen beider Ionenarten müssen daher regelmäßig abnehmen bzw. steigen. Diesen Vorgang regelt die *Natrium-Kalium-Pumpe*²⁴⁷. Abbildung 17²⁴⁸ ist zu entnehmen, dass weniger Na^+ -Ionen im Inneren der Zelle vorhanden sind als im Extrazellulärraum und dass umgekehrt die K^+ -Ionenkonzentration im Zelläußeren geringer ist als im Zellinneren. Besagte Pumpe ist aus diesem Grund dafür verantwortlich, beide Ionentypen entgegen ihres jeweiligen Konzentrationsgefälles zu transportieren. Wie Abbildung 18 beispielhaft zeigt, werden Na^+ -Ionen aus der Zelle hinaus und K^+ -Ionen in die Zelle hinein gepumpt. Um dies bewerkstelligen zu können, benötigt die Na^+ - K^+ -Pumpe eine relativ große Menge an ATP. Sie arbeitet nicht besonders schnell, aber sie ist quasi ständig dabei, K^+ -Ionen in die Zelle herein- und Na^+ -Ionen aus der Zelle heraus zu befördern, um die Verteilung dieser beiden Ionenarten konstant zu halten.

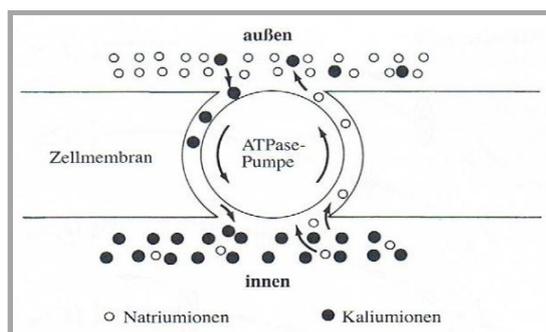


Abbildung 18: Natrium-Kalium-Pumpe²⁴⁹

²⁴⁵ Thompson, R. F. (2001), S. 63

²⁴⁶ Schandry, R. (2011), S. 69 f.

²⁴⁷ vgl. Schandry, R. (2011), S. 69 ff.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 18 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 54

²⁴⁸ Abbildung 17: Ionenkanäle in Bezug zu den entsprechenden Ionen

²⁴⁹ Thompson, R. F. (2001), S. 65

Das Ruhepotenzial beschreibt den Zustand, in dem eine Zelle nicht stimuliert wird und insofern keine Aktivität aufweist. In Bezug auf die Gehirnaktivität existiert mit der neuronalen Aktivität der eigentlich interessierende Zustand einer Nervenzelle. Hierzu sei kurz angemerkt, dass es diesen Zustand ohne das Ruhepotenzial nicht geben würde. Die Aktivität einer einzelnen Nervenzelle äußert sich in Form eines *Aktionspotenzials (AP)*. Geht es um die Kommunikation zwischen Nervenzellen, so zeigt sie sich in einer *synaptische Übertragung*. Da an dieser Stelle zunächst die intra-neuronale Perspektive im Vordergrund steht, werden hier verschiedene Aspekte in Zusammenhang mit dem Aktionspotenzial erläutert und nachfolgend im Rahmen von Kapitel 3.2.3²⁵⁰ genauer auf die synaptische Übertragung im Sinne der interneuronalen Perspektive eingegangen.

Wird eine Nervenzelle von mehreren Neuronen ausreichend stark angeregt, entsteht im Ergebnis ein Aktionspotenzial. Hierbei handelt es sich um eine deutliche Spannungsveränderung. Diese Veränderung erfolgt sehr schnell und betrifft zunächst nur den Axonhügel, den Ort an dem das Axon den Zellkörper verlässt.²⁵¹ Nachdem die Spannungsveränderung einmal an diesem kleinen Bereich entstanden ist, wird sie automatisch das Axon entlang bis hin zu den Axonendigungen weitergeleitet. Dies ist der grundlegende Mechanismus mit dessen Hilfe Axone Informationen vom Zellkörper zu den Endigungen transportieren. Die Weiterleitung eines AP erfolgt in einer Geschwindigkeit von weniger als einem bis ca. 100 Metern pro Sekunde. Da sich die meisten Nervenfortsätze nur über wenige Millimeter bzw. Zentimeter erstrecken, ist die Geschwindigkeit als hoch zu bewerten. Auch im Falle etwas längerer Axone ist dies immer noch schnell genug, um effizient Informationen weiterzuleiten.²⁵²

Das Aktionspotenzial entsteht durch einen rapiden Anstieg der Spannung über die Membran. In Abbildung 19 ist dieser Verlauf dargestellt. Alles beginnt mit einer Reizung, die für einen Anstieg des Membranpotenzials sorgt. Grundlegend für diesen Anstieg ist die Depolarisation. Diese wird durch einen entsprechenden Reiz ausgelöst und bringt allgemein eine positive Veränderung des Ruhepotenzials mit sich. Es erfolgt ein Anstieg von -70mV bis auf einen Höchstwert von 20-30mV. Den Bereich des Anstiegs von 0-20mV nennt man auch Überschuss bzw. Overshoot. Ist der Höchstwert erreicht, kommt es zu einem schnellen Spannungsabfall, der sog. Repolarisation. Im Zuge dieser Rückbildungsphase sinkt die Spannung sogar leicht unter das Ruheniveau und erreicht dieses erst allmählich wieder. Nimmt das Membranpotenzial einen geringeren Wert als das Ruhepotenzial an, so spricht man von einer Hyperpolarisation. Der schnelle Anstieg der Membranspannung wird auch als Spike und die darauffolgende Phase als Nachpotenzial bezeichnet.

²⁵⁰ Kapitel 3.2.3 Die synaptische Übertragung

²⁵¹ In aller Regel entsteht ein Aktionspotenzial am Axonhügel. Es ist aber durchaus möglich, über einen geeigneten elektrischen Impuls eine Erregung an einer Stelle entlang des Axons zu erreichen.

²⁵² vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 65 f.

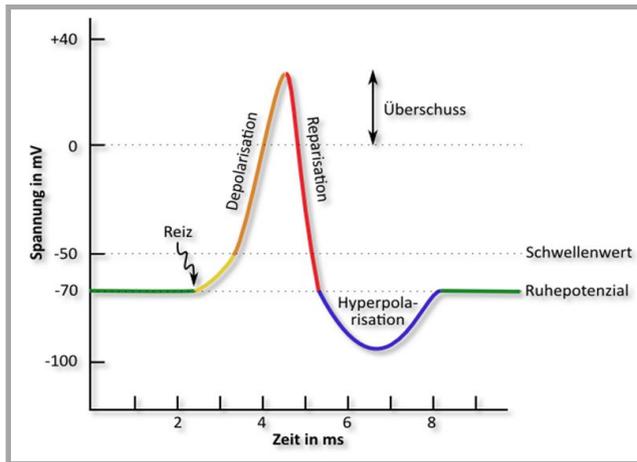


Abbildung 19: Verlauf eines Aktionspotenzials²⁵³

Im Zusammenhang mit dem Ruhepotenzial wurde bereits berichtet, dass die meisten Na^+ -Ionenkanäle zu dem geschlossenen Kanaltyp gehören. Die Zellmembran ist in diesem Zustand folglich relativ undurchlässig für Na^+ -Ionen. Wird in Folge einer Reizung ein AP am Axonhügel ausgebildet, öffnen sich sprunghaft alle verschlossenen Na^+ -Tore und Na^+ strömt nun ungehindert in die Zelle hinein. „Da die Na^+ -Konzentration auf der Membranaußenseite sehr viel höher ist als innen, existiert eine starke Diffusionskraft, die die Natriumionen in die Zelle drängt.“²⁵⁴ Da sich im Zellinneren relativ große negativ geladene Proteinmoleküle befinden, die aufgrund ihrer Größe nicht durch die Ionenkanäle aus der Zelle austreten können, ist das Zellinnere im Vergleich zum Extrazellulärraum negativer geladen. Die durch die geöffneten Tore einströmenden Na^+ -Ionen weisen eine positive Ladung auf. Somit wirkt aufgrund des negativeren Zellinneren zusätzlich die elektrostatische Kraft auf die Na^+ -Ionen. Sie strömen daher mit einer hohen Geschwindigkeit in die Zelle und lassen das Membranpotenzial in kürzester Zeit auf einen Wert nahe des Na^+ -Gleichgewichtspotenzials von ca. 20-30mV ansteigen. „Ungefähr gleichzeitig mit der stärksten Annäherung an das Na^+ -Gleichgewichtspotenzial [...] schließen sich die Natriumkanäle wieder.“²⁵⁵ Durch die Schließung der Kanäle ist es Na^+ nicht mehr möglich die Zellmembran zu passieren. Die Repolarisation dieses erregten Membranabschnitts beginnt und nach kurzer Zeit pendelt sich an dieser Stelle der Membran wieder das Ruhepotenzial ein.

Neben der Öffnung und Schließung der Na^+ -Ionenkanäle kommt es zu einer weiteren Veränderung, die die Ausbildung eines AP mit sich bringt und die an der Wiederherstellung des Ruhepotenzials beteiligt ist. Die meisten K^+ -Kanäle sind zwar generell torlos, dennoch bewirkt das Öffnen der wenigen geschlossenen Kanäle, dass K^+ -Ionen nun im Vergleich zum Ruhenniveau noch einfacher aus der Zelle herausströmen. Da der Einstrom von Na^+ -Ionen zur Depolarisation und allgemein zur Erhöhung des Membranpotenzials führt, unterstützt der Ausstrom der ebenfalls positiv gelade-

²⁵³ <http://www.jagemann-net.de/biologie/bio13/neurobiologie/aktionspotenzial/aktionspotenzial.php> (abgerufen am 13.08.2013)

²⁵⁴ Thompson, R. F. (2001), S. 68

²⁵⁵ ebenda, S. 68

nen K^+ -Ionen den Prozess der Repolarisation²⁵⁶. Wie Abbildung 20 veranschaulicht, geht das Öffnen und Schließen der K^+ -Tore langsamer von statten als das der Na^+ -Tore.

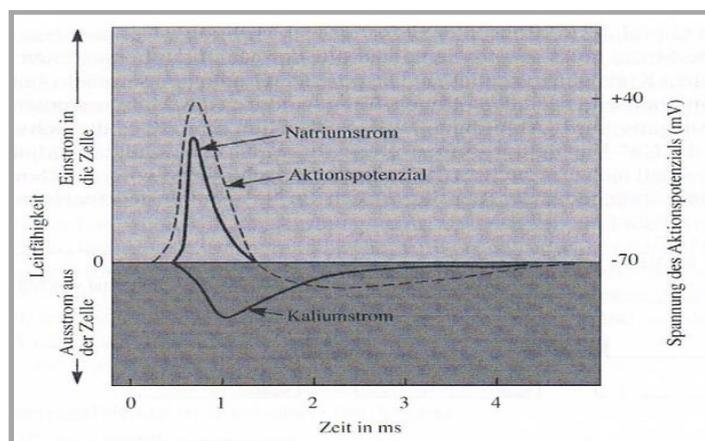


Abbildung 20: Ionenein- und -ausstrom im Verlauf eines Aktionspotenzials²⁵⁷

In Abbildung 20 ist zu erkennen, dass der Na^+ -Einstrom und der K^+ -Ausstrom relativ zeitgleich erfolgen. Trotz der Tatsache, dass sich die Kanaltore für beide Ionen parallel öffnen, zeigt sich zunächst ein dominanter Einfluss der Na^+ -Tore, da das Membranpotenzial erst einmal bis zum positiven Maximalwert ansteigt. Ursächlich dafür ist, dass die „*Na⁺-Konzentrationen auf beiden Seiten der Membran im Ruhezustand deutlich weiter vom Gleichgewicht entfernt sind; folglich ist die Kraft, die Na⁺-Ionen nach innen bewegt, viel größer als die, die K⁺-Ionen hinausströmen lässt.*“²⁵⁸ Die Wirkung des K^+ -Ausstroms zeigt sich erst etwas zeitversetzt. Im Gegensatz zu den Na^+ -Toren bleiben die K^+ -Tore länger geöffnet. Nachdem die Na^+ -Kanäle wieder verschlossen sind und keine positiven Ladungen mehr in die Zelle einströmen, sinkt das Membranpotenzial langsam ab bis es bei einer Spannung von ca. -75mV angekommen. Nun schließen sich auch die K^+ -Kanäle und kurze Zeit später liegt mit Hilfe der Na^+ - K^+ -Pumpe erneut das Ruhepotenzial in Höhe von -70mV vor.

In der Zeitspanne zwischen dem Membranpotenzialanstieg, dem Erreichen des Höhepunktes und dem Abklingen des Aktionspotenzials kann eine Nervenzelle nicht erneut stimuliert werden, d.h. während des beschriebenen Zeitraumes kann kein weiteres Aktionspotenzial ausgelöst werden. Die sog. *Refraktärzeit*²⁵⁹ kann als zelleigene Sicherheitsmaßnahme aufgefasst werden, die die permanente Erregung einer Zelle verhindert und zudem dazu führt, dass sich das einmal ausgebildete Aktionspotenzial nicht zurück zum Zellkörper bewegt, sondern immer weiter bis in die Axonendigungen läuft. In Bezug auf die Refraktärzeit kann zwischen zwei Phasen unterschieden werden. Wie bereits dargestellt wurde, kann die Nervenzelle nicht erneut stimuliert werden, wenn ein AP ausgebildet bzw. zurückgebildet wird. Dies gilt

²⁵⁶ vgl. Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 33 f.

²⁵⁷ Thompson, R. F. (2001), S. 75

²⁵⁸ ebenda, S. 70

²⁵⁹ vgl. Menche, N. (2007), S. 130 f.; Schandry, R. (2011), S. 75 f.; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 91 f.

genau genommen nur bis in die frühe Repolarisationsphase. Man bezeichnet diese Phase daher als *absolute Refraktärzeit*. Ist die Repolarisation allerdings etwas weiter fortgeschritten, besteht theoretisch wieder die Möglichkeit einer erneuten Erregung. Im Rahmen dieser *relativen Refraktärzeit* ist es zwar möglich, aber auch schwieriger, ein Aktionspotenzial auszulösen. Es bedarf in dieser Phase folglich einer höheren Reizung als dies im Falle eines bestehenden Ruhepotenzials nötig wäre.

Die rasche Abnahme des Na^+ -Stroms bei aufrecht erhaltener Depolarisation wird Inaktivierung genannt. Dies ist die Ursache für die Refraktärzeit. Die Inaktivierung des Na^+ -Systems wird zwar durch die Repolarisation im Endeffekt wieder aufgehoben, dieser Vorgang benötigt jedoch einige Millisekunden. Während dieser Zeit ist das Natriumsystem, und daher auch die Zelle allgemein, noch nicht bzw. nur eingeschränkt erneut erregbar. Es lassen sich in diesem Sinne drei Kanalzustände in Bezug auf Na^+ unterscheiden.²⁶⁰ Der erste Zustand beschreibt den Übergang von *geschlossen-aktivierbar* zu *offen-aktiviert* durch die Depolarisation. Die Depolarisation beschleunigt allerdings auch den Übergang in den *geschlossen-inaktivierten* Zustand. Durch die Repolarisation entsteht dann wieder der Ursprungszustand des *geschlossen-aktivierbaren* Zustands.

Nachdem die Aus- und Rückbildung eines Aktionspotenzials dargestellt wurden, ist anschließend die Frage zu klären, warum sich die Na^+ - und K^+ -Kanäle überhaupt öffnen.

Bei den Ionenkanälen entlang des Axons handelt es sich um *spannungsgesteuerte Kanäle*. Sie reagieren folglich auf Spannungsveränderungen. Wie noch genauer im Zusammenhang mit der synaptischen Übertragung zu erörtern ist, entsteht diese Spannungsveränderung im Inneren der Zelle am Axonhügel als Ergebnis einer synaptischen Übertragung. Man kann sich die Tore mit einem elektrisch kontrollierten Schalter und einem Federmechanismus vorstellen.²⁶¹ Da die Zellmembran der Nervenzelle ein sog. *Schwellenpotenzial*²⁶² besitzt, das bei ca. -60mV liegt, werden die Schalter automatisch bei Überschreitung der Schwelle betätigt und die entsprechenden Kanäle geöffnet. „Sobald sich das Membranpotenzial seinem Maximum [...] nähert, wird ein anderer Schalter- und Feder-Mechanismus aktiviert, der die Na^+ -Kanäle wieder schließt.“²⁶³ Zusammenfassend kann die Entstehung eines AP mit einer chemischen Reaktion verglichen werden. Um ein AP auszulösen, ist eine Reizung nötig, die in der Lage ist, das Schwellenpotenzial zu überschreiten. Ist das Schwellenpotenzial erst einmal überschritten, erfolgen alle Teilprozesse von der Öffnung der Kanaltore über die Erreichung des Peaks bis hin zur Wiederherstellung des Ruhepotenzials nach einem vorgegebenen Ablaufplan. „*Unterschwellige Reize erzeugen ein elektrotonisches Potenzial, das auch als Elektrotonus bezeichnet wird.*“²⁶⁴ In einem solchen Fall wird das Schwellenpotenzial nicht überschritten, die Tore blei-

²⁶⁰ vgl. Clauss, W.; Clauss, C. (2009), S. 101 ff.

²⁶¹ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 71

²⁶² vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 71; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 88; Schandry, R. (2011), S. 74 f.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 26

²⁶³ Thompson, R. F. (2001), S. 71

²⁶⁴ Clauss, W.; Clauss, C. (2009), S. 103

ben verschlossen und es entsteht kein Aktionspotenzial. Nach dieser leichten Depolarisation wird das Ruhepotenzial relativ schnell wieder hergestellt. „Das Aktionspotenzial stellt also eine Alles-oder-Nichts-Antwort dar. Entweder es entwickelt sich richtig oder gar nicht.“²⁶⁵

Ein weiterer interessanter Punkt im Zusammenhang mit Aktionspotenzialen besteht in der *Weiterleitung bzw. Ausbreitung des Aktionspotenzials* entlang des Axons. Nachdem das Schwellenpotenzial am Axonhügel überschritten wurde, öffnen sich die Ionenkanäle und vor allem Na^+ strömt in die Zelle. Das Membranpotenzial steigt an dieser Stelle bis auf einen Wert von ca. 30mV. „Die positiven Ladungen sammeln sich auf der Membrannenseite nahe den offenen Toren, wodurch das Membranpotenzial hier weniger negativ wird.“²⁶⁶ Durch diese Verschiebung hin zum nächstgelegenen noch im Ruhezustand befindlichen Membranabschnitt wird in diesem Bereich auch das Schwellenpotenzial überschritten. In der Folge öffnen sich nun an diesem Abschnitt alle Ionenkanäle und es kommt auch an diesem Bereich des Axons zur Ausbildung eines AP. Ist an dieser Stelle der Höchstwert des AP erreicht, kommt es im Bereich direkt neben dieser Region auch aufgrund der zellinternen Verschiebung der positiven Ladungen zur Überschreitung des Schwellenpotenzials. Dieser Prozess wiederholt sich so lange, bis das AP Membranabschnitt für Membranabschnitt bis in die Axonendigung weitergeleitet wird. Bei dem beschriebenen Verlauf handelt es sich um eine *kontinuierliche Erregungsleitung*²⁶⁷, die i.V.m. unmyelinisierten Axonen vorliegt und in Abbildung 21 veranschaulicht ist.

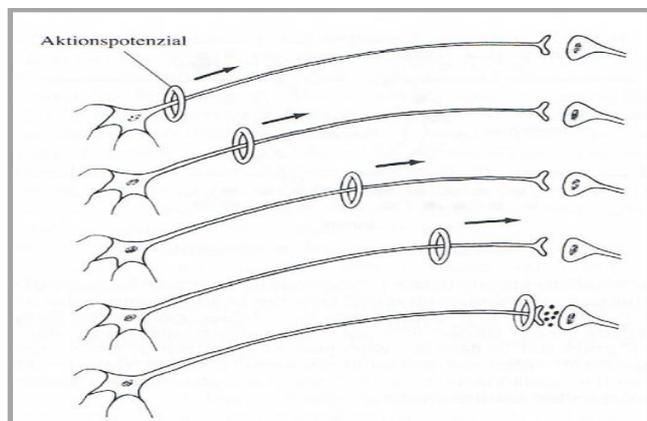


Abbildung 21: Kontinuierliche Weiterleitung eines Aktionspotenzials²⁶⁸

Bei der Weiterleitung des Aktionspotenzials gibt es noch eine zweite Variante, die häufiger vorkommt. Im Falle eines myelinisierten Axons spricht man von einer *saltatorischen Erregungsleitung*²⁶⁹. Ein myelinisiertes Axon²⁷⁰ ist nicht komplett von

²⁶⁵ Thompson, R. F. (2001), S. 71

²⁶⁶ ebenda, S. 76

²⁶⁷ vgl. Schandry, R. (2011), S. 79; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 43; Clauss, W.; Clauss, C. (2009), S. 104 f.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 103 f.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 36 f.

²⁶⁸ Thompson, R. F. (2001), S. 66

²⁶⁹ vgl. Schandry, R. (2011), S. 79 f.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 43 ff.; Clauss, W.; Clauss, C. (2009), S. 105; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 105 ff.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 39 f.

²⁷⁰ vgl. Abbildung 19: Die Nervenzelle

einer Markhülle umgeben, sondern weist zwischendurch kleinere Unterbrechungen auf. Dies sind die sog. *Ranvier-Schnürringe*. Bei der Messung des Aktionspotenzials durch Verschiebung einer Ableitungselektrode entlang der Nervenfasern erfährt die Fortleitung des Aktionspotenzials nur jeweils an den Schnürringen eine Verzögerung. Dazwischen bleibt die Latenz des Aktionspotenzials unverändert, wie Abbildung 22 in Form der roten Markierungen zum Ausdruck bringt. Dies ist charakteristisch für die saltatorische Erregungsleitung, da sie nur an den Ranvier-Schnürringen erfolgt. Nur hier befinden sich die, zur Ausbildung eines Aktionspotenzials nötigen, spannungsgesteuerten Kanäle. Zwischen den Ranvier-Schnürringen werden die Ionenflüsse aufgrund der isolierenden Markscheide ohne Verzögerung direkt zum nächsten Ranvier-Schnürring weitergeleitet, weshalb sich hier die Aktionspotenziallatenz nicht verändert.

Die saltatorische Erregungsleitung stellt eine sprunghafte Weiterleitung eines Aktionspotenzials von einem zum nächsten Ranvier-Schnürring dar. Nach der Öffnung bzw. Schließung der Na^+ -Kanäle befinden sich noch überschüssige Na^+ -Ionen in der Zelle. Diese werden von dem negativer geladenen Zellinneren im Bereich des nächsten Schnürrings angezogen und verursachen dort über die Veränderungen des Ruhepotenzials die Öffnung der Na^+ -Kanäle. Auch dieser Vorgang setzt sich bis in die Axonendigung fort.

Nach Beendigung der Erregung muss sich das Ruhepotenzial wieder einstellen, damit die Nervenzelle erneut stimuliert werden kann. Dazu benötigt man vor allem die Hilfe der Natrium-Kalium-Pumpe, die überschüssige Na^+ -Ionen wieder aus der Zelle hinaus pumpt und fehlende K^+ -Ionen aus dem Extrazellulärraum in die Nervenzelle zurückführt. So wird die ursprüngliche Ionen-Konzentration wiederhergestellt, die unabdingbare Voraussetzung für die Ausbildung eines AP ist.

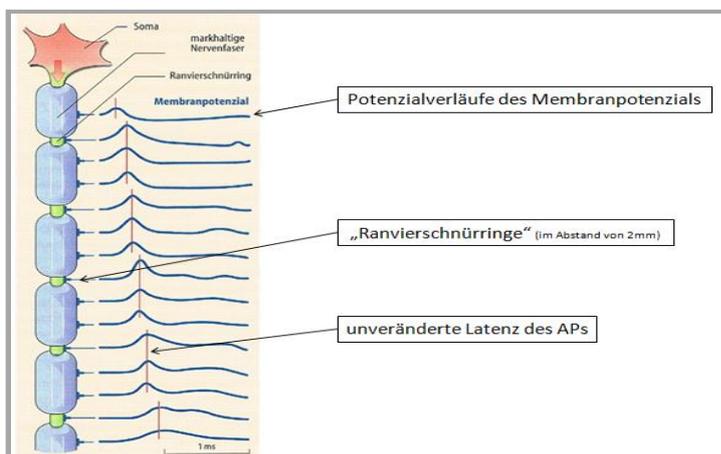


Abbildung 22: Saltatorische Erregungsleitung²⁷¹

Der große Vorteil der saltatorischen Erregungsleitung liegt zum einen in der höheren Leistungsgeschwindigkeit und zum anderen im niedrigeren Energieverbrauch. Beides ist im Prinzip auf die geringere Anzahl an benötigten Aktionspotenzialen zurückzuführen. Durch die sprunghafte Weiterleitung kann in kürzester Zeit eine größere

²⁷¹ angelehnt an Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 44

Distanz bewältigt werden. An den myelinisierten Stellen hat das Axon keinen Kontakt zum Extrazellulärraum, daher können hier keine Ionen einströmen, um eine Depolarisation auszulösen. Letztendlich kann an diesen Stellen kein Aktionspotenzial entstehen. Dies funktioniert nur an den Schnürringen. Der Strom geht immer den Weg des geringsten Widerstands, also durch die Innenseite des Axons, bis er zum nächsten Schnürring gelangt. Dadurch werden die myelinisierten Bereiche sozusagen übersprungen. Aufgrund der geringeren Anzahl an Aktionspotenzialen wird im Vergleich zur kontinuierlichen Erregungsleitung auch weniger ATP für die Natrium-Kalium-Pumpen benötigt. Im Rahmen der kontinuierlichen Erregungsleitung müssen an der gesamten Membran Ionenpumpen aktiv sein, wodurch ein höherer Energieverbrauch entsteht.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Ausbildung und die Weiterleitung eines Aktionspotenzials an für sich keiner Bioenergie in Form von ATP bedürfen. Im Zusammenhang mit dem Ruhepotenzial wird hingegen einiges an Energie verbraucht.

3.2.3 Die synaptische Übertragung

Bisher wurden die grundlegenden Sachverhalte i.V.m. neuronaler Aktivität aus intraneuronaler Perspektive erörtert; sowohl die Nervenzelle selbst als auch die Zellmembran wurden ausführlich dargestellt. Darauf Bezug nehmend wurden auch die verschiedenen elektrischen Potenziale aufgegriffen. Um ein ganzheitliches Verständnis für neuronale Aktivität zu erlangen, muss zusätzlich auch die interneuronale Perspektive betrachtet werden. Es gilt folglich die Frage zu beantworten, was zwischen verschiedenen Nervenzellen passiert bzw. was dafür verantwortlich ist, dass verschiedene Nervenzellen miteinander kommunizieren. Aus dieser Perspektive heraus kann dann nachvollzogen werden, wie bzw. warum ein Aktionspotenzial am Axonhügel entsteht und was passiert, nachdem ein Aktionspotenzial bis in die Axonendigungen weitergeleitet wird. Zur Beantwortung der Frage werden Synapsen, Neurotransmitter und Rezeptor genauer analysiert.

„Synapsen sind die Orte des funktionellen Kontakts zwischen den Axonendigungen und anderen Zellen.“²⁷² Grundlegend kann in Bezug zu Synapsen zwischen *chemischen* und *elektrischen Synapsen* unterschieden werden. Die meisten Synapsen im Wirbeltiergehirn gehören zu erstgenannter Synapsenart, daher stehen sie im Fokus der Darstellung. Bevor jedoch genauer auf chemische Synapsen eingegangen wird, sollen kurz zwei Sachverhalte geklärt werden, die für das Verständnis der weiteren Ausführungen hilfreich sind. Es handelt sich um die Begriffe *präsynaptische* und *postsynaptische Membran*. Charakteristisch für Synapsen ist, dass zwischen zwei Zellen ein kleiner Zwischenraum besteht. In Bezug auf diesen Zwischenraum kann eine Zelle bestimmt werden, die die Information auf die nachfolgende Nervenzelle überträgt. Dies ist die Nervenzelle, die vor dem Zwischenraum liegt. Aus diesem Grund wird sie als präsynaptische Membran bezeichnet. Die Nervenzelle, die die In-

²⁷² Thompson, R. F. (2001), S. 39

formation von der vorgelagerten Nervenzelle empfängt, befindet sich hinter dem Zwischenraum. Daher wird sie postsynaptische Membran genannt.

Alle *chemischen Synapsen* teilen drei charakteristische Eigenschaften.²⁷³ Chemische Synapsen sind überall dort zu vermuten, wo in der präsynaptischen Axonendigung eine gewisse Menge an Vesikeln gelagert wird. Im Innern der Vesikel befinden sich nämlich *Neurotransmitter*, die gerade bei der chemischen Synapse die Vehikel der weiterzuleitenden Information darstellen. Ein weiteres Kriterium bezieht sich auf die Existenz eines kleinen Zwischenraumes zwischen prä- und postsynaptischer Membran, dem sog. *synaptischen Spalt*²⁷⁴. Hierbei handelt es sich um einen sehr schmalen Spalt von ca. 20 Nanometern²⁷⁵ Breite, der immer vorhanden ist. Zudem „... weist die Zellmembran der postsynaptischen Zelle (...) an der Synapsenregion ein dunkel gefärbtes Band auf, das die seitliche Ausdehnung der Synapse kennzeichnet.“²⁷⁶

Gelangt ein Aktionspotenzial bis in die Axonendigung, werden dadurch verschiedene Prozesse ausgelöst, die im Endeffekt für die Aktivität einer Synapse verantwortlich sind. Die Aktivität einer Synapse, die stellvertretend für die Informationsübertragung auf interneuroner Ebene steht, wird durch die sog. *Exocytose*²⁷⁷ eingeleitet. Hierbei verbinden sich die, in der Axonendigung befindlichen Vesikel mit der präsynaptischen Membran. Wie Abbildung 23 zu entnehmen ist, erfolgt eine Verschmelzung der Vesikel mit der Zellmembran.

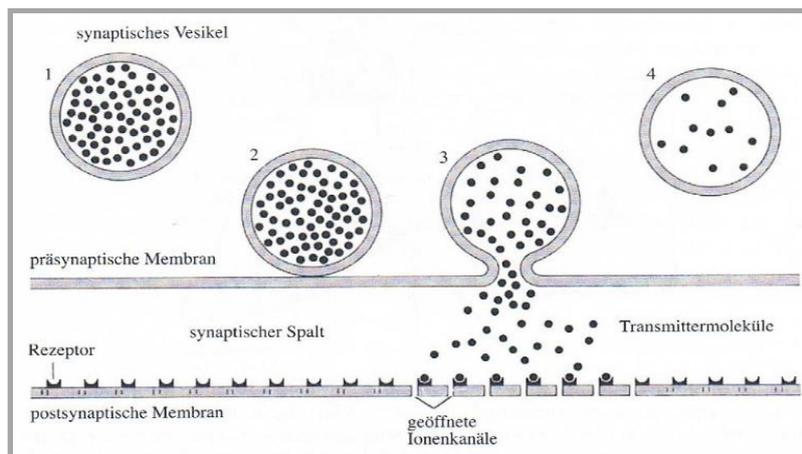


Abbildung 23: Exocytose²⁷⁸

In Folge der Verschmelzung gelangen die in den Vesikeln gespeicherten chemischen Substanzen, sog. Neurotransmitter, in den synaptischen Spalt. Einmal in den synaptischen Spalt freigelassen, streben die Neurotransmitter in Richtung der postsynaptischen Membran. Der Grund liegt in der Beschaffenheit der postsynaptischen Membran. Auf ihrer Oberfläche befinden sich sog. *Rezeptormoleküle*, die jeweils auf spezifische Neurotransmitter reagieren. Neurotransmitter und Rezeptormoleküle stehen in

²⁷³ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 39 f.

²⁷⁴ vgl. Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 83; Carlson, N. R. (2004), S. 62; Schandry, R. (2011), S. 83; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 142 f.

²⁷⁵ 20 Milliardstel Meter

²⁷⁶ Thompson, R. F. (2001), S. 40

²⁷⁷ vgl. Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 97 f.; Schandry, R. (2011), S. 85 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 64 f.

²⁷⁸ Thompson, R. F. (2001), S. 41

einer Schlüssel-Schloss-Beziehung²⁷⁹. Wenn genügend Transmittermoleküle an den entsprechenden Rezeptormolekülen andocken, wird die postsynaptische Zielzelle aktiviert.

Bei den *Neurotransmittern* handelt es sich um chemische Substanzen, die eine wichtige Rolle in der elektrochemischen Signalübertragung spielen und auch Botenstoffe genannt werden. Im Gehirn ist von jedem beliebigen Neurotransmitter immer nur eine begrenzte Menge für einen Einsatz verfügbar. Im Vergleich zu Hormonen haben sie eine eng begrenzte lokale Wirkung. Ursprünglich gab es die Annahme, dass pro Neuron nur ein spezieller Transmitter freigesetzt wird. Dies trifft für viele Zellen zu, aber es wurde auch das Phänomen der *Kotransmission*²⁸⁰ entdeckt. Hierbei wird häufig neben dem klassischen Überträgerstoff ein Peptid²⁸¹ ausgeschüttet, welches an der Übertragung mitwirkt. Da das Gehirn außer Kontrolle geraten würde, wenn ein Neurotransmitter dauerhaft an seinen Rezeptor gebunden bliebe, müssen die Neurotransmitter inaktiviert werden, nachdem sie ihre jeweilige Wirkung entfaltet haben. Entweder baut ein Enzym den Neurotransmitter am Rezeptor ab oder der Neurotransmitter kann sich aus einem anderen Grund nur kurz an die Membran anheften. „Eine Inaktivierung findet jedenfalls immer statt, [...] nur die Geschwindigkeit, mit der sie abläuft, kann stark variieren.“²⁸² Nach der Inaktivierung werden die Neurotransmitter wieder von der präsynaptischen Membran aufgenommen und innerhalb der Zelle für eine erneute Verwendung recycelt. Diesen Prozess nennt man *Endocytose*. Sie ist keineswegs perfekt, d.h. es geht immer etwas Transmitter verloren. Aus diesem Grund ist die Neusynthese von Neurotransmittern in den Zellorganellen so wichtig. Ohne sie würden sich die Neurotransmitterspeicher Erregung für Erregung weiter leeren bis keine Ausschüttung mehr möglich wäre.²⁸³

*Rezeptormoleküle*²⁸⁴ existieren auf der postsynaptischen Nervenzelle und ermöglichen erst die Wirkung der Transmitter. Rezeptormoleküle kommen nicht nur an Synapsen vor und sind auch nicht allein für die synaptischen Überträgerstoffe zuständig. Am häufigsten findet man sie jedoch in der Rolle chemisch gesteuerter Tore. Hierbei versperren bzw. ermöglichen sie den Durchgang durch Ionenkanäle. Dass man auf einer Membran nur einen speziellen Rezeptortyp vorfindet, ist selten der Fall. Wahrscheinlicher ist sogar, dass auch mehrere Rezeptortypen gemeinsam an einer Membran vorliegen, wodurch sich der Prozess der synaptischen Übertragung etwas komplizierter gestaltet.

Die Beziehung zwischen Neurotransmitter und Rezeptor ist durch ein dynamisches Gleichgewicht gekennzeichnet. Dieses Gleichgewicht kann am besten als „... ein kontinuierlicher Prozess des Bindens und Lösen, ein ständiger Wechsel zwischen

²⁷⁹ vgl. Schandry, R. (2011), S. 87

²⁸⁰ vgl. Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 48 f.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 159; Kandel, E. R. (1996), S. 308

²⁸¹ Diese Struktur stellt eine Kette von Aminosäuren dar.

²⁸² Thompson, R. F. (2001), S. 121

²⁸³ vgl. Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 99 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 69 f.; Kandel, E. R. (1996), S. 308; Thompson, R. F. (2001), S. 121

²⁸⁴ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 94 f., S. 101 f.; Schandry, R. (2011), S. 87 ff.

*freien und gebundenen Transmittermolekülen und Rezeptoren*²⁸⁵ beschrieben werden. Zu beachten ist hierbei, dass jede Verbindung zwischen einer chemischen Substanz und einem Rezeptor unterschiedlich lang anhält. Es existiert in jedem speziellen Fall eine besondere Bindungs- und Ablöserate.

Liegt eine zu hohe Transmitterkonzentration im synaptischen Spalt vor, desensibilisieren ligandengesteuerte Ionenkanäle²⁸⁶. „Dies scheint ein Sicherheitsmechanismus der Synapse zu sein, der zu große und zu lange dauernde Aktivierungen verhindert.“²⁸⁷ Kommen solche Rezeptoren auf der präsynaptischen Membran vor, so nennt man sie Autorezeptoren²⁸⁸. Sie steuern die Neurotransmittermenge, die ausgeschüttet wird, in Abhängigkeit von der bereits im synaptischen Spalt befindlichen Menge. Man kann sie auch als eine Art Feedback-Sensoren bezeichnen. Durch ihre Aktivierung wird zellintern ein Signal ausgelöst, welches die Neurotransmitter-Produktion drosselt bzw. abstellt.

In Bezug auf die synaptische Übertragung kann generell zwischen der *schnellen* und der *langsamen synaptischen Übertragung* unterschieden werden. Hier soll das Augenmerk nur auf die *schnelle synaptische Übertragung*²⁸⁹ gerichtet werden, da die langsame Übertragung eine eher modulierende Funktion²⁹⁰ hat und an dieser Stelle nur eine geringe Relevanz besitzt.

Die aufeinander folgenden Teilprozesse, die die Aktivität an chemischen Synapsen beschreiben, sind relativ einfach. Ein einmal ausgelöstes Aktionspotenzial wird das Axon entlang bis in die präsynaptische Axonendigung weitergeleitet. Dort angekommen, bewirkt es die Ausschüttung eines Neurotransmitters. Bei der Freisetzung spielen die Ca^{2+} -Ionen eine entscheidende Rolle. Diese wurden bereits bei der Erläuterung der Ionenkanäle erwähnt, sind jedoch nicht an der Entstehung eines Aktionspotenzials am Axonhügel und der Weiterleitung des Aktionspotenzials beteiligt. Erst wenn das Aktionspotenzial, z.B. durch eine saltatorische Erregungsleitung, in das Endknöpfchen gelangt, entfalten die Ca^{2+} -Ionen ihre Wirkung. Die entsprechenden Kanäle gehören generell zu dem geschlossenen, spannungsgesteuerten Kanaltyp. Durch das eintreffende Aktionspotenzial, welches eine veränderte Spannung der präsynaptischen Membran hervorruft, wird hier zunächst die Öffnung der Ca^{2+} -Kanäle bewirkt. Da die Ca^{2+} -Ionenkonzentration innerhalb der Zelle geringer ist als außerhalb, erfolgt der Ca^{2+} -Einstrom in einer hohen Geschwindigkeit. Dieser Ionen-einstrom in die Axonendigung ist dafür verantwortlich, dass Neurotransmitter über die bereits angesprochene Exocytose in den synaptischen Spalt freigesetzt werden. Die

²⁸⁵ Thompson, R. F. (2001), S. 101

²⁸⁶ Es handelt sich um Ionenkanäle, deren Tore dadurch geöffnet werden, dass sich ein chemischer Stoff an ein Eiweißmolekül (Rezeptor) bindet.

²⁸⁷ Berlit, P. (2011), S. 47

²⁸⁸ vgl. Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 132 f.; Schandry, R. (2011), S. 89; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 99; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 60

²⁸⁹ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 81 ff.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 126 ff.; Schandry, R. (2011), S. 85 f.; Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 97 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 64 ff.; Kandel, E. R. (1996), S. 279 f., S. 285 ff.; Pritzel, M.; Brand, M.; Markowitsch, H. J. (2009), S. 63 ff.

²⁹⁰ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 128 ff.

ausgeschütteten Neurotransmitter wandern über den synaptischen Spalt und verbinden sich mit Rezeptormolekülen, die sich auf der Oberfläche der postsynaptischen Membran befinden. Als Ergebnis der Bindung zwischen beiden Strukturen öffnen sich vor allem Na^+ -Kanäle an der postsynaptischen Membran. Auf diese Weise gelangt positiv geladenes Na^+ in die postsynaptische Nervenzelle. Festzuhalten ist hierbei, dass die Ionenkanäle auf der postsynaptischen Membran nicht durch Spannungsunterschiede gesteuert werden, sondern durch den Neurotransmitter, eine chemische Substanz, geöffnet werden. *„Bei den Proteintoren dieser Ionenkanäle handelt es sich um chemische Rezeptoren, die spezifisch auf einen bestimmten Transmitter (...) ansprechen.“*²⁹¹ Da diese Ionenkanäle chemisch aktiviert werden, funktionieren sie nicht selbstverstärkend wie spannungsgesteuerte Tore. Bei diesen chemisch gesteuerten Ionenkanälen gibt es folglich kein Schwellenpotenzial, das überschritten werden muss, damit sich alle Kanäle öffnen. Vielmehr besteht eine Abhängigkeit der geöffneten Tore von der Menge des ausgeschütteten Neurotransmitters. Diese Abhängigkeit kann folgendermaßen beschrieben werden: Je mehr Neurotransmitter im synaptischen Spalt vorhanden sind, desto mehr Kanäle können geöffnet werden. Je mehr Kanäle geöffnet werden, desto mehr Na^+ strömt in die postsynaptische Zelle. Je mehr Na^+ einströmt, desto eher entwickelt sich ein Aktionspotential. Die Dauer der Bindung des Neurotransmitters an die Rezeptormoleküle entscheidet letztlich darüber, wie lange die Ionenkanäle an der postsynaptischen Membran geöffnet bleiben und Na^+ einströmen kann.

Obwohl sich der beschriebene Gesamtprozess der schnellen synaptischen Übertragung aus mehreren Teilprozessen zusammensetzt, läuft er insgesamt schnell ab. *„Von der Ankunft eines Aktionspotenzials an der präsynaptischen Axonendigung bis zum Beginn der Depolarisation der postsynaptischen Zelle vergehen oft nur 0,2 Millisekunden.“*²⁹² Da dieser Prozess in einer so hohen Geschwindigkeit erfolgt, wird er auch schnelle synaptische Übertragung genannt. Ein Grund für die Geschwindigkeit liegt in der geringen Breite des synaptischen Spalts.

An dieser Stelle ist es angebracht, sich zu fragen, was quantitativ gesehen notwendig ist, damit sich in Folge einer synaptischen Übertragung überhaupt ein Aktionspotential in der postsynaptischen Nervenzelle entwickeln kann.

Für die Auslösung eines Aktionspotenzials in der postsynaptischen Nervenzelle ist die einmalige Aktivität einer erregenden Synapse nicht ausreichend. Die Auswirkung auf die postsynaptische Membran ist so klein, dass die Aktivität vieler präsynaptischer Neuronen notwendig ist, um dieses Ziel zu erreichen.²⁹³ Für die Entwicklung eines Aktionspotenzials an einem Gehirnneuronen müssen folglich mehrere Synapsen zusammenarbeiten.²⁹⁴ In Bezug auf Gehirnneuronen spricht man auch von *räumlicher* und *zeitlicher Summation*. Bei der ersten Variante wird das er-

²⁹¹ Thompson, R. F. (2001), S. 84

²⁹² ebenda, S. 84

²⁹³ vgl. Menche, N. (2007), S. 132; Kandel, E. R. (1996), S. 204 f.

²⁹⁴ Bei einer Nerv-Muskel-Verbindung kann es unter Umständen genügen, wenn nur eine Synapse aktiviert wird.

zeugte postsynaptische Potenzial dadurch verstärkt, dass mehrere Synapsen gleichzeitig bzw. zeitlich sehr nah beieinander die postsynaptische Membran depolarisieren. Bei der zweiten Variante wird die Wahrscheinlichkeit der Auslösung eines Aktionspotenzials dadurch erhöht, dass dieselben Synapsen in einem engen zeitlichen Rahmen mehrere Impulse nacheinander an die postsynaptische Membran richten. Die Situation wird dadurch noch etwas komplexer, dass synaptische Übertragungen sowohl erregend wie auch hemmend wirken können. Theoretisch könnten erregende und hemmende Synapsen zeitgleich an derselben postsynaptischen Nervenzellmembran aktiv sein. Alle einkommenden Potenziale müssen folglich integriert werden, damit sich ein Aktionspotenzial ausbilden kann oder es zu keinem Aktionspotenzial kommt. Allerdings sind erregende und hemmende Synapsen nicht als gleichwertig anzusehen. Vielmehr verhält es sich so, dass eine aktive Synapse eine stärkere Wirkung erzeugt, wenn sie nahe am Entstehungsort des Aktionspotenzials, also am Axonhügel, positioniert ist. Befindet sie sich in einer etwas weiteren Entfernung zum Axonhügel, so entwickelt sie eine geringere Wirkung. Interessanterweise finden sich hemmende Synapsen vorwiegend am Zellkörper, erregende Synapsen prinzipiell auf dendritischen Dornen. Hemmende Synapsen entfalten daher eine stärkere Wirkung auf das postsynaptische Potenzial.²⁹⁵

Der grundlegende Mechanismus einer *schnellen exzitatorischen Synapse*²⁹⁶ erzeugt durch die Wirkung der Transmitter auf die Rezeptormoleküle lediglich eine schwache Depolarisation an der Zellmembran. „*Die Summe dieser kurzen Depolarisationen wird exzitatorisches postsynaptisches Potenzial (EPSP) genannt.*“²⁹⁷ Wie bereits dargelegt, ist das EPSP an der Zellmembran umso stärker, je größer die Anzahl gleichzeitig aktivierter Synapsen an einer postsynaptischen Zelle ist (räumliche Summation) bzw. je öfters Synapsen wiederholt aktiviert werden (zeitliche Summation). Um ein Aktionspotenzial auszulösen, müssen ausreichend Neurotransmitter ausgeschüttet werden. Wird die kritische Menge überschritten, entsteht durch die einströmenden Na⁺-Ionen ein Aktionspotenzial am Axonhügel. Dies ist der Ort an dem ein Aktionspotenzial ausgebildet wird, da hier das Schwellenpotenzial im Vergleich zum Zellkörper am schnellsten erreicht werden kann. Die Schwelle ist am Axonhügel am geringsten. Dies liegt daran, dass die Membran des Zellkörpers und der Dendriten mit vielen Synapsen bedeckt sind und somit einen sehr hohen Widerstand aufweisen. „*Überdies gibt es in der Membran von Zellkörper und Dendriten vermutlich weniger spannungsgesteuerte Natriumkanäle als in der Axonmembran.*“²⁹⁸ Der Axonhügel stellt eine Ausnahme dar, denn er enthält die normalen spannungsgesteuerten Na⁺- und K⁺-Kanäle. Die positiven Ladungen die durch die chemisch gesteuerten Ionenkanäle am Ort der Synapsen in die Zelle einströmen, sammeln sich

²⁹⁵ vgl. Kandel, E. R. (1996), S. 226 ff.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 138 f.; Schandry, R. (2011), S. 102 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 70 ff.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 57 ff.; Thompson, R. F. (2001), S. 87

²⁹⁶ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 86 ff.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 129 ff.; Carlson, N. R. (2004), S. 68 f.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 43 ff.; Schandry, R. (2011), S. 101 f.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2003), S. 127 ff.; Kandel, E. R. (1996), S. 233 ff.

²⁹⁷ Thompson, R. F. (2001), S. 87

²⁹⁸ ebenda, S. 88

automatisch an diesem Bereich des geringsten Widerstands. Wird das Membranpotenzial am Axonhügel auf ungefähr -60mV depolarisiert, öffnen sich hier die Kanäle und es entsteht ein Aktionspotenzial, das sich selbstverstärkend das Axon entlang fortpflanzt. Abbildung 24 zeigt beispielhaft eine erregende Synapse. Hieran kann die grundlegende Wirkungsweise exzitatorischer Synapsen nachvollzogen werden.

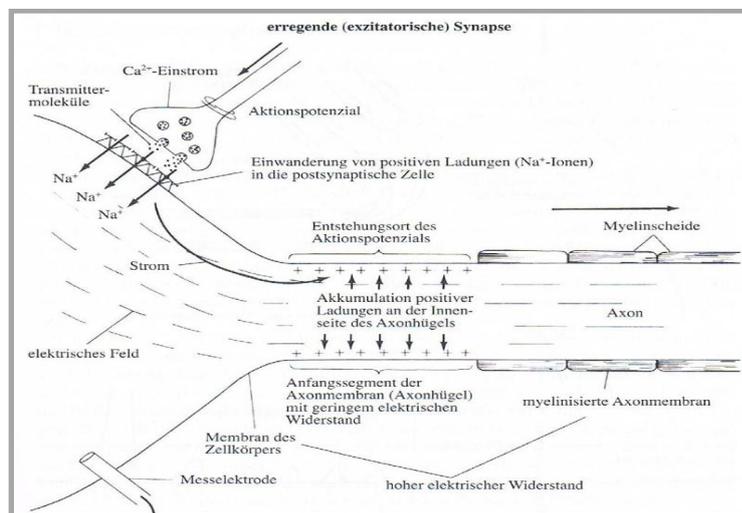


Abbildung 24: Wirkung einer erregenden Synapse²⁹⁹

Neben der schnellen synaptischen Erregung ist in Bezug auf die postsynaptische Membran auch eine *schnelle synaptische Hemmung*³⁰⁰ möglich. Diese wird durch inhibitorische Synapsen ausgelöst. Im Gegensatz zu einer exzitatorischen Synapse, bei der vor allem Na^+ -Kanäle geöffnet werden, sind vor allem Cl^- - oder K^+ -Ionen oder beide beteiligt. Im Rahmen einer Hemmung bleiben die Na^+ -Kanäle geschlossen. Durch das Einströmen von Cl^- -Ionen, welches auch dadurch gefördert wird, dass deren Konzentration im Zelläußeren höher ist als im Zellinneren, wird eine Hyperpolarisation der Membran erzeugt. Dies bezeichnet man als inhibitorisches postsynaptisches Potenzial (IPSP). „Ein IPSP ist also ein Membranpotenzial am Axonhügel, das vom Schwellenwert für die Auslösung eines Aktionspotenzials weiter entfernt liegt als im Ruhezustand.“³⁰¹ In der Folge ist es noch schwieriger das Schwellenpotenzial zu erreichen. Abbildung 25 zeigt eine hemmende Synapse, die ihre Wirkung über einen Cl^- -Einstrom entwickelt. Da auch im Rahmen eines IPSP immer mehrere Synapsen beteiligt sind, erfolgt deren Verrechnung genau wie bei einem EPSP räumlich und zeitlich. In Folge einer Hemmung wird die Wirkung einer synaptischen Erregung neutralisiert und es kommt nicht zur Ausbildung eines Aktionspotenzials. Die zweite Möglichkeit einer Hemmung liegt in der K^+ -Hemmung. Diese bewirkt dasselbe wie eine Cl^- -Hemmung. Allerdings ist hierbei der K^+ -Ausstrom dafür verantwortlich, dass das Zellinnere negativer wird als im Ruhezustand. „Wenn in einer Zelle ein IPSP induziert

²⁹⁹ Thompson, R. F. (2001), S. 89

³⁰⁰ vgl. Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 141 ff.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2003), S. 131 ff.; Thompson, R. F. (2001), S. 91 ff.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 46 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 68 f.; Schandry, R. (2011), S. 101 f.; Kandel, E. R. (1996), S. 239 ff.

³⁰¹ Thompson, R. F. (2001), S. 91

wird, dann ist eine synaptische Erregung weniger effektiv.“³⁰² Wie bereits angesprochen, werden erregende und hemmende Impulse nicht einfach aufaddiert. Eine Hemmung wirkt sich meistens stärker aus als eine Erregung.

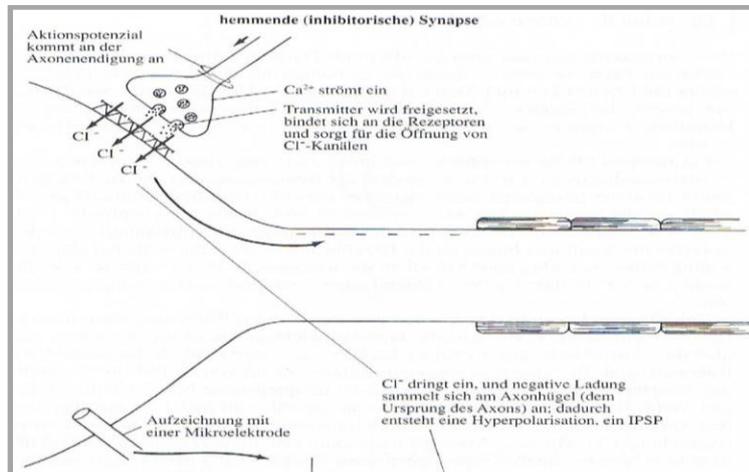


Abbildung 25: Wirkung einer hemmenden Synapse³⁰³

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, gibt es ca. 10^{12} Nervenzellen, die jeweils mehrere tausend Verbindungen mit anderen Nervenzellen aufweisen. Hierbei werden die meisten Synapsen chemisch gesteuert. Chemische Synapsen sind nicht starr, sondern im Gegenteil relativ dynamisch. Wird eine Synapse z.B. regelmäßig aktiviert, erhöht sich die allgemeine Wirkung einer Nervenzelle an der postsynaptischen Membran über die Zeit, d.h. es kommt zu einer stärkeren Depolarisation. Man spricht auch von *synaptischer Plastizität*.³⁰⁴ Neben den chemischen Synapsen gibt es noch eine zweite Art von Synapsen, die elektrisch funktionieren. *Elektrische Synapsen*³⁰⁵, oft auch als „*gap junctions*“³⁰⁶ bezeichnet, verändern sich im Gegensatz zu chemischen Synapsen nicht über die Zeit. „*Was ankommt, bestimmt immer, was ausgesandt wird, und kann nicht kurzfristig durch größere strukturelle oder chemische Abwandlungen verändert werden.*“³⁰⁷ Da prä- und postsynaptische Membran im Rahmen von gap junctions verbunden sind, müssen keine Ionenkanäle geöffnet werden, um ein Aktionspotenzial in der postsynaptischen Nervenzelle zu generieren. Die Membranen verschmelzen zwar nicht direkt, doch ihr Abstand beträgt nicht mehr 20nm, wie bei chemischen Synapsen, sondern nur noch 2nm. Gelangt ein Aktionspotenzial in der präsynaptischen Nervenzelle das Axon entlang bis in die Axonendigung, so wird es direkt an die postsynaptische Membran weitergeleitet und erzeugt dort ein elektrisches Feld. Erreicht die Stärke des elektrischen Impulses einen Schwellenwert, entsteht auch in der postsynaptischen Nervenzelle ein Aktionspotenzial. Bei der Informationsübertragung ist allerdings keine Einwirkung che-

³⁰² Thompson, R. F. (2001), S. 94

³⁰³ ebenda, S. 92

³⁰⁴ vgl. Schandry, R. (2011), S. 105 ff.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 65 ff.

³⁰⁵ vgl. Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 116 ff.; Kandel, E. R. (1996), S. 190 ff.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 67 f.; Thompson, R. F. (2001), S. 47 ff.; Clauss, W.; Clauss, C. (2009), S. 106 ff.

³⁰⁶ Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 67

³⁰⁷ Thompson, R. F. (2001), S. 48

mischer Transmitter nötig. Innerhalb der gap junctions ist der elektrische Widerstand sehr gering. Daher benötigt der elektrische Impuls keine weitere Verstärkung, um im nachfolgenden Neuron ein Aktionspotenzial auszulösen.

In chemischen Synapsen ist eine Weiterleitung des Aktionspotenzials hingegen ohne Neurotransmitter nicht denkbar. Hier liefert das präsynaptische Aktionspotenzial i.d.R. zu wenig Strom. Die chemische Übertragung ist folglich eine unabdingbare Verstärkung der chemischen Synapsen. Insbesondere müssen die beteiligten prä- und postsynaptischen Membranen an elektrischen Synapsen in Bezug auf ihre Größe ungefähr übereinstimmen, damit sie verlässlich funktionieren. Axon und Dendrit müssen ungefähr gleichgroß sein. Bei chemischen Synapsen ist dies kein ausschlaggebender Faktor.

Zusammenfassend kann in Bezug auf die synaptische Übertragung festgehalten werden, dass der Mensch sowohl chemische wie auch elektrische Synapsen braucht, jedoch jeweils in einem unterschiedlichen Maß und für jeweils unterschiedliche Aufgaben. Chemische Synapsen sind bei komplexeren Verarbeitungsprozessen von größerer Bedeutung als elektrische Synapsen. Elektrische Synapsen helfen hingegen dabei, Zellverbände mit ähnlichen bzw. gemeinsamen Aufgaben zu synchronisieren. Elektrische Synapsen sind des Weiteren in ihrer Struktur viel einfacher gestaltet als chemische Synapsen. Unbestreitbar ist, dass chemische Synapsen den Großteil der vorhandenen Synapsen im Gehirn ausmachen. *„Wir sind was wir sind, weil unsere Gehirne im Grunde eher chemische als elektrische Maschinerien sind.“*³⁰⁸ Durch das Übergewicht an chemischen Synapsen erhält die Kommunikation zwischen Nervenzellen aufgrund der bereits angesprochenen synaptischen Plastizität eine größere Flexibilität. Zudem sind chemische Synapsen normalerweise sehr klein. Im Vergleich zu elektrischen Synapsen, die in Bezug auf ihre Größe limitiert sind, kann in einem vorgegebenen Raum eine größere Menge an Synapsen untergebracht werden. Die Informationsübertragung an chemischen Synapsen erfolgt über Neurotransmitter und Rezeptormoleküle. Die zentrale Aussage in Bezug auf diese Beziehung lautet, dass es bei der synaptischen Übertragung eher der Rezeptor ist, der über die Wirkung eines Transmitters, im Sinne einer Aktivierung oder einer Hemmung, entscheidet und insofern die Botschaft in sich trägt.³⁰⁹ Derselbe Neurotransmitter kann je nach vorhandenem Rezeptor entweder eine hemmende oder eine aktivierende Wirkung entfalten.

3.2.4 Die Gliazellen

Neben den Nervenzellen gibt es einen weiteren bereits angesprochenen Zelltyp im zentralen Nervensystem: die Gliazellen. Diese sind kleiner als die Nervenzellen und kommen daher ungefähr zehnmals häufiger vor. *„Früher glaubte man einmal, die Hauptaufgabe der Gliazellen [...] bestünde darin, ein strukturelles Gerüst für das Ge-*

³⁰⁸ Thompson, R. F. (2001), S. 51

³⁰⁹ vgl. Pritzel, M.; Brand, M.; Markowitsch, H. J. (2009), S. 71; Kirchbaum, C. (2008), S. 201; Thompson, R. F. (2001), S. 117

*hirn zu bilden.*³¹⁰ Daher bekamen diese Zellen ihren Namen, der übersetzt so viel wie Leim bedeutet. Man ging davon aus, dass Gliazellen Binde- bzw. Stützgewebe für die Nervenzellen seien. Im Prinzip wurden diesen Zellen zunächst nur relativ simple Aufgaben angedacht. Mit der Zeit veränderte sich die Sicht über diesen Zelltyp allerdings. Verschiedene Untersuchungen zeigten, dass Gliazellen neben der Stütz- und Ernährungsfunktion noch weitere wichtige Funktionen in Bezug auf die Nervenzelle und ihre Funktionalität aufweisen.

Eine Studie von Schummers, Yu & Sur³¹¹ beschäftigte sich bspw. anhand des visuellen Cortex von Frettchen mit dem Zusammenhang zwischen neuronalen Netzwerken, Astrozyten³¹² und blutflussbezogener Aktivität. Es konnte herausgestellt werden, dass nicht nur die Nervenzellen, sondern auch die Astrozyten im visuellen Cortex auf visuelle Reize reagieren. Des Weiteren wurde festgestellt, dass „*Astrocytes respond to stimuli over a similar region of space as neighboring neurons.*“³¹³ Die Aktivität der Astrozyten deckt sich folglich räumlich mit der neuronalen Aktivität. Interessant war auch die Beobachtung, dass Neuronen unspezifischer reagieren als Astrozyten. Die Autoren schlussfolgern³¹⁴, dass eine unspezifische neuronale Aktivierung die Grundlage für eine spezifische Aktivierung der Astrozyten darstellt. In den spezifischeren Reaktionen der Astrozyten kommt ihre zentrale Bedeutung für die Regulierung neuronaler Aktivität zum Ausdruck. Sie stärken bzw. schwächen eine Aktivierung und beeinflussen ihre Dauer. In Hinblick auf die Ausrichtung der Astrozyten auf die Neuronen berichten die Autoren weiter, dass „... *astrocytes do not necessarily function as a broadly interconnected network [...], but rather that each astrocyte interacts quasi-independently with a small number of neurons surrounding it.*“³¹⁵

Die verschiedenen Befunde unterstützten das Argument, dass Gliazellen definitiv mehr sind als nur Stützzellen. Sie sind viel stärker in die Modulation der neuronalen Aktivität involviert als man dachte.

Wenn man Gliazellen allgemein betrachtet, so kann man eine grobe Unterscheidung in drei Hauptarten von Gliazellen vornehmen: *Astrozyten*, *Oligodendrozyten* und *Mikroglia*.³¹⁶ Alle Arten erfüllen unterschiedliche und auch unterschiedlich komplexe Funktionen. Am komplexesten sind die *Astrozyten*. Ein wichtiger Aufgabenbereich liegt in der *Modulation bzw. Regulation neuronaler Aktivität*.³¹⁷ Dieser Funktionalität wird durch unterschiedliche Sachverhalte Rechnung getragen. Zum einen werden Synapsen von Astrozyten umgeben. Dadurch beschränken die Astrozyten den Wirkungsradius der ausgeschütteten Neurotransmitter und machen die Übertragung an dieser

³¹⁰ Thompson, R. F. (2001), S. 45 f.

³¹¹ vgl. Schummers, J.; Yu, H.; Sur, M. (2008)

³¹² Astrozyten stellen eine spezielle Art von Gliazellen dar.

³¹³ Schummers, J.; Yu, H.; Sur, M. (2008), S. 1639

³¹⁴ vgl. ebenda, S. 1642

³¹⁵ Schummers, J.; Yu, H.; Sur, M. (2008), S. 1642

³¹⁶ vgl. Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 64 ff.; Schandry, R. (2011), S. 56 ff.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 24 f.; Clauss, W.; Clauss, C. (2009), S. 96 f.; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 52 f.; Kirchbaum, C. (2008), S. 110; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 149 f.; Carlson, N. R. (2004), S. 42 ff.; Thompson, R. F. (2001), S. 45 f.

³¹⁷ vgl. Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 66; Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 52 f.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 25 ; Schandry, R. (2011), S. 56

Stelle effektiver. Zum anderen sind sie auch in der Lage die Wirkung des Neurotransmitters zu begrenzen, indem sie überschüssige Transmitter aufnehmen und somit aus dem synaptischen Spalt entfernen. Zwei weitere Eigenschaften prädestinieren Astrozyten für die Modulation neuronaler Aktivität. Astrozyten können selber durch Neurotransmitter erregt werden, da sie genau wie Nervenzellen über entsprechende Rezeptoren verfügen. Außerdem besitzen sie auch Vesikel, die den erregenden Neurotransmitter Glutamat beinhalten. Dieser ist in der Lage, die Erregbarkeit benachbarter Neurone zu erhöhen. Auf diese Weise können Astrozyten mit Nervenzellen kommunizieren und in diesem Sinne je nach Bedarf regulieren. Eine weitere Aufgabe der Astrozyten bezieht sich direkt auf die einzelnen Nervenzellen. Neben der *Stützfunktion*, also der Gewährleistung einer gewissen Stabilität des Neuronennetzes, und dem *Aufbau von Verbindungen zwischen Nervenzellen* sind Astrozyten auch mit der *Ernährung der Nervenzellen* betraut. Die Ernährung erfolgt i.V.m. der *Blut-Hirnschranke*, die in Kapitel 5.1.1³¹⁸ genauer skizziert wird. Zu guter Letzt sind die Astrozyten auch an der *Regulation des Extrazellulärraums* beteiligt. Sie können Einfluss auf die extrazelluläre Ionenkonzentration verschiedener Substanzen nehmen; dies kann zu einer Störung oder einer Optimierung der neuronalen Erregung führen.

Eine weitere Art der Gliazelle wird *Oligodendrozyten* genannt. Sie können bei der Weiterleitung des Aktionspotenzials das Axon entlang eine entscheidende Rolle spielen. Im Rahmen der bereits thematisierten saltatorischen Erregungsleitung wird eine schnelle Weiterleitung des Aktionspotenzials dadurch begünstigt, dass das Axon myelinisiert ist. An diesen Stellen wird das Axon quasi isoliert und das Aktionspotenzial wird in der Folge direkt zum nächsten nichtmyelinisierten Axonabschnitt weitergeleitet. Die Oligodendrozyten stellen gerade diese Myelinschicht dar. Hierbei ist es nicht ungewöhnlich, dass mehrere Axone von derselben Oligodendrozyte isoliert werden.

Die kleinste Gliazelle existiert in Form der *Mikroglia*. „*Es handelt sich hierbei um kleine, sehr fortsatzreiche Zellen (...), die nicht ortständig sondern amöboid beweglich und Phagozytose-aktiv sind.*“³¹⁹ Sie sind relativ mobil und reichern sich immer dort an, wo unterschiedliche Zelltypen des Gehirns beschädigt oder abgestorben sind. An diesen Stellen nehmen sie Zelltrümmer, Fremdstoffe und Abbauprodukte auf und entsorgen diese.

³¹⁸ Kapitel 5.1.1 Neurovaskuläre Kopplung

³¹⁹ Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 150

4 Die strukturelle Magnetresonanztomographie (MRT)

Um eine Erhebungsmethode bzw. Messung ganzheitlich zu verinnerlichen, muss zu Beginn eine seriöse Auseinandersetzung mit der zu messenden bzw. abzubildenden Größe erfolgen. Dies geschah ausführlich im Rahmen von Kapitel 3, indem eine biologische Basis im Sinne eines weiteren Verständnisses hinsichtlich neuronaler Aktivität aufgearbeitet wurde. Nachdem die grundlegenden biologischen Sachverhalte geklärt sind, geht es an dieser Stelle um das physikalische WAS und WIE der Messung. Kapitel 4 beschäftigt sich dazu mit den grundlegenden physikalischen Aspekten der strukturellen Magnetresonanztomographie (MRT), die gleichzeitig auch die physikalischen Grundlagen der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) darstellen. Das generelle Messverfahren ist in beiden Varianten prinzipiell dasselbe, allerdings unterscheiden sich der inhaltliche und dementsprechend auch der konkrete physikalische Fokus der Messung. Zielt die MRT auf eine möglichst gute Abbildung der Gehirnanatomie, bedeutet dies, dass eine möglichst kontrastreiche Darstellung der einzelnen Gehirnstrukturen angestrebt wird. Bei der fMRT dagegen wird eine gut differenzierende Darstellung der Gehirnaktivität angestrebt. Hierbei steht der funktionelle Aspekt im Vordergrund, weshalb dieses Verfahren auch als fMRT bezeichnet wird. Es stellt in diesem Sinne eine Erweiterung der strukturellen Magnetresonanztomographie (MRT) dar.

Nachdem die physikalischen Grundlagen und auch die Bilderstellung adressiert wurden, folgt eine Darstellung der technischen Umsetzung in Form des Aufnahmesystems, dem MR-Scanner. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit der Betrachtung potentieller Risiken bzw. verschiedener Sicherheitsaspekte in Bezug auf die Magnetresonanztomographie.

4.1 Physikalische Grundlagen der MRT

Die MRT beruht auf den magnetischen Eigenschaften einiger Atomkerne. Sie wird auch Kernspin-Tomographie genannt, da die magnetischen Eigenschaften durch eine Eigenschaft hervorgerufen werden, die sich *Kernspin*³²⁰ nennt. Je nachdem was durch eine MRT visualisiert werden soll, können unterschiedliche Atomkerne als Grundlage der Messung verwendet werden. Da sich das Interesse der vorliegenden Arbeit auf die Messung von Gehirnaktivität bezieht und in diesem Zusammenhang auch die Darstellung der Gehirnstruktur von Bedeutung ist, beziehen sich die nachfolgenden Ausführungen auf den hierbei zugrunde liegenden Atomkern des Wasserstoffatoms (H), der im Kopf und im menschlichen Körper insgesamt am häufigsten vorkommt.³²¹ Dieser Atomkern besteht nur aus einem Proton, das von einem Elektron umkreist wird.

Mit Kernspin wird die Eigenschaft einiger Atomkerne bezeichnet, um ihre eigene Achse zu rotieren. Infolge dieser Eigendrehung stellt das Proton eine rotierende

³²⁰ vgl. Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 1 f.; Jäncke, L. (2005), S. 23; Jin, J. (1999), S. 3 f.; Seiderer, M. (1990a), S. 2

³²¹ Der menschliche Körper besteht ca. zu 70% aus Wasser, der Kopf sogar fast aus 90%.

Masse dar, welche in diesem Sinne einen Drehimpuls besitzt. „Da das Proton eine rotierende Ladung aufweist, besitzt es zudem ein magnetisches Moment (B) und verhält sich deshalb wie ein kleiner Stabmagnet.“³²² Besitzt ein Atomkern einen Drehimpuls und ein magnetisches Moment, so bezeichnet man ihn als Spin. Aufgrund dieser Eigenschaften reagieren Spins auf Magnetfelder und elektromagnetische Wellen.

Im Normalfall sind Spins hinsichtlich ihrer Magnetfeldlinien zufällig ausgerichtet (Abbildung 27a), während sie um ihre eigene Achse rotieren. Dies verändert sich, sobald man sie einem starken Magnetfeld aussetzt.³²³ Werden Spins von einem starken externen Magnetfeld, das in der Literatur meist als B_0 bezeichnet wird, umgeben, tendieren sie dazu, sich an diesem Magnetfeld auszurichten. Die Kraft, die in Form der Magnetfeldstärke auf die Spins wirkt, ruft hierbei eine *Präzession*³²⁴ der Spins hervor, welche als Ausgleichsbewegung in Folge der Krafteinwirkung zu verstehen ist. Diese Ausgleichsbewegung ähnelt einer Kreiselbewegung, die in Abbildung 26 veranschaulicht ist. Der Spin, der sich gleichzeitig um seine eigene Achse dreht, rotiert wie ein Kreisel um eine Präzessionsachse, die parallel zum externen Magnetfeld verläuft.

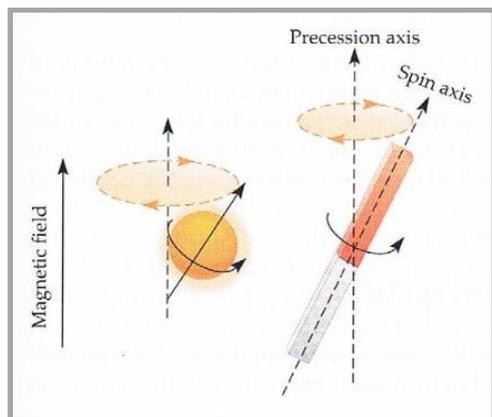


Abbildung 26: Präzessionsbewegung³²⁵

Die Frequenz dieser Präzession ist für einzelne Atomkerne unterschiedlich und zudem abhängig von der Magnetfeldstärke. Die für einen bestimmten Atomkern charakteristische Frequenz nennt man nach ihrem irischen Entdecker *Larmorfrequenz*³²⁶. Da das gyromagnetische Verhältnis, welches die Beziehung zwischen Ladung und Masse bzw. magnetischem Moment und Drehimpuls beschreibt, für die einzelnen Atomkerne bekannt ist, kann es dazu verwendet werden, die Larmorfrequenz der Atomkerne in Relation zu einem Tesla³²⁷ auszudrücken.³²⁸ Mit Hilfe dieser Information können dann die Larmorfrequenzen für unterschiedlich starke Magnetfelder be-

³²² Jäncke, L. (2005), S. 23

³²³ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 60 ff.

³²⁴ vgl. Jäncke, L. (2005) S. 24; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 61; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 2; Seiderer, M. (1990a), S. 7 f.; Vlaardingerbroek, M. T.; den Boer, J. A. (2004), S. 10 f.; Buxton, R. B. (2009), S. 71 ff.

³²⁵ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 61

³²⁶ vgl. Larmor, J. (1898)

³²⁷ Tesla ist eine Einheit für physikalische Größen. Sie gibt die magnetische Flussdichte an. Die Stärke des im Rahmen der MRT verwendeten Magnetfeldes wird in Tesla angegeben.

³²⁸ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 27

stimmt werden. Bspw. beträgt die Larmorfrequenz für Wasserstoffprotonen bei einer Magnetfeldstärke von 1,5 Tesla etwa 63 MHz.³²⁹

Wie bereits angesprochen, richten sich die Spins an der Feldlinie des externen Magnetfeldes aus. Abbildung 27b zeigt die zwei potentiellen Ausrichtungen eines Spins. Er könnte sich in Richtung der Feldlinie des externen Magnetfeldes ausrichten (parallel), aber es ist auch möglich, dass er sich antiparallel zur Feldlinie anordnet.

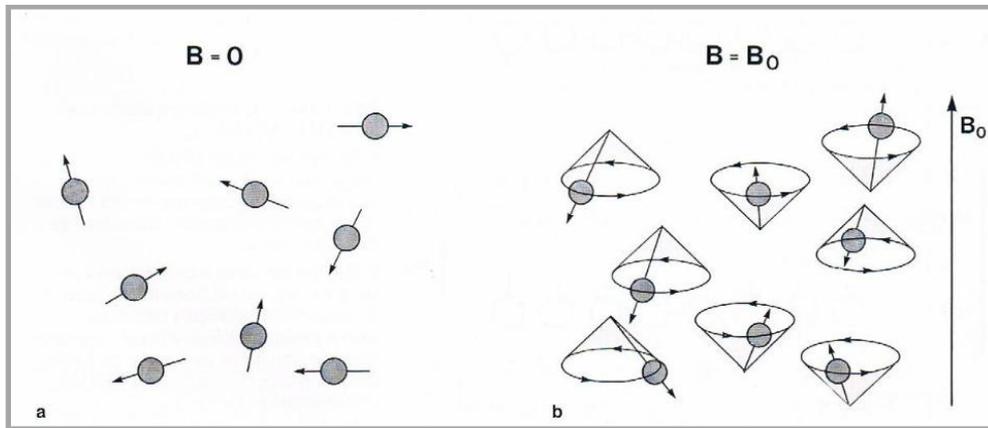


Abbildung 27: Ausrichtung der Spins außerhalb (a) und innerhalb eines Magnetfeld (b)³³⁰

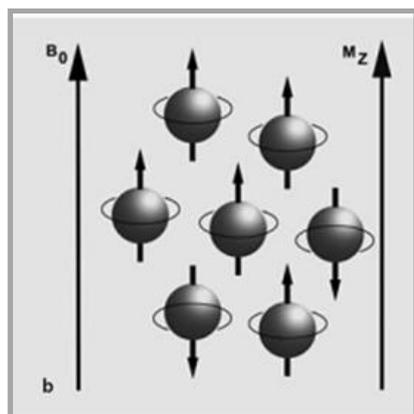
Diese beiden Ausrichtungsmöglichkeiten werden mit unterschiedlichen Energiezuständen verbunden. Die parallele Ausrichtung ist, aus einer Energieperspektive betrachtet, viel leichter einzunehmen, da sich die Spins in diesem Fall entlang der Feldlinie ausrichten und sich somit an den Energiefluss anpassen. In dieser Ausrichtung weist der Spin ein niedriges Energieniveau auf. Ordnen sich Spins hingegen antiparallel zum Magnetfeld an, liegt ein höheres Energieniveau vor, da sie sich entgegen dem Energiefluss ausrichten. Dies ist im Vergleich zu einer parallelen Ausrichtung mit einem höheren Energieaufwand verbunden. Unabhängig von paralleler oder antiparalleler Ausrichtung passen sich alle Spins an das externe Magnetfeld an. Im Endeffekt weist hierbei stets die Mehrzahl der Spins ein niedriges Energieniveau auf, da es für die Spins generell leichter ist, sich parallel zur Feldlinie anzuordnen.

Dadurch, dass sich die Protonen entlang der Achse des Magnetfeldes anordnen, baut sich eine sog. *Längsmagnetisierung* (M_z)³³¹ auf, die eine Art Gleichgewichtszustand der Spin-Ausrichtung repräsentiert. Sie wird mit M_z bezeichnet, da die Richtung des Magnetfeldes mit der Dimension z verbunden wird. Die um ihre eigene Achse rotierenden Spins befinden sich in einem relativ stabilen Zustand, wie durch Abbildung 28 verdeutlicht wird.

³²⁹ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 24

³³⁰ Seiderer, M. (1990a), S. 3

³³¹ vgl. Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 3

Abbildung 28: Längsmagnetisierung (M_z)³³²

An dieser Stelle sei angemerkt, dass die MRT nie an der Magnetisierung eines einzelnen Spins interessiert ist, sondern auf Spin-Ensembles bzw. Spin-Systeme innerhalb eines definierten Bereichs gerichtet ist.

Durch die Einstrahlung eines Hochfrequenzimpulses (HF-Impulses) ist es möglich, diese Spin-Systeme aus ihrem relativ stabilen Gleichgewicht zu bringen. Dies gelingt allerdings nur für den Fall, dass die Frequenz der eingestrahlten elektromagnetischen Welle mit der Larmorfrequenz der Spins übereinstimmt. Dies wird auch als Resonanzbedingung bezeichnet, da Spins im Endeffekt nur in diesem Fall im weiteren Verlauf eine messbare Resonanz in Form des MR-Signals erzeugen. Ist die besagte Resonanzbedingung erfüllt, wird die zugefügte Energie von den Spins aufgenommen. Dies führt dazu, dass sie aus der z-Richtung in die xy-Ebene kippen, die sich in einem rechten Winkel zu Dimension z befindet. Durch das Umkippen der Spins rotieren sie nun in der xy-Ebene. Die Längsmagnetisierung (M_z) verschwindet und eine *Quermagnetisierung* (M_{xy})³³³ baut sich auf. Diesen Vorgang, also das Verlassen des Gleichgewichtszustandes in Folge einer derartigen Energiezufuhr, bezeichnet man als *Anregung*³³⁴. Im Rahmen der Anregung nehmen die Atomkerne die eingestrahlte Energie auf, was einige Atomkerne dahingehend beeinflusst, dass sie ihr Energieniveau erhöhen, indem sie von einem niedrigen in einen höheren Energiezustand wechseln.

Wird der HF-Impuls eingestellt, bleibt die erzeugte Quermagnetisierung (M_{xy}) nicht lange erhalten. Aufgrund des weiterhin bestehenden äußeren Magnetfeldes tendieren die Spins dazu, wieder in z-Richtung zum Ausgangspunkt zurückzukehren und beginnen dann wiederum, um die z-Achse zu rotieren. Abbildung 29 verdeutlicht diesen Vorgang.

³³² Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 4

³³³ vgl. ebenda, S. 3 f.

³³⁴ vgl. Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 10 f.; Jäncke, L. (2005), S. 25; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 64 f.; Seiderer, M. (1990a), S. 9 ff.; Heinzerling, J. (1994), S. 3; Stöcker, T.; Shah, N. J. (2013), S. 63 f.

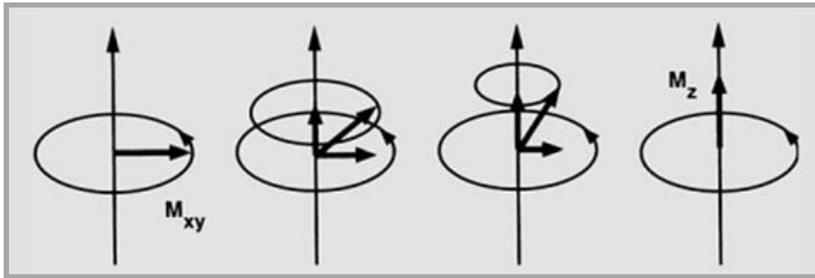


Abbildung 29: Von der Quermagnetisierung zurück in die Längsmagnetisierung³³⁵

Wie Abbildung 29 zu entnehmen ist, schwingen die Spins von der Quermagnetisierung (M_{xy}) wieder in die Längsmagnetisierung (M_z) zurück und geben die im Zuge der Anregung aufgenommene Energie wieder an das Umfeld ab. Dabei senden diese Spins Radiosignale aus, die von geeigneten Empfangsspulen erfasst werden können. Im Endeffekt wird auf diese Weise die Entwicklung der Quermagnetisierung (M_{xy}) nach Erlöschen des zur Anregung verwendeten Hochfrequenzpulses gemessen. Durch die Bewegung der Spins in Form des Zurückschwingens in die z-Richtung kann in der Detektor-Spule eine elektrische Spannung induziert werden. Abbildung 30 stellt das MR-Signal dar, welches auch als *Free Induction Decay (FID)*³³⁶ bezeichnet wird. Das Signal wird im Verlauf mit abnehmender Quermagnetisierung immer schwächer.

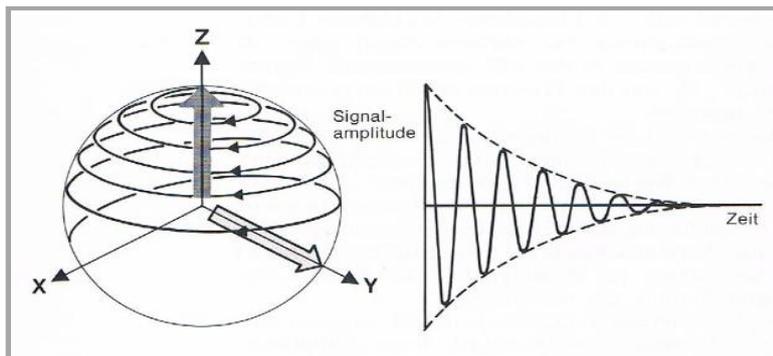


Abbildung 30: Free Induction Decay (FID)³³⁷

Wie aus den bisherigen Ausführungen geschlossen werden kann, ist die Grundlage des gemessenen MR-Signals die Magnetisierung innerhalb eines Spins-Systems. Diese Magnetisierung kann allerdings nicht aus einem Gleichgewichtszustand heraus gemessen werden. Dieser Sachverhalt kann gut anhand eines Beispiels³³⁸ veranschaulicht werden. Möchte man z.B. das Gewicht eines Objektes bestimmen, so ist dies durch das bloße Betrachten nicht möglich. Man muss es dazu hochheben. Durch das Hochheben des Objektes wird sein Gleichgewichtszustand in Bezug auf das Gravitationsfeld gestört. Über die Kraft, die dafür aufgebracht wurde, kann dann das Gewicht des Objektes bestimmt werden. Die Messung der Magnetisierung eines

³³⁵ Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 5

³³⁶ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 65; Buxton, R. B. (2009), S. 75 ff.; Jäncke, L. (2005), S. 35 f.; Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 59 f.; Heinzerling, J. (1994), S. 3 f.; Vlaardingerbroek, M. T.; den Boer, J. A. (2004), S. 16; Stöcker, T.; Shah, N. J. (2013), S. 64 f.

³³⁷ Heinzerling, J. (1994), S. 4

³³⁸ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 63 f.

Spin-Systems innerhalb eines externen Magnetfeldes verhält sich analog zu diesem Beispiel. Um die Magnetsierung zu messen, muss man das Spin-System zunächst aus seinem Gleichgewichtszustand bringen. Dies geschieht durch die Anregung des Spin-Systems mit Hilfe eines geeigneten Hochfrequenzimpulses. Durch die Anregung verändert sich die Orientierung des Spin-Systems. Anschließend kann die Reaktion auf die Störung des Gleichgewichtes beobachtet werden, was letztlich ermöglicht, die Magnetsierung zu messen.

Das MR-Signal wird im Zeitverlauf immer schwächer, da sich die Quermagnetisierung nach Beendigung der Anregung wieder zurückentwickelt. In dieser Phase erholen sich die Spins wieder und kehren zum Ausgangsgleichgewicht, der Längsmagnetisierung, zurück. In diesem Sinne spricht man im Kontext der Degeneration des Signals auch von *Relaxation*³³⁹. An der Relaxation sind zwei Prozesse beteiligt, die als T_1 - und T_2 -Relaxation bezeichnet werden. „Der Prozess der T_1 -Relaxation wird physikalisch präzise als die Zeit beschrieben, nach der die Längsmagnetisierung auf 63% der Originalstärke zurückgekehrt ist.“³⁴⁰ Daher wird die T_1 -Relaxation auch *longitudinal recovery* genannt. Eine komplette Wiederherstellung der ursprünglichen Längsmagnetisierung liegt allerdings erst dann vor, wenn sich die Spins zu 100% von der Anregung erholt haben. Dies erfolgt erst nach 3-5 T_1 -Zeiten. Die T_2 -Relaxation wird auch als *transverse decay* bezeichnet, da sie das Verschwinden bzw. Abklingen der Quermagnetisierung abbildet. Im Vergleich zur T_1 -Relaxation (0,5-5s) erfolgt die T_2 -Relaxation (100-300ms) wesentlich schneller. Nach einer Anregung rotiert das gesamte Spin-System synchron in der xy-Ebene. Da jeder Spin einen kleinen Magneten darstellt, beeinflussen sich nahe gelegene Spins gegenseitig. Präzessieren sie gleichmäßig, so verhalten sie sich wie in einzelner großer Magnet. Diese Synchronität zwischen den Spins führt dann zur Quermagnetisierung. Wird die Anregung des Spin-Systems beendet, hält diese Stimmigkeit bzw. Kohärenz jedoch nicht lange an, was dazu führt, dass einige Spins etwas schneller und andere etwas langsamer präzessieren. In der Folge der Entkopplung der Spins nehmen die Quermagnetisierung und somit auch das MR-Signal ab. „Physikalisch präzise ausgedrückt ist die T_2 -Zeit die Zeit, nach der die Transversalmagnetisierung (M_{xy}) auf 37% der Ausgangsgröße abgesunken ist.“³⁴¹ Die Quermagnetisierung hat sich ungefähr nach 4-5 T_2 -Zeiten komplett abgebaut. Ist hierfür allein die Wechselwirkung zwischen den Spins verantwortlich, spricht man von T_2 -Relaxation. Das Signal klingt noch schneller ab, wenn das Wirken von zeitlich konstanten Inhomogenitäten des Magnetfeldes B_0 hinzukommt. Dies wird dann als T_2^* -Relaxation bezeichnet.

In Abbildung 31 ist im oberen Bereich der Prozess der T_2 -Relaxation dargestellt, in der die Quermagnetisierung verschwindet. Nach Beendigung der Anregung verlieren die Spins zunehmend ihre gemeinsame Ausrichtung in der xy-Ebene, weshalb das

³³⁹ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 65 ff.; Jäncke, L. (2005), S. 28 ff.; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 12 f.; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 5 ff.; Seiderer, M. (1990a), S. 12 ff.; Heinzerling, J. (1994), S. 4 f.; Stöcker, T.; Shah, N. J. (2013), S. 65

³⁴⁰ Jäncke, L. (2005), S. 28

³⁴¹ ebenda, S. 30

MR-Signal immer weiter abnimmt. Im unteren Bereich ist die T_1 -Relaxation abgebildet, in der die Längsmagnetisierung wieder aufgebaut wird. Nachdem die Quermagnetisierung erloschen ist, tendieren die Spins dazu, sich wieder in der z-Dimension am statischen Magnetfeld auszurichten.

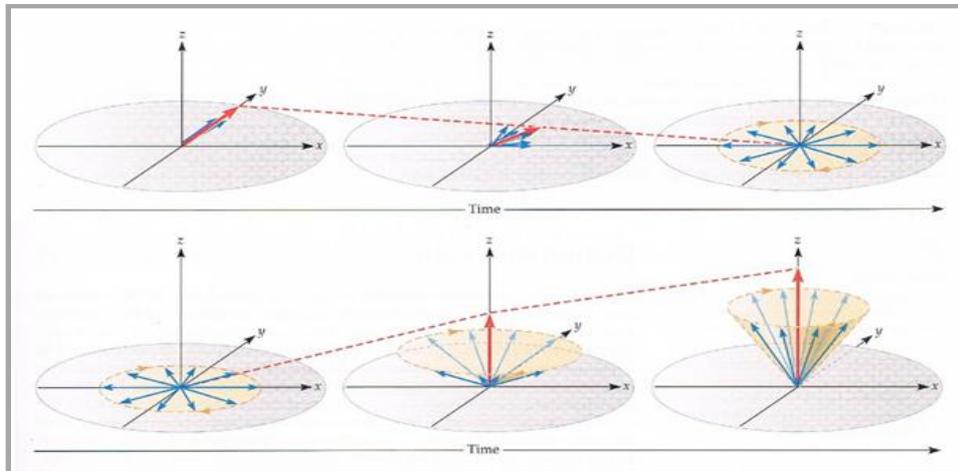


Abbildung 31: T_2 - und T_1 -Relaxation³⁴²

4.2 Bilderstellung

4.2.1 Grundlegende Anmerkungen

Nachdem die generelle Frage geklärt wurde, was das eigentliche MR-Signal ist bzw. wie es zustande kommt, geht es nun darum, wie auf Grundlage dieses Signal eine Visualisierung der verschiedenen Gehirnstrukturen erfolgt.

Ein Begriff, der hinsichtlich verschiedener Aspekte der MRT bzw. fMRT eine zentrale Bedeutung besitzt, ist der *Kontrast-Begriff*. Je nach Bereich wird mit ihm ein spezifischer Inhalt verbunden. Im Bereich der Bilderstellung ist mit Kontrast die grafische Differenzierungsfähigkeit gemeint. Je besser zwischen verschiedenen Bereichen unterschieden werden kann bzw. je besser man sie auseinander halten kann, desto besser ist der Kontrast. Visuelle Abbildungen sind dann gut gelungen, wenn sie auch sehr kleine Unterschiede zwischen Objekten zum Vorschein bringen. Die MRT zielt darauf ab, verschiedene Gewebetypen kenntlich zu machen, um einzelne Gehirnstrukturen besser voneinander abgrenzen zu können. Gut zwischen Gewebetypen diskriminierende Abbildungen visualisieren unterschiedliche Gewebetypen, z.B. weiße und graue Substanz, durch unterschiedliche Grauwerte. Wie hell bzw. dunkel ein bestimmtes Gewebe dargestellt wird, hängt von der Stärke des gemessenen MR-Signals ab. Ein stärkeres Signal führt hierbei zu einem helleren Grauton. Die Stärke des gemessenen MR-Signals variiert zwischen verschiedenen Gewebetypen in Abhängigkeit dreier Größen: *Protonendichte*, T_1 -Zeit und T_2 -Zeit. Die T_1 -Zeit gibt darüber Auskunft, wie schnell sich die Spins wieder in einem Gleichgewichtszustand befinden und dann wieder angeregt werden können. Die T_2 -Zeit sagt aus, wie schnell das nach einer Anregung gemessene Signal wieder zerfällt. Die Protonendichte ist in

³⁴² Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 66 f.

dem Gewebe am höchsten, in dem am meisten Wasserstoffatome vorhanden sind. Über die Auswahl einer geeigneten *Messsequenz* i.V.m. dem, im Rahmen der Anregungsphase verwendeten, Hochfrequenzimpuls, kann man die drei beschriebenen Komponenten unterschiedlich stark hervorheben und somit unterschiedliche Kontraste abbilden.

Bei der Durchführung einer MRT erfolgt die Aufzeichnung des Gehirns, indem zunächst eine *Schichtdicke* bestimmt wird. Je nach Dicke liegt eine entsprechende Anzahl von Schichten vor, in die das Gehirn von oben nach unten eingeteilt wird. Jede Schicht wird dabei durch mehrere kleine Quadrate gebildet, so dass das Gehirn im Endeffekt in viele kleine Würfel unterteilt wird. Ein Würfel wird hierbei als *Voxel* bezeichnet. Dies ist in Analogie zum Pixel bei digitalen zweidimensionalen Bildern die Bezeichnung für die kleinste Volumeneinheit. Bei der MRT kann das MR-Signal für jedes Voxel in Form einer Graustufe abgebildet werden. Die Messung erfolgt Schicht für Schicht. Um im Ergebnis eine dreidimensionale Gehirnabbildung zu generieren, muss dieser Vorgang mehrfach wiederholt werden, d.h. die einzelnen Schichten werden mehrfach angeregt.

Zwei weitere relevante Begriffe im Zusammenhang mit der Messung sind die Repetitionszeit (TR) und die Echozeit (TE).³⁴³

Die *Repetitionszeit (TR)* bestimmt die Zeitspanne nach der dieselbe Schicht über den Hochfrequenzpuls erneut angeregt wird. Je länger diese Zeitspanne gewählt wird, desto stärker kann sich die Längsmagnetisierung wieder aufbauen, d.h. es wird eine bessere T_1 -Relaxation zugelassen. „Für die Stärke des evozierten MR-Signals ist allerdings wichtig, dass zur Auslösung eines MR-Signals viel Längsmagnetisierung vorliegen muss.“³⁴⁴ Da sich die T_1 -Zeiten von verschiedenen Gewebetypen unterscheiden, kann eine relativ kurze Repetitionszeit gewählt werden, um einen T_1 -Kontrast zu erzeugen. Möchte man z.B. weiße und graue Substanz kontrastieren und wählt dazu eine kurze Repetitionszeit, so wird weiße Substanz heller und graue Substanz dunkler dargestellt. Der Grund für dieses Ergebnis liegt in den unterschiedlichen T_1 -Zeiten für beide Gewebe. Bei dem Gewebe mit der kürzeren T_1 -Zeit, also einer schnelleren Wiederherstellung der Längsmagnetisierung, kann bei einer bestimmten Repetitionszeit ein stärkeres MR-Signal generiert werden als bei einem Gewebe mit etwas längerer T_1 -Zeit. Im Rahmen derselben Repetitionszeit kann die Längsmagnetisierung dieses Gewebes nur zu einem geringeren Maß wiederhergestellt werden, so dass auch nur ein geringeres MR-Signal erzeugt werden kann. Dieses schwächere MR-Signal wird dann in Form der dunkleren Graustufe abgebildet. Wählt man eine längere Repetitionszeit, so dass beide Gewebetypen eine vollständige Längsmagnetisierung aufbauen können, so verschwindet folglich der Unterschied beider Gewebetypen hinsichtlich ihrer T_1 -Zeit.

Die *Echozeit (TE)* beschreibt die Zeitspanne, die zwischen Anregung und Messung des MR-Signals liegt. Der Begriff des Echos steht hierbei für den Wiederhall bzw. die Reaktion auf die Anregung. Die zu beantwortende Frage in diesem Zusammenhang

³⁴³ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 32 ff.; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marinček, B. (2009), S. 9 ff.

³⁴⁴ Jäncke, L. (2005), S. 32

ist, wann die Resonanz bzw. das Echo gemessen werden soll. Da sich Gewebetypen auch hinsichtlich ihrer T_2 -Zeit unterscheiden, gibt es zum einen Gewebetypen, deren T_2 -Zeit sehr kurz ist, bei denen folglich das Abklingen der Quermagnetisierung relativ schnell erfolgt. Zum anderen existieren auch Gewebetypen, die etwas länger brauchen, bis das MR-Signal abgeklungen ist. So wie bei einem T_1 -Kontrast eine kurze Repetitionszeit (TR) von Nutzen ist, um die Unterschiede zwischen verschiedenen Gewebetypen deutlich zu machen, ist in Bezug auf einen T_2 -Kontrast eine längere Echozeit (TE) in der Lage zwischen Gewebetypen zu differenzieren. Dies liegt daran, dass kurze Zeit nach der Anregung allgemein geringe Signalintensitätsdifferenzen vorliegen, da die T_2 -Relaxation erst begonnen hat und somit auch die Unterschiede geringer sind. Bei längeren Echozeiten sind die Unterschiede zwischen den Gewebetypen größer und somit ist je nach Gewebetyp die Signalintensität verschieden. In diesem Fall kann ein T_2 -Kontrast erstellt werden. Analog zum T_1 -Kontrast werden hier die Gewebetypen mit einem höheren MR-Signal hell und diejenigen mit einem schwächeren MR-Signal dunkler dargestellt.

Bei der Generierung von Bildkontrasten bezogen auf die *Protonendichte*³⁴⁵, wird hingegen durch eine Kombination von TR und TE versucht, sowohl eine T_1 - wie auch eine T_2 -Gewichtung so niedrig wie möglich zu halten. Hierzu muss eine TR verwendet werden, die länger dauert als T_1 und eine TE, die kürzer als T_2 ist. Dadurch unterscheidet sich das MR-Signal der Gewebetypen weder aufgrund von Unterschieden bezüglich ihrer T_1 - noch ihrer T_2 -Zeit. Der Unterschied in Bezug zur gemessenen Signalintensität entsteht dann nur durch die jeweils vorhandene Protonendichte, wobei Gewebe mit einer höheren Protonendichte ein stärkeres Signal aufweist und daher heller dargestellt wird.

Generell kann in Bezug auf Bildkontraste zwischen statischen und bewegungsbezogenen Kontrasten unterschieden werden. Bei den statischen Kontrasten erfolgt eine Fokussierung auf die Eigenschaften von speziellen Spins hinsichtlich der Art, Anzahl und ihrer Relaxationseigenschaften. Hingegen sind bewegungsbezogenen Kontraste sensibel bezogen auf die Bewegung von Atomkernen, z.B. in Folge des Blutflusses. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sind die bewegungsbezogenen Kontraste mit Blick auf die MRT nicht relevant, daher werden sie hier nicht weiter besprochen. Alle beschriebenen Kontraste sind Beispiele für statische Kontraste. Im Rahmen der MRT wird am häufigsten der T_1 -Kontrast eingesetzt, um eine 3D-Gehirnabbildung zu erstellen.

4.2.2 Generierung der räumlichen Information

Mit dem MR-Signal wird zwar die Basis der Bilderstellung geliefert, doch das MR-Signal allein enthält keine räumliche Information. Da sich die Spins in einem homogenen externen Magnetfeld befinden, erzeugt jeder Spin nach Anregung durch einen geeigneten Hochfrequenzpuls generell dieselbe Resonanz. Ist dies der Fall, kann

³⁴⁵ vgl. Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 15 f.

räumlich gesehen nicht zwischen den Spins unterschieden werden. Dies ist allerdings Grundvoraussetzung für eine Abbildung des menschlichen Gehirns.

Das zentrale Konzept, das dieses Hindernis beseitigt und hinter der Bildgebung steht, ist das Konzept des *magnetischen Gradienten*, welches auf Lauterbur³⁴⁶ und Mansfield³⁴⁷ zurückgeht. Die Idee bestand darin, ein zweites Magnetfeld auf das bereits vorhanden externe Magnetfeld (B_0) aufzusetzen, das in Bezug auf seine Stärke systematische Inkonsistenzen über den Raum aufwies. Dadurch präzessierten Spins an unterschiedlichen Orten des externen Magnetfeldes in einer unterschiedlichen Frequenz. „*By measuring changes in magnetization as a function of precession frequency, the total MR signal can be separated into components associated with different frequencies, thus providing information about the spatial distribution of the targeted atomic nuclei.*“³⁴⁸ Die unterschiedlichen Frequenzen der Spins werden durch den Einsatz von magnetischen Feldgradienten ermöglicht. Um einen Feldgradienten zu erzeugen, benötigt man zwei sich gegenüberliegende Gradientenspulen. Die eine verstärkt das externe Magnetfeld, die andere schwächt das Magnetfeld um denselben Betrag ab. Im Ergebnis kann eine systematische Variation des Magnetfeldes bezogen auf eine Richtung generiert werden. „*Dadurch entsteht ein linearer Gradient oder, anders ausgedrückt, ein sich linear änderndes Magnetfeld.*“³⁴⁹ Da die Larmorfrequenz auch von der Magnetfeldstärke abhängt, weisen die Spins in Abhängigkeit von ihrer Position durch den Einsatz von Gradienten teils etwas höhere, teils etwas niedrigere Frequenzen auf. Da im Rahmen der MRT dreidimensionale Gehirnabbildungen erzeugt werden sollen, wird nicht nur ein Paar von Gradientenspulen benötigt, sondern jeweils ein Paar pro Dimension. Ein Gradient verändert das Magnetfeld von oben nach unten. Im oberen Kopfbereich ist das Magnetfeld in der Folge dann etwas stärker, im Kinnbereich hingegen etwas schwächer. Dieser Gradient wird mit G_z bezeichnet, da er sich entlang der Magnetfeldlinie auswirkt und diese typischerweise in z-Richtung verläuft. Zusätzlich verändert G_x das Magnetfeld in horizontaler Weise, beispielsweise von linkem Ohr zu rechtem Ohr. G_y bewirkt eine vertikale Veränderung, indem das Magnetfeld an der Nase stärker ist und zum Hinterhaupt hin wieder schwächer wird. Da mit Hilfe dieser Gradienten Spins in unterschiedlichen Bereichen innerhalb eines externen Magnetfeldes mit unterschiedlichen Frequenzen präzessieren, kann nun über das MR-Signal eine räumliche Information generiert werden, welche für eine Bilderstellung unabdingbar ist.

Festzuhalten bleibt an dieser Stelle, dass sich zwar die Stärke des Magnetfeldes in den drei Dimensionen verändert, die Richtung des externen Magnetfeldes allerdings stets unbeeinflusst bleibt. Ferner gilt, dass die unterschiedlichen Gradienten i.d.R. nicht gleichzeitig aktiv sind. Da jeder Gradient Einfluss auf die Larmorfrequenz der Spins nimmt, müssen sie in einer gewissen Systematik an- und ausgeschaltet werden. Diese Systematik wird gemeinsam mit der Anregung durch einen Hochfrequenzimpuls in Form einer *Pulssequenz* bzw. *Messesequenz* definiert.

³⁴⁶ vgl. Lauterbur, P. C. (1973)

³⁴⁷ vgl. Mansfield, P.; Grannell, P. K. (1973)

³⁴⁸ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 89

³⁴⁹ Jäncke, L. (2005), S. 37

Im Rahmen der Bilderstellung können grob gesprochen zwei Schritte unterschieden werden. Zunächst erfolgt eine *selektive Schichtanregung*, woran sich eine *Ortskodierung* anschließt. Der Vorgang der Ortskodierung wird dabei in Frequenz- und Phasenkodierung unterteilt. Jeder dieser Schritte bezieht sich auf eine der drei Dimensionen. In Kombination führt dieses Vorgehen letztlich dazu, dass für jeden Voxel eine Grauabstufung generiert werden kann, die für einen dreidimensionalen Bildkontrast benötigt wird. Im Endeffekt wird diese dreidimensionale Darstellung durch die Verknüpfung vieler zweidimensionaler Schichten ermöglicht.

Der erste Schritt bei diesem Vorgehen besteht in der *selektiven Schichtanregung*³⁵⁰, welche zunächst Dimension z betrifft. Durch das Einschalten des entsprechenden Gradienten kann das Gehirn von oben nach unten in verschiedene Schichten eingeteilt werden. Da die Spins durch die Wirkung von G_z in jeder Schicht unterschiedliche Präzessionsfrequenzen aufweisen, können sie auch jeweils durch spezifische Hochfrequenzimpulse angeregt werden. Durch die Auswahl des Pulses, der mit der Frequenz einer bestimmten Schicht übereinstimmt, wählt man die Schicht aus, die angeregt werden soll, während alle anderen Schichten keine Resonanz auf den speziellen Puls zeigen. Abbildung 32 (A) zeigt den Idealfall, in dem alle Spins einer Schicht dieselbe Frequenz aufweisen und somit durch einen HF-Impuls angeregt werden können. Wahrscheinlicher in Bezug auf den eingesetzten Gradienten G_z ist allerdings der Fall, dass auch für die Spins einer Schicht leicht unterschiedliche Frequenzen vorliegen, wie in Abbildung 32 (B) dargestellt.

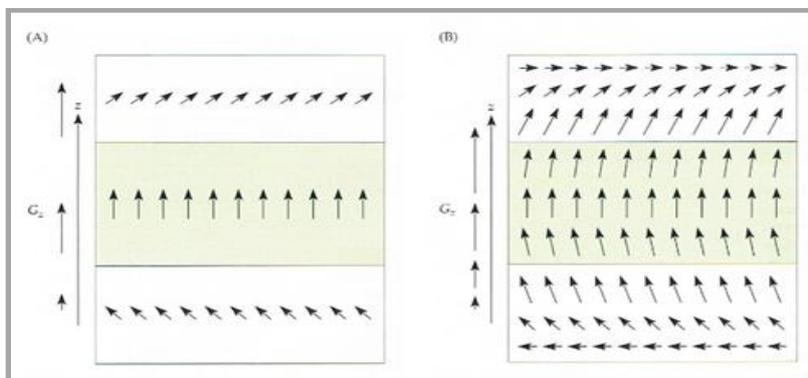


Abbildung 32: Auswirkung des Gradienten auf die Spinfrequenz³⁵¹

In diesem Fall kann über die Anregung mittels einer Bandbreite von benachbarten Frequenzen die Definition der Schichtdicke erfolgen. Auf diese Weise werden benachbarte Spins innerhalb derselben Schicht trotz leicht unterschiedlicher Frequenzen gleichermaßen angeregt.

Nachdem eine Schicht ausgewählt und angeregt wurde, weisen alle Spins innerhalb dieser Schicht dieselbe Präzessionsfrequenz auf. In diesem Sinne tragen sie alle gleichermaßen zum messbaren MR-Signal bei, welches die Summe aller Magnetisierungen repräsentiert. Um den Beitrag der einzelnen Spins bzw. Spin-Systeme zu ei-

³⁵⁰ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 91 ff.; Jäncke, L. (2005), S. 37 f.; Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 104 ff.

³⁵¹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 92

nem MR-Signal zu ermitteln, muss eine sogenannte *Ortskodierung*³⁵² erfolgen. Hierbei wird durch die Verwendung der beiden verbleibenden Gradienten (G_x und G_y) ermöglicht, dass Spins bzw. Spin-Ensembles innerhalb einer Schicht in einem zweidimensionalen Koordinatensystem lokalisiert werden können. Nach der selektiven Schichtauswahl hängt die gemessene Magnetisierung nun nur noch von Dimension x und y ab. Auf diese Weise ist man in der Lage, den Beitrag eines jeden Bildelementes in jeder Schicht zu erfassen. Der erste Schritt im Zuge der Ortskodierung nennt sich *Frequenzkodierung* und bezieht sich auf den Gradienten G_x . Durch Einschaltung von G_x variiert das Magnetfeld nun horizontal, d.h. dass es zum linken Ohr hin schwächer und zum rechten Ohr hin stärker wird. Dadurch weisen die Spins jeder durch G_x gewonnenen Spalte einer Schicht unterschiedliche Präzessionsfrequenzen auf und sind innerhalb einer Schichtspalte identisch. Man erreicht an diesem Punkte eine eindimensionale Differenzierung der Spins in Bezug auf die jeweilige Schicht. Um zu einer zweidimensionalen Einteilung der Schichten zu gelangen, wird in einem weiteren Schritt der Gradient G_y eingesetzt. Dies wird auch als *Phasenkodierung* bezeichnet, da sich die Spins einer Spalte bereits in Phase befinden und durch das Einschalten von G_y auch anhand der vertikalen Dimension variieren. Wichtig ist hierbei, dass die beiden Gradienten G_x und G_y aufeinander abgestimmt sind, so dass sich die Spins einer Schicht nun zweidimensional anhand ihrer Präzessionsfrequenz unterscheiden. Generell gesehen sollten G_x und G_y ³⁵³ eher nacheinander als gleichzeitig eingesetzt werden. Wie bereits angemerkt, beeinflussen alle Gradienten die Stärke des Magnetfeldes, aber nicht dessen Richtung. Schaltet man bspw. gleichzeitig einen stark positiven G_x und einen stark positiven G_y so führt dies dazu, dass sich die Präzessionsfrequenz der Spins einer Schicht entlang einer diagonalen Achse linear voneinander unterscheiden, z.B. von links oben nach rechts unten. Allerdings entspricht dies lediglich einer eindimensionalen Information. Folglich müssen die Gradienten aufeinander eingestellt sein. Unterschiedliche Messsequenzen müssen nicht selber definiert werden, sondern sind im Rahmen eines MR-Scanners bereits vorhanden.

Zusammenfassend können die dargestellten Schritte, die im Zuge der Berechnung der räumlichen Information benötigt werden, in Form von Abbildung 33 veranschaulicht werden. Wie bereits angemerkt wurde, werden die drei Gradienten generell im Rahmen der MRT nicht gleichzeitig eingeschaltet. Da das gemessene MR-Signal in Bezug auf die T_2 -Zeit relativ schnell zerfällt, müssen die drei Gradienten mit dem zur Anregung verwendeten Hochfrequenz-Puls in ein systematisches Ablaufschema gebracht werden. Aufgrund der kurzen Zeitspanne zwischen Anregung (RF pulse excitation) und Messung des MR-Signals (Readout) müssen die drei Gradienten sehr effizient eingesetzt werden. In der Abbildung erfolgt die Phasenkodierung vor der Frequenzkodierung; dies stellt kein Problem dar, da beide aufeinander abgestimmt sind und somit ihrer jeweilige Funktion auch in dieser Reihenfolge gerecht werden

³⁵² vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 93 ff.; Jäncke, L. (2005), S. 38 f.; Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 111 ff.

³⁵³ G_z kann auch in dieses Argument einbezogen werden.

können. Dieses Ablaufschema wird im übertragenen Sinne auch als *Pulssequenz* bzw. *Messesequenz* bezeichnet.

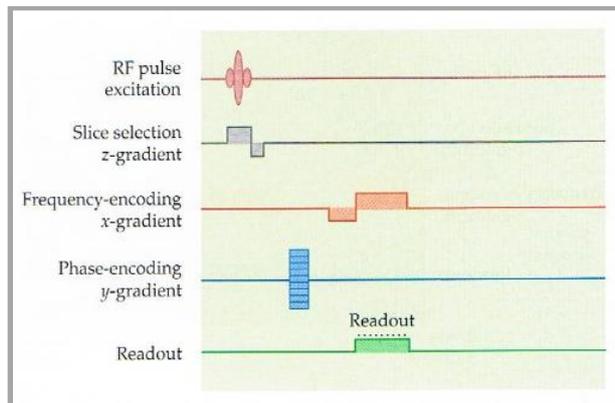


Abbildung 33: Schematische Darstellung einer Puls- bzw. Messesequenz³⁵⁴

Nachdem nun das generelle Vorgehen skizziert wurde, mit dem der Beitrag der einzelnen Bildpunkte einer Schicht zum MR-Signal unterschieden und erfasst werden kann, stellt sich noch die Frage, wie die voxelweise gemessenen MR-Signale in eine kontrastreiche Gehirnabbildung übersetzt werden.

Durch die selektive Schichtanregung und die anschließende Ortskodierung über den Einsatz von G_x und G_y ist es möglich, eine Matrix mit Raumfrequenz-Informationen für die jeweils ausgewählte Schicht zu generieren.³⁵⁵ Diese Matrix wird auch als *K-Raum* bezeichnet, in dem die Rohdaten für die MR-Bilderstellung gespeichert werden. Die Auffüllung eines K-Raumes mit den entsprechenden Informationen erfolgt über die Kombination von Frequenz- und Phasenkodierung. Durch G_x kommt man zu den Raumfrequenz-Informationen einer Zeile, über die Variation von G_y kann wiederum die Erfassung innerhalb der verschiedenen Zeilen einer Matrix gesteuert werden. Im Ergebnis liegt ein *K-Raum*³⁵⁶ vor, der die Raumfrequenz-Informationen einer kompletten Matrix in Form von vielen verschiedenen Graustreifenmustern wiedergibt. Dies sind die Rohdaten für die MR-Bildgebung. In Abbildung 34 ist zu erkennen, dass einzelne Elemente des K-Raums durch unterschiedliche Graustreifenmuster repräsentiert werden. Nah am Zentrum des Koordinatenursprungs befinden sich breitere bzw. gröbere Streifenmuster, die einer geringen Raumfrequenz entsprechen. Elemente die etwas weiter entfernt vom Zentrum liegen, sind durch feinere Streifenmuster gekennzeichnet. Sie stehen für höhere Raumfrequenzen.

³⁵⁴ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 96

³⁵⁵ vgl. Stöcker, T.; Shah, N. J. (2013), S. 66 ff.

³⁵⁶ vgl. Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 109 ff.; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 25 f.; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 22 f.

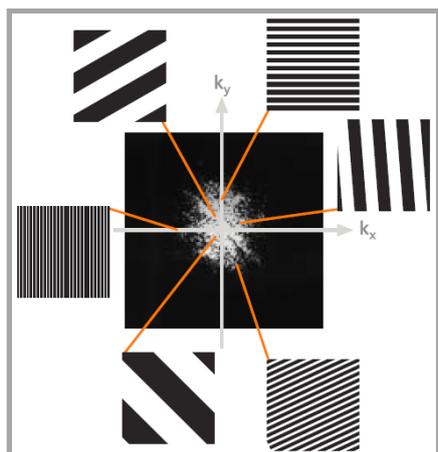


Abbildung 34: Beispielfhafte Graustreifenmuster für einzelne Elemente des K-Raumes³⁵⁷

Im K-Raum steht jedes Element für eine bestimmte Raumfrequenz verknüpft mit der gesamten zu messenden Gehirnschicht. Über eine zweidimensionale Fourier-Transformation entsteht aus der Überlagerung aller Raumfrequenzen die grafische Darstellung der Gehirnschichten. Zum besseren Verständnis kann dieser Prozess anhand eines einfachen Beispiels³⁵⁸ zur Überlagerung zweier Graustreifenmuster nachvollzogen werden. Im oberen Bereich von Abbildung 35 werden ein Muster mit senkrechten Streifen und ein Muster mit waagerechten Streifen übereinandergelegt. Im Ergebnis entsteht ein komplexeres Muster mit einer neuen Streifenstruktur und neuen Grauwerten.

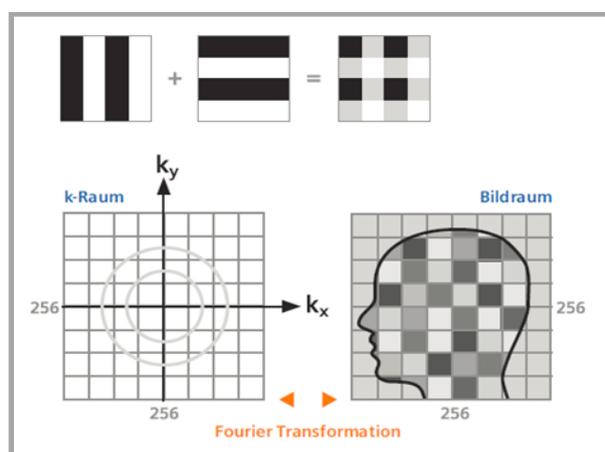


Abbildung 35: Überführung des K-Raumes in den Bildraum³⁵⁹

Im unteren Bereich von Abbildung 35 erfolgt eine Gegenüberstellung des K-Raumes mit dem Bildraum. Die Darstellung des K-Raumes beschreibt über die beiden Kreise die Struktur des K-Raumes. Im Zentrum befinden sich geringe Raumfrequenzen. Je weiter es in einer kreisförmigen Ausdehnung in Richtung K-Raum-Rand geht, desto höhere sind entsprechend die Raumfrequenzen. Über besagte Fourier-Transformation wird der K-Raum in die entsprechende Gehirnschichtabbildung mit Grauwerten für die unterschiedlichen Gewebetypen umgewandelt. Das MR-Bild ist

³⁵⁷ Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 117

³⁵⁸ vgl. ebenda, S. 118

³⁵⁹ ebenda, S. 118

das Ergebnis der Verknüpfung aller geringeren und höheren Raumfrequenzen. „*Mathematisch betrachtet ist das MR-Signal S (bzw. die gesamte aufgenommene Matrix) eine Funktion der Raumfrequenzen (k_x, k_y) und wird durch die 2D-FT in Ortsinformationen (x,y) umgewandelt*“³⁶⁰. Einfach dargestellt bedeutet dies:

„ $S = S(k_x, k_y) \rightarrow 2D\text{-FT} \rightarrow \text{MR-Bild}: S = S(x,y)$ “³⁶¹.

Ohne näher auf die genaue mathematische Beziehung zwischen K- und MR-Bild einzugehen, soll an dieser Stelle festgehalten werden, dass K-Raum und Bildraum keine Eins-zu-Eins-Beziehung aufweisen. Damit ist gemeint, dass ein bestimmter Punkt im K-Bild keine direkte Repräsentation desselben Punktes im Bildraum darstellt. Abbildung 36 beschreibt den grundlegenden Unterschied bzw. die theoretische Verbindung zwischen beiden Bildern.

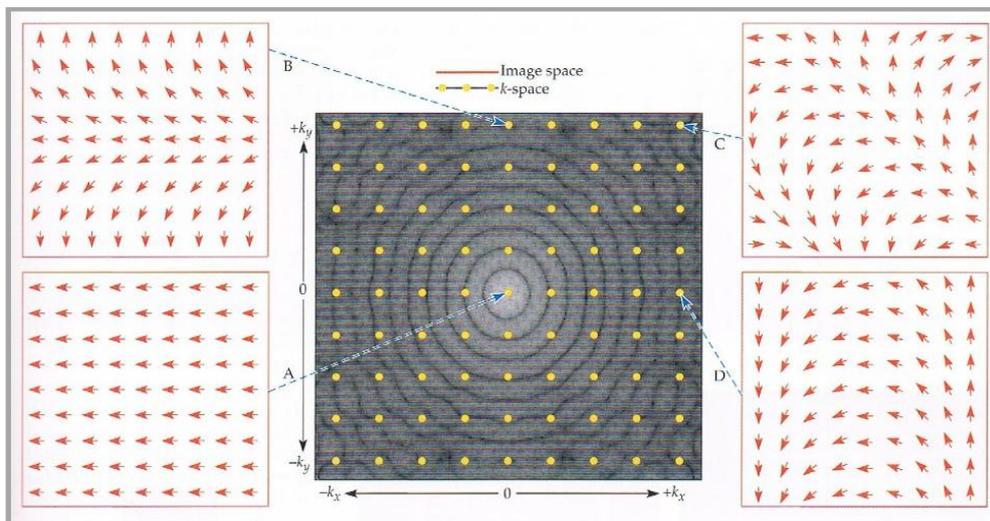


Abbildung 36: Theoretische Verbindung zwischen K- und MR-Bild³⁶²

In dieser Darstellung sind sowohl ein K-Raum (k_x, k_y) wie auch vier beispielhafte Darstellungen aus dem normalen Raum (x,y) abgebildet.³⁶³ Der K-Raum im Zentrum setzt sich aus verschiedenen, gelb markierten Datenpunkten zusammen. Hierbei beinhaltet ein Datenpunkt die Summe der MR-Signale von allen Punkten einer Schicht jeweils in Bezug zu einer bestimmten Ausprägungskombination des x- und y-Gradienten. Im Ergebnis wird die Information, die in jedem Datenpunkt steckt, als ein Grauwertmuster wiedergegeben. Die roten Abbildungen veranschaulichen den Bildraum, wobei jeder Datenpunkt durch einen Pfeil symbolisiert wird, dessen Richtung Auskunft über die Phase eines Spin-Systems gibt. Die Summe aller Datenpunkte im Bildraum steht stellvertretend für eine aufzuzeichnende Gehirnschicht. Wie anhand dieser Beschreibung zu erkennen ist, spiegeln die einzelnen Datenpunkte der beiden Räume nicht dieselbe Information wieder. Im Gegenteil, ein K-Raum kann als Zusammenfassung aller gemessenen Signale in einer Schicht bezogen auf alle möglichen k_x - und k_y -Kombinationen verstanden werden. In diesem Sinne stellt jeder K-

³⁶⁰ Stöcker, T.; Shah, N. J. (2013), S. 68

³⁶¹ ebenda, S. 68

³⁶² Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 115

³⁶³ vgl. ebenda, S. 114 f.

Raum eine große Menge an Raumfrequenz-Informationen dar, die letztendlich dazu benötigt werden, schichtweise kontrastreiche Gehirnabbildung zu generieren.

In Abbildung 36 steht jeder der vier Datenpunkte des K-Raumes stellvertretend für eine bestimmte Kombination von k_x und k_y . Der Datenpunkt im Zentrum (A) stellt eine Situation dar, in der sich alle Spin-Systeme in der gleichen Phase befinden und daher gleich ausgerichtet sind. Dies ist darin begründet, dass k_x und k_y hier beide den Wert Null annehmen. Es liegt folglich keine Variation bezogen auf eine der beiden Richtungen vor. Im Vergleich zu den drei anderen Datenpunkten ist in dieser Situation das MR-Signal aufgrund der homogenen Spin-Ausrichtung am höchsten. Im Rahmen der drei anderen Datenpunkte variieren die Phasen der einzelnen Spin-Systeme mal mehr und mal weniger. Dies hat seine Ursache in der jeweiligen Kombination von k_x und k_y . Punkt B zeigt zwar für k_x den Wert 0, jedoch in Bezug auf k_y eine maximale Ausprägung. Aus diesem Grund variieren die Phasen innerhalb einer Schicht stark entlang der y-Richtung; dies führt zu einer abnehmenden MR-Signalstärke. In Punkt C weisen k_x und k_y jeweils die maximale Ausprägung auf, was insgesamt die größte Phasen-Variation mit sich bringt, da die Variation sowohl entlang der x- als auch der y-Richtung erfolgt. Punkt D, zeigt die Phasenverteilung für den Fall, dass k_y den Wert Null aufweist und k_x den Maximalwert annimmt. Hier variieren die Spin-Systeme in Bezug auf die x-Richtung.

Bei der Betrachtung eines K-Bildes gilt generell, dass im Zentrum der Darstellung, also in der Nähe des Koordinatenursprungs, die langsameren, breiteren Raumfrequenzen abgebildet werden. „*Note that the center of k-space represents the point in time when the signals from all voxels are at the same phase, so it represents the total transverse magnetization within the slice. Thus, the center always has the highest signal of any point in k-space.*“³⁶⁴ Im Kernbereich ist die Stärke beider Gradienten gering, wodurch eine geringe Frequenz und eine längere, breitere Streifen- bzw. Wellenform hervorgerufen wird. Da in diesem Bereich das stärkste MR-Signal erzeugt wird, wird der K-Raum im Zentrum am hellsten dargestellt. Die Bereiche, die etwas weiter vom Zentrum des K-Raumes entfernt liegen, stellen Bereiche geringerer MR-Signale dar. Diese werden im Vergleich zum Zentrum dunkler abgebildet. Es handelt sich um Situationen, in denen die Frequenz in Richtung des K-Raum-Randes nach außen hin zunimmt; dies wiederum ruft kürzere, schmalere Streifen- bzw. Wellenmuster hervor.

Grob gesprochen kann ein K-Raum in den Bereich um das Zentrum und die Peripherie geteilt werden. Im Zentrum kommen die langsamen, breiten Raumfrequenzen zum Ausdruck, in der Peripherie finden sich die höheren Frequenzen mit den schmalen, feineren Wellen wieder. Diese Aufteilung und ihre Bedeutung für die MR-Bilderstellung kann anhand von Abbildung 37 noch einmal genauer nachvollzogen werden.

³⁶⁴ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 113

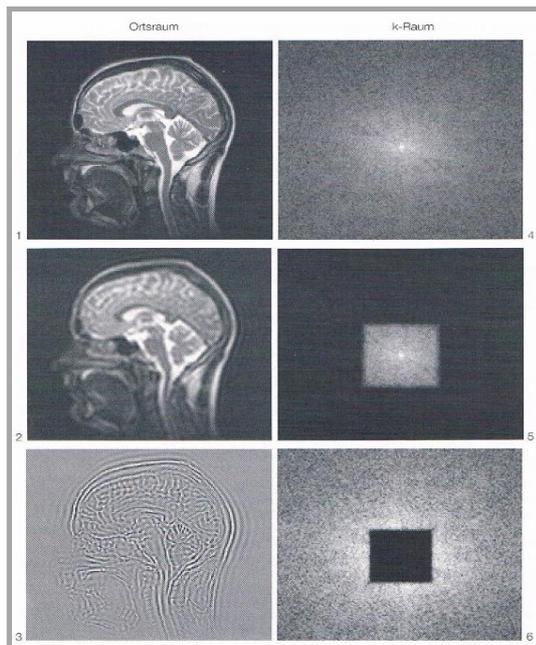


Abbildung 37: Praktische Beziehung zwischen K- und Ortsraum³⁶⁵

Hier liegen drei Bildpaare vor, die die Beziehung zwischen dem K-Raum und dem MR-Bild veranschaulichen sollen. Innerhalb der Abbildung wird dem K-Raum jedes Mal ein korrespondierendes zweidimensionales Bild gegenübergestellt, gleichbedeutend mit einer aufgezeichneten Gehirnschicht. In der obersten Darstellung ist ein gut aufgelöstes Bild zu erkennen, das zudem über einen vernünftigen Kontrast verfügt. Um eine derartige Auflösung zu erreichen, sind die Daten des gesamten K-Raumes nötig. In den beiden anderen Abbildungen sind die Konsequenzen für den Fall dargestellt, dass nicht alle Informationen aus dem K-Raum für die Erstellung des MR-Bildes verwendet werden bzw. nicht zur Verfügung stehen. Werden nur die im Zentrum des K-Raumes befindlichen Informationen für die Bilderstellung verwendet, so liegt im Ergebnis zwar ein guter Kontrast vor, der sich in den farblichen Differenzierungen verschiedener Bildbereiche zeigt (mittlere Gehirnabbildung). Allerdings sind im Vergleich zur oberen Abbildung Details nur schwer zu erkennen. Greift man im Gegensatz dazu nur auf die Informationen aus der K-Raum-Peripherie zurück, sind nun zwar Details erkennbar, doch ohne einen konkreten Kontrast aufzuweisen (untere Gehirnabbildung).

Diese Beispiele unterstreichen die Zusammenhänge zwischen K-Raum und MR-Bild. Im Zentrum des K-Raumes befinden sich eher langsame Raumfrequenzen, die für die Kontraste und somit auch für das Signal-zu-Rausch-Verhältnis in Abbildungen verantwortlich sind. Betrachtet man erneut Abbildung 34³⁶⁶, so erkennt man, dass geringe Raumfrequenzen durch grobe Streifenmuster repräsentiert werden, welche bei der generellen Unterscheidung zwischen verschiedenen Objekten hilfreich sind. Sie definieren grobe Strukturen und den Kontrast. Die etwas weiter entfernten Bereiche um das Zentrum herum stellen höhere Raumfrequenzen dar, die für die Abbildung von Bilddetails und damit der räumlichen Auflösung entscheidend sind. In Ab-

³⁶⁵ Heinzerling, J. (1994), S. 16

³⁶⁶ Abbildung 34: Beispielhafte Graustreifenmuster für einzelne Elemente des K-Raumes

bildung 34 werden sie durch feinere Streifenmuster beschrieben. Datenpunkte in der Peripherie des K-Raumes definieren feinere Strukturen, wie Umriss, Kantenübergänge und Ränder. Sie tragen maßgeblich zur Auflösung des MR-Bildes bei.

MRT-Bilder stellen zweidimensionale Fourier-Transformationen des K-Raumes dar. Es ist somit möglich, die Menge an Raumfrequenz-Informationen in kontrastreiche und gut aufgelöste Abbildungen von Gehirnschichten zu überführen. Im Rahmen der MRT erfolgt diese zweidimensionale Transformation Schicht für Schicht. Nach der Aufzeichnung werden die Schichten über entsprechende Programme zusammengefügt, so dass im Ergebnis dreidimensionale Gehirnabbildungen entstehen können.

4.2.3 Bildqualität

Das zentrale Ziel der strukturellen Magnetresonanztomographie (MRT) ist es, kontrastreiche Abbildungen verschiedener Gewebetypen zu generieren, die möglichst feine Unterschiede herausstellen. Das gemessene MR-Signal ist dabei die Grundlage der MRT. Wie bereits besprochen, kann mit Hilfe der Gradientenspulen für die x-, y- und z-Dimension über dieses Signal eine räumliche Information generiert werden, ohne die eine Bilderstellung nicht möglich ist. In den seltensten Fällen liegen bei einer Messung reine Signale vor. Vielmehr existieren zu einem gewissen Grad Stör-signale bzw. Rauschen. Generell gilt: *„Die wichtigsten Kriterien der Bildqualität sind: Ein starkes Signal, geringes Rauschen, guter Kontrast und eine ausreichende Auflösung.“*³⁶⁷

Die Signalstärke weist unterschiedliche Abhängigkeiten auf. Da das MR-Signal die Summe der vorhandenen Magnetisierungen abbildet, hat die Protonendichte einen gewissen Einfluss auf die Signalstärke. Je mehr Spins innerhalb einer Messeinheit angeregt werden können, desto größer ist im Ergebnis die messbare Gesamtmagnetisierung. Zudem wird die Signalintensität von den Relaxationseigenschaften der unterschiedlichen Gewebetypen beeinflusst, so dass von jeder Messeinheit eine kontrastbezogene individuelle Signalstärke erzeugt wird. Ein über eine entsprechende Messequenz angestrebter Bildkontrast ergibt sich durch die Signaldifferenz in Bezug auf unterschiedliche Gewebetypen. Abbildung 38 veranschaulicht dies, indem die gemessenen Signale zweier Messeinheiten (S_A / S_B), die unterschiedliche Gewebetypen (A/ B) repräsentieren, miteinander verglichen werden, um eine Signaldifferenz zu bilden.

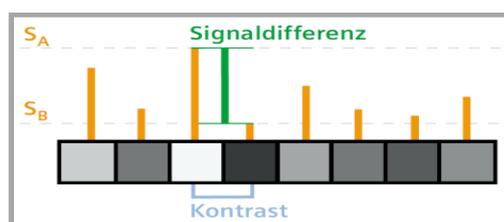


Abbildung 38: Signaldifferenz zwischen zwei unterschiedlichen Gewebetypen³⁶⁸

³⁶⁷ Siemens AG, Medical Solutions (2004), S. 4

³⁶⁸ ebenda, S. 5

Jedes MR-Bild besteht allerdings nicht nur aus reinen MR-Signalen, sondern beinhaltet auch ein ungewünschtes Phänomen, das Rauschen. Dieses stellt eine permanent gegenwärtige Quelle zur Verschlechterung der Bildqualität dar. „Das Rauschen ist eine statistische Schwankung der Signalintensität, die nicht zur Bildinformation beiträgt.“³⁶⁹ Im Gegensatz zu den einzelnen MR-Signalen liegt der Ursprung des Rauschens nicht in den einzelnen Bildelementen oder Voxeln. Vielmehr „entsteht das Rauschen im gesamten Körper des Patienten, durch die gewöhnliche Molekularbewegung geladener Teilchen. Das ist die Brown'sche Molekularbewegung. Hinzu kommt das elektronische Rauschen der Empfangstechnik.“³⁷⁰ Dieses Rauschen ist permanent existent und kann nicht ausgeblendet werden. Die Gegenwart des Rauschens stellt hierbei kein generelles Problem dar. Kritisch wird es allerdings, wenn die gemessenen MR-Signale (orange Balken in Abbildung 39) so klein sind, dass sie durch das stets im Hintergrund befindliche Rauschen (graues Wellenmuster) überragt werden. In Abbildung 39 ist diese Situation in drei Fällen gegeben (rote Kästchen).

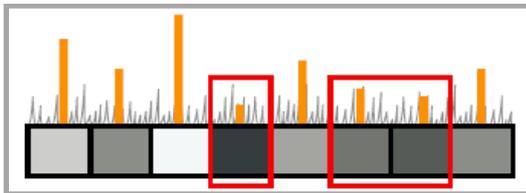


Abbildung 39: Signal und Rauschen³⁷¹

Liegt ein derartiger Fall vor, verschlechtert sich die Bildqualität, da das zur Kontrasterstellung benötigte MR-Signal nun nicht mehr vom Rauschen unterschieden werden kann bzw. dadurch gar nicht in Erscheinung tritt.

Abbildung 40 zeigt, wie man sich das Rauschen in Bezug auf ein MR-Bild vorzustellen hat. Die linke und die mittlere Abbildung wurden auf dieselbe Weise erhoben und anhand der Grauwerte pixelweise voneinander abgezogen. Im Ergebnis der Subtraktion der Signale bleibt das Rauschen übrig, das in der rechten Abbildung grafisch als unsystematisches Muster dargestellt ist. In diesem Sinne spricht man vom Rauschhintergrund, der prinzipiell in jedem MR-Bild vorhanden ist.

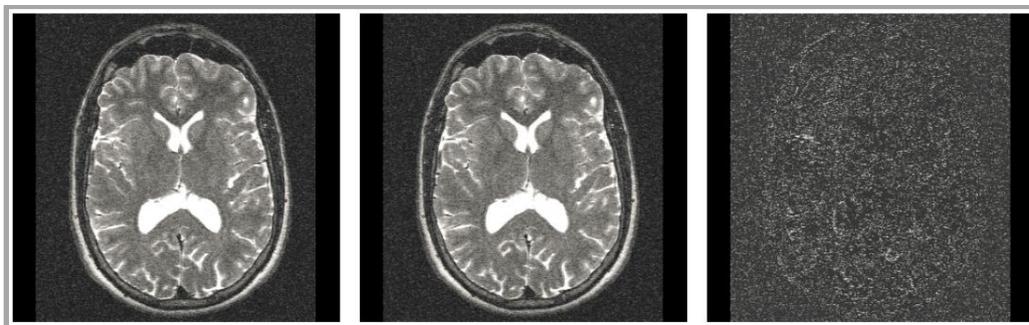


Abbildung 40: Grafische Darstellung des Rauschens³⁷²

³⁶⁹ Siemens AG, Medical Solutions (2004), S. 6

³⁷⁰ ebenda, S. 6

³⁷¹ ebenda, S. 6

³⁷² ebenda, S. 7

Für die Beurteilung der Bildqualität ist das *Signal-zu-Rausch-Verhältnis* (SNR^{373}) von zentraler Bedeutung. Es kann durch folgenden Bruch ausgedrückt werden:

$$\frac{\text{Signal}}{\text{Rauschen}}$$

Hierbei ist ein hohes SNR wünschenswert, da in diesem Fall Signal und Rauschen weiter auseinander liegen und somit das relevante MR-Signal besser erfasst werden kann. Liegt hingegen ein niedriges SNR vor, so fällt eine Unterscheidung von zu messendem Signal und Rauschen zunehmend schwerer. Dies kann im schlechtesten Fall dazu führen, dass das MR-Signal im Vergleich zum Rauschen untergeht und somit nicht erfasst werden kann. In der Folge ist dann auch die Bildqualität bzw. die Gehirnabbildung schlechter.

Da man den Nenner des dargestellten Bruches, das Rauschen, generell nicht ausschalten kann, kann eine Verbesserung dieses SNR vor allem durch eine Erhöhung des Zählers erreicht werden. Dazu muss das Signal bzw. die Signalstärke genauer betrachtet werden. Ist man in der Lage das Signal zu verstärken bzw. negative Einflüsse auf die Signalintensität zu berücksichtigen, kann auf diese Weise das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) verbessert werden.

Eine Verstärkung des Signals kann unter anderem dadurch erreicht werden, dass die Schichtdicke erhöht wird. Wie zu Beginn dieses Unterkapitels angesprochen, kann durch eine höhere Protonendichte ein stärkeres MR-Signal generiert werden, da mehr Protonen zur Gesamtmagnetisierung beitragen. Dadurch dass die Schichtdicke zunimmt, befinden sich mehr Protonen innerhalb einer Schicht. Im Gegensatz zur Signalstärke nimmt das Rauschen durch eine Schichterweiterung nicht zu. „Der Rauschanteil bleibt gleich, da er nicht aus der Schicht allein stammt, sondern aus dem gesamten Körper.“³⁷⁴ Aus diesem Grund verbessert sich das SNR durch eine Erhöhung der Schichtdicke. Da eine Veränderung der Schichtdicke gleichzeitig eine Veränderung der Voxelgröße mit sich bringt, kann die in Abbildung 41 dargestellte Beziehung auch auf die Voxelgröße übertragen werden. Hierbei gilt: „SNR ist direkt proportional zur Voxelgröße.“³⁷⁵

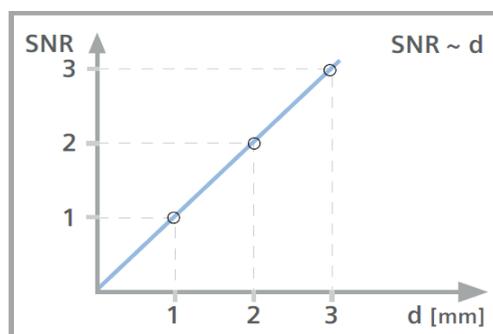


Abbildung 41: Beziehung zwischen Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und Schichtdicke (d)³⁷⁶

³⁷³ SNR: signal-to-noise-ratio

³⁷⁴ Siemens AG, Medical Solutions (2004), S. 8

³⁷⁵ ebenda, S. 8

³⁷⁶ ebenda, S. 8

Neben der Erhöhung der Schichtdicke bzw. der Voxelgröße kann die Signalintensität und in diesem Sinne auch das SNR dadurch verbessert werden, dass Schichten nicht nur einmal sondern mehrmals erfasst werden.³⁷⁷ Anschließend werden die einzelnen Ergebnisse in einem Bild gemittelt. Dieses Vorgehen ist vergleichbar mit dem Ansatz der Klassischen Testtheorie (KT)³⁷⁸. Hierbei wird generell davon ausgegangen, dass jede Messung fehlerbehaftet ist. Eine Messung besteht folglich aus einem wahren Wert (hier: MR-Signal) und einem Messfehler (hier: Rauschen). „Die Grundidee der KT besteht darin, durch mehrmalige Messung und anschließende Mittelwertbildung Meßfehler herauszurechnen, um so den wahren Wert T (der während der Meßreihe unverändert bleibt) zu bestimmen“³⁷⁹. Der Idee der Klassischen Testtheorie folgend können durch Mehrfachmessung und anschließende Mittelwertbildung zufällige Messfehler herausgerechnet werden. Das Ergebnis der Messung wird mit jeder Wiederholung etwas besser. Die Stärke des MR-Signals bzw. das SNR wird durch dieses Vorgehen verbessert, indem der Einfluss des Rauschens verringert und das eigentliche MR-Signal somit deutlicher hervorgehoben wird. Anhand von Abbildung 42 ist zu erkennen, dass die Beziehung zwischen SNR und Anzahl an Messwiederholungen keinen linearen Zusammenhang aufweist. „SNR ist proportional zur Wurzel der Zahl der Akquisitionen.“³⁸⁰ Nachteilig am mehrfachen Erfassen der einzelnen Schichten ist, dass dieses Vorgehen mit einer längeren Messzeit einhergeht.

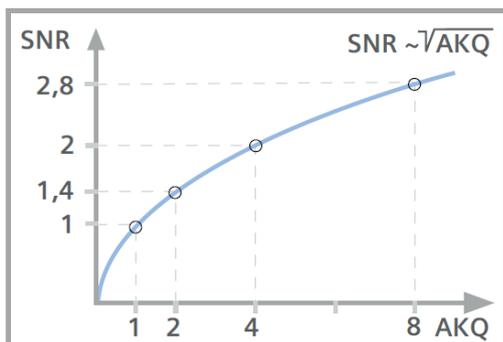


Abbildung 42: Beziehung zwischen Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und Anzahl an Akquisitionen (AKQ)³⁸¹

Eine weitere Einflussgröße auf das zu messende MR-Signal besteht in der Feldstärke des statischen Magnetfeldes (B_0). Je nach vorhandener Feldstärke kann eine Längsmagnetisierung in einer korrespondierenden Höhe erzeugt werden. Je höher diese Magnetisierung ist, desto höher ist dementsprechend das MR-Signal. Dies ist allgemein der Grund dafür, dass man im Rahmen der MRT mit starken Magneten arbeitet. Ohne sie könnte man das MR-Signal nicht bzw. nicht in benötigter Weise erzeugen und messen. Aufnahmen mit einem 1,5T-Scanner liefern in diesem Sinne eine ausreichende Magnetfeldstärke. Generell gilt: „... the theoretical amplitude of the measured MR signal increases quadratically with field strength (e.g., the raw signal in a 3-T scanner is four times larger than the signal in a 1,5-T scanner).“³⁸² In Be-

³⁷⁷ vgl. Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 32

³⁷⁸ vgl. Kappelhoff, P. (2000), S. 107 ff.

³⁷⁹ ebenda, S. 108

³⁸⁰ Siemens AG, Medical Solutions (2004), S. 9

³⁸¹ ebenda, S. 9

³⁸² Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 63

zug auf die Stärke des äußeren Magnetfeldes sei an dieser Stelle kurz angemerkt, dass auch in diesem Bereich Limitationen bestehen. Es existieren zwar Scanner mit einer Feldstärke von über 3T, aber bei Studien mit Menschen werden maximal 3T-Scanner eingesetzt.

Auf der einen Seite kann das MR-Signal durch die beschriebenen Maßnahmen verstärkt werden. Auf der anderen Seite bestehen allerdings auch negative Einflussmöglichkeiten auf das zu messende MR-Signal. Diesbezüglich können sich z.B. durch Inhomogenitäten im externen Magnetfeld (B_0) Probleme ergeben.³⁸³ Selbiges gilt auch für den Fall, dass im Zusammenhang mit den Gradienten Nichtlinearität vorliegt. In beiden Fällen hat dieses Abweichen von der Homogenität bzw. Linearität zur Folge, dass die Frequenzen der Spins an bestimmten Orten nicht mehr zu dem Muster benachbarter Spins passen und sich somit schwächere Signalintensitäten ergeben. Dies verringert die SNR.

Theoretisch gesehen geht man zunächst von einem homogenen Magnetfeld in Bezug auf B_0 aus. Tatsächlich bestehen allerdings immer kleine Inhomogenitäten. Diese Inhomogenitäten werden bei Magnetfeldern höherer Stärke zunehmend problematischer, da es schwerer wird, das Magnetfeld in solchen Fällen auszugleichen. Die genaue Struktur der Inhomogenitäten ist nicht bekannt, doch falls derartige Abweichungen vorhanden sind, zeigen sie sich in grafischen Artefakten. Prinzipiell können sich diese Artefakte auf zwei Arten zeigen. „*Inhomogenities in the net magnetic field can cause systematic artifacts in the reconstructed images, in the form of geometric distortions and/ or signal loss.*“³⁸⁴ Dadurch dass das Magnetfeld an einigen Stellen eine andere Magnetfeldstärke aufweist, wird die Frequenz der betreffenden Spins beeinflusst. Diese präzessieren nun in einer anderen Frequenz als im Falle eines homogenen Magnetfeldes. Da die Spin-Frequenzen für die Ortskodierung zentral sind, werden die Spins in Bereichen, in denen das Magnetfeld von der Homogenität abweicht, im Ergebnis falsch zugeordnet. Die falsche Zuordnung führt dazu, dass es geometrische Verzerrungen in der grafischen Darstellung des zu messenden Objektes gibt.

Kleinere Feldinhomogenitäten führen im Sinne der T_2^* -Zeit dazu, dass die Spins einer Messeinheit schneller ihre gemeinsame Ausrichtung verlieren und die durch die Anregung aufgebaute Quermagnetisierung noch schneller zerfällt. Dadurch verringert sich die Signalintensität.

Abbildung 43 stellt beide Auswirkungen anschaulich dar. Die linke Darstellung zeigt eine gelungene Abbildung eines runden Körpers mit Flüssigkeit. Dieses Ergebnis wurde durch ein homogenes Magnetfeld erzielt. Hier sind sowohl die runde Struktur als auch die gleichmäßige farbliche Darstellung des flüssigen Inneren gut zu erkennen. Im Gegensatz dazu wird das ursprüngliche Objekt in Form der rechten Darstellung wesentlich schlechter abgebildet. Die runde Struktur wird nicht an allen Stellen wiedergegeben (geometrische Verzerrung) und auch die Flüssigkeit im Inneren wird nicht mehr homogen abgebildet. Es existieren hellere und dunklere Bereiche, die ei-

³⁸³ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 117 ff.

³⁸⁴ ebenda, S. 120

gentlich unterschiedliche Objekte bzw. Eigenschaften des zu messenden Objektes indizieren sollten. Im Ergebnis ist eine verringerte Bildqualität festzuhalten.

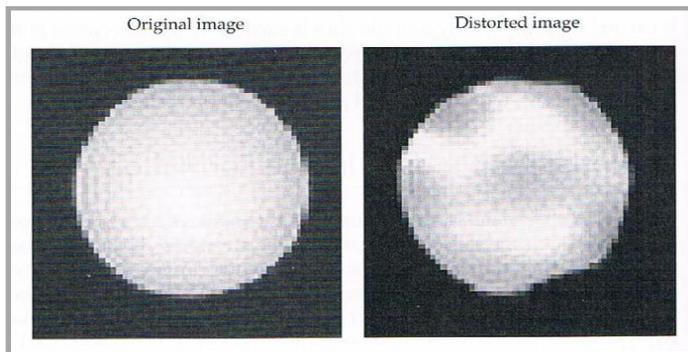


Abbildung 43: Einfluss von Magnetfeld-Inhomogenitäten³⁸⁵

Es gibt verschiedene Einflüsse, die die Homogenität des statischen Magnetfeldes (B_0) stören können. Im Prinzip können alle metallhaltigen und magnetisierbaren Objekte das statische Magnetfeld beeinflussen und somit die Messung des MR-Signals verschlechtern. Daher sind die MRT-Aufnahmeräume immer gut abgeschirmt. So kommt es kaum zu starken Inhomogenitäten, die zu geometrischen Verzerrungen führen. Dies könnte dann der Fall sein, wenn Probanden aus medizinischen Gründen metallische Gegenstände im Kopfbereich³⁸⁶ aufweisen. Kleinere Inhomogenitäten lassen sich nicht komplett vermeiden, d.h. dass nie von einer 100%igen Homogenität des statischen Magnetfeldes auszugehen ist. Eine weitere Verschlechterung des MR-Signals geht von der Nichtlinearität der Gradienten aus.³⁸⁷ Für die MR-Bilderstellung ist der Einsatz der Gradienten unabdingbar. Ohne sie wäre es nicht möglich, Informationen örtlich zu kodieren und auf diesem Wege kontrastreiche Abbildungen zu generieren. Um ihrer Kodier-Funktion nachkommen zu können, sollten die Gradienten einen linearen Verlauf aufweisen. Nur auf diese Weise kann eine systematische Variation des Magnetfeldes gewährleistet werden. Liegen allerdings Nichtlinearitäten vor, wirkt sich dies, je nach betroffenem Gradienten, unterschiedlich auf die Bildqualität aus.³⁸⁸ Liegt beim x-Gradienten (G_x) eine Abweichung von der Linearität vor, so äußert sich dies meist in einer Stauchung der Abbildung in der x-Richtung. Da G_x die Informationsaufnahme entlang einer Schichtzeile steuert, hat eine Abweichung meist zur Folge, dass die Länge des Informationsaufnahmeweges verkürzt wird, wodurch es wiederum zu einer Stauchung der Abbildung kommt. Liegt hingegen für G_y eine Abweichung vor, hat dies Auswirkungen auf den genauen zeitlichen Verlauf der Informationsaufnahme in Bezug auf die verschiedenen Zeilen einer Schicht. Im Ergebnis führt eine Abweichung in aller Regel zu einer schrägen Verzerrung der ursprünglichen Abbildung. Ist G_z betroffen, so hat dies keine Auswirkung auf die Form des zu messenden Objektes. Da G_z die selektive Schichtauswahl steuert, hat diese Abweichung eine Auswirkung auf die Kompatibilität des Hochfrequenzimpulses mit dem z-Gradienten. Dies beeinflusst die Schichtdicke und kann dazu füh-

³⁸⁵ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 118

³⁸⁶ z.B. *Retainer* an der Zahninnenseite

³⁸⁷ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 118 f.

³⁸⁸ vgl. ebenda, S. 119 f.

ren, dass dünnere Schichten gemessen werden, die eine reduzierte Signalintensität mit sich bringen.

Bisher wurde das Verhältnis zwischen Signal und Rauschen betrachtet. Dieses Verhältnis ist im Zusammenhang mit der Bildqualität wichtig, doch ein hohes SNR alleine indiziert noch keine kontrastreiche Gehirnabbildung. Genau wie das eigentliche MR-Signal kann auch die Differenzierbarkeit zwischen unterschiedlichen Gewebetypen in Relation zum Rauschen gesetzt werden. Dies wird analog zum Signal mit *Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR)*³⁸⁹ bezeichnet. Das CNR „im MR-Bild ist der Unterschied zwischen den Signal-zu-Rausch-Verhältnissen zweier relevanter Gewebetypen A und B: $CNR = SNR_A - SNR_B$ “³⁹⁰. Abbildung 44 zeigt den Vergleich zwischen den Signalintensitäten unterschiedlicher Gewebetypen (S_A und S_B). Im oberen Beispiel liegt prinzipiell eine höhere Differenz zwischen A und B vor, im unteren Fall ist eine kleinere Signaldifferenz vorhanden. Beide Fälle weisen allerdings unterschiedlich starkes Rauschen auf, was letztlich die Bildqualität entscheidend beeinflussen kann. Dadurch dass im oberen Beispiel sehr starkes Rauschen vorliegt, ergibt sich trotz einer höheren Signaldifferenz zwischen A und B ein schlechterer Kontrast als für das untere Beispiel. Im unteren Beispiel existiert zwar eine geringere Signaldifferenz zwischen A und B, aber aufgrund des im Vergleich geringeren Rauschens besteht hier ein besseres Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR).

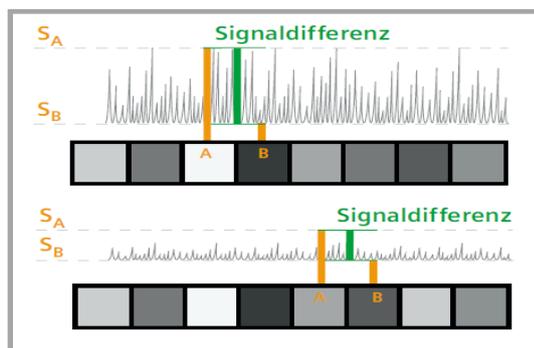


Abbildung 44: Unterschiedliche Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR)³⁹¹

Mit Hilfe von Abbildung 45 kann die negative Wirkung eines niedrigen CNR auf die Bildqualität verdeutlicht werden. Wie bereits erwähnt, ist eine Abbildung dann gelungen, wenn ein guter Bildkontrast mit einer ausreichenden räumlichen Auflösung vorliegt. Es sollte folglich gut möglich sein, anhand der Gehirnabbildung zwischen verschiedenen Gewebetypen zu unterscheiden. Abbildung 45 zeigt einen Vergleich zweier T_1 -Kontraste mit jeweils unterschiedlichen CNR. Wie bereits in Kapitel 4.2.1³⁹² erwähnt, wird durch einen T_1 -Kontrast die T_1 -Zeit der einzelnen Gewebetypen gegeneinander kontrastiert. In Gewebe mit einer schnelleren T_1 -Zeit stellt sich die Längsmagnetisierung schneller wieder her, weshalb im Vergleich zu Gewebe mit längeren T_1 -Zeiten ein stärkeres MR-Signal gemessen werden kann. Dieses stärkere

³⁸⁹ CNR: contrast-to-noise-ratio

³⁹⁰ Siemens AG, Medical Solutions (2004), S. 10

³⁹¹ ebenda, S. 11

³⁹² Kapitel 4.2.1 Grundlegende Anmerkungen

MR-Signal äußert sich in der Gehirnabbildung mit einem helleren Grauton, welcher die weiße Substanz widerspiegelt. Die graue Substanz wird dunkler dargestellt, da die T_1 -Zeit etwas länger dauert. In der linken Gehirnabbildung kommt ein hohes CNR zum Ausdruck. Verschiedene Details werden sichtbar und die unterschiedlichen Gewebetypen sind problemlos zu unterscheiden, da die Übergänge bzw. die Abgrenzungen deutlich zu erkennen sind. Die Folge eines niedrigen CNR ist der rechten Gehirnabbildung zu entnehmen. Hier sind die Abgrenzungen zwischen weißer und grauer Substanz nicht mehr so deutlich auszumachen, da sich der Kontrast verschlechtert hat.

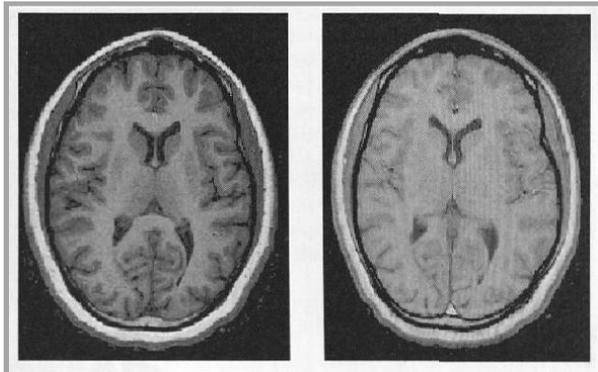


Abbildung 45: Unterschiedliche Kontrast-zu-Rausch-Verhältnisse (CNR) in Bezug auf die resultierende Gehirnabbildung³⁹³

Nachdem auf das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und das Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR) eingegangen wurde, ist abschließend in Bezug auf die Bildqualität der Aspekt der *räumlichen Auflösung* zu besprechen.

Es wurde bereits erwähnt, dass die Signalstärke mit Erhöhung der Schichtdicke bzw. Voxelgröße zunimmt. Bei der Variation der Schichtdicke bzw. der Voxelgröße ist allerdings zu beachten, dass aus der Voxelgröße die jeweils vorliegende räumliche Auflösung bestimmt wird.³⁹⁴ Diese trägt entscheidend dazu bei, feine Unterschiede abzubilden. Je kleiner ein Voxel definiert wird, desto besser ist die räumliche Auflösung. Im Vergleich zur Verwendung von größeren Voxeln wird das Gehirn in eine größere Anzahl von Voxeln untergliedert, die für sich genommen weniger Information enthalten. Hierdurch wird eine feinere Darstellung gewährleistet, da feinere, kleinere Bereiche genauer betrachtet bzw. abgetastet werden können. Wird hingegen mit größeren Voxeln gearbeitet, wird durch einen Voxel mehr Information gebündelt, was dazu führt, dass feine Details verschwinden und somit eine schlechtere räumliche Auflösung entsteht.

Für ein besseres Verständnis dieses Sachverhaltes gilt es, den Begriff der Messmatrix und den Begriff des Bildfeldes (FOV³⁹⁵) zu definieren und Abhängigkeiten aufzuzeigen. Unter *Messmatrix*³⁹⁶ wird die Einteilung einer definierten Schicht in Zeilen und Spalten im Anschluss an die selektive Schichtauswahl verstanden. Je nachdem in wie viele Spalten und Zeilen eine Schicht eingeteilt wird, liegt eine höhere bzw.

³⁹³ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 11

³⁹⁴ vgl. ebenda, S. 11 ff.

³⁹⁵ FOV: field of view

³⁹⁶ vgl. Siemens AG, Medical Solutions (2004), S. 14 f.

niedrigere räumliche Auflösung vor. Je mehr Spalten und Zeilen vorhanden sind, um eine Schicht zu zerlegen, desto höher die räumliche Auflösung. Werden die anderen Parameter konstant gehalten, können auf diese Weise mehr Pixel bzw. Voxel generiert werden, die eine ausgewählte Schicht in feinere Bestandteile aufteilen. In der Konsequenz erhöht sich die räumliche Auflösung, allerdings wird dadurch auch das Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) geringer. Tabelle 1 zeigt den Zusammenhang zwischen Matrixgröße und relativem SNR für quadratische Matrizen. Wird die Messmatrix z.B. von 256x256 auf 512x512 vergrößert, führt dies zu einem geringeren relativen SNR und andersrum.

Matrix	Relatives SNR
128	1,4 ($\sqrt{2}$)
256	1,0
512	0,7 ($1/\sqrt{2}$)

Tabelle 1: Variation der Matrixgröße und relatives SNR³⁹⁷

Die Messmatrix spiegelt die Einteilung der Schicht wider, das *Bildfeld (FOV)* gibt hierbei die „Basisgröße des zu messenden Ausschnitts einer Schicht (in mm)“³⁹⁸ an. Es gibt folglich die Fläche an, die entsprechend der Größe der Messmatrix aufgeteilt wird. Abbildung 46 zeigt die Auswirkung unterschiedlicher FOVs. In der linken Abbildung wurde mit einem FOV von 230mm, in der rechten Abbildung mit 330mm gearbeitet. Das Bildfeld (FOV) im rechten Bild wurde unnötig groß gewählt, so dass letztlich eine schlechtere Flächenauflösung vorliegt.

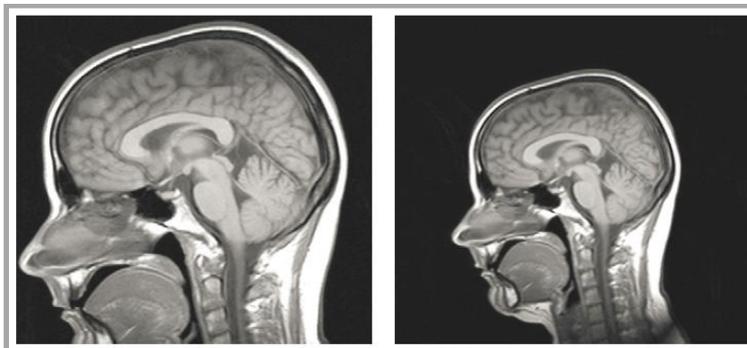


Abbildung 46: Unterschiedliche Bildfelder (FOV)³⁹⁹

„Je kleiner wir bei fester Matrixgröße das Bildfeld auswählen, desto höher die Flächenauflösung. Die Anzahl der Pixel pro Flächeneinheit nimmt zu, die Pixel selbst werden kleiner.“⁴⁰⁰ Die Pixel- bzw. Voxelgröße resultiert aus dem Verhältnis von Bildfeld zu Matrixgröße. Kleine Pixel bzw. Voxel sorgen hierbei für eine gute räumliche Auflösung. Die Auswirkungen verschiedener Voxelgrößen auf die räumliche Auflösung sind in Abbildung 47 veranschaulicht. Stellt man Abbildungen A (8mm) und B

³⁹⁷ Siemens AG, Medical Solutions (2004), S. 15

³⁹⁸ ebenda, S. 16

³⁹⁹ ebenda, S. 16

⁴⁰⁰ ebenda, S. 17

(4mm) den anderen drei Gehirnabbildungen mit kleineren voxelgrößen (C mit 2mm, D mit 1,5mm und E mit 1mm) gegenüber, so ist der Unterschied in der räumlichen Auflösung deutlich zu erkennen. Die beiden ersten Abbildungen sind in ihrer Auflösung sehr grob und in diesem Sinne verschwommen. Details sind nicht zu erkennen. Bei den unteren drei Abbildungen liegt eine erkennbar bessere Auflösung vor, die es ermöglicht feinere Details zu erkennen. Je kleiner die voxelgröße hierbei gewählt wird, desto detailreicher wird die Abbildung.

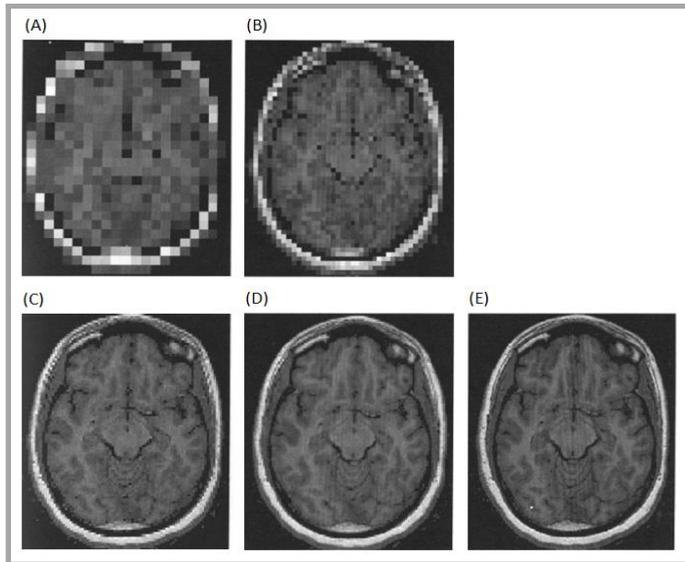


Abbildung 47: Auswirkung unterschiedlicher voxelgrößen auf die räumliche Auflösung⁴⁰¹

Da die voxelgröße in einer Abhängigkeit zum messbaren MR-Signal steht, kann diese nicht unbegrenzt verringert werden. Durch eine Verkleinerung der voxelgröße wird zwar auf der einen Seite eine Verbesserung der räumlichen Auflösung erzielt, andererseits verringert sich mit der Größe eines voxels auch das potentiell zu messende MR-Signal. Durch eine Vergrößerung der voxel erhöht sich das zu messende MR-Signal, allerdings verringert sich die räumliche Auflösung. In Bezug auf die voxelgröße muss folglich ein Kompromiss zwischen Signalstärke und räumlicher Auflösung geschlossen werden.

In Bezug auf die Bildqualität ist zu resümieren, dass ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) und ein hohes Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR) für den Kontrast in einem MR-Bild zentral sind. Beide werden dadurch positiv beeinflusst, dass das MR-Signal im Vergleich zum stets präsenten Rauschen stärker zum Vorschein kommt. Ein guter Kontrast führt in Kombination mit einer guten räumlichen Auflösung zu einer insgesamt hohen Bildqualität im Sinne einer adäquaten Gehirnabbildung. Die räumliche Auflösung wird hierbei maßgeblich durch die Pixel- bzw. voxelgröße beeinflusst. Da einerseits eine geringe voxelgröße angestrebt wird und andererseits die Motivation besteht, ein möglichst starkes MR-Signal zu messen, muss zwischen den verschiedenen Parametern ein Kompromiss zu Gunsten der Bildqualität geschlossen werden.

⁴⁰¹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 13

4.3 Der MR-Scanner

Nachdem die grundlegenden Prinzipien und verschiedene Aspekte bezogen auf die strukturelle Magnetresonanztomographie geklärt wurden, geht es nun darum, die eigentliche Messapparatur, den MR-Scanner, vorzustellen. Abbildung 48 zeigt einen typischen MR-Scanner, den man im Volksmund oft auch als *Röhre* bezeichnet. Diese Bezeichnung geht auf die Tatsache zurück, dass die Probanden im Rahmen der MRT im Inneren des Magneten platziert werden. Die Öffnung im Magneten weist hierbei einen relativ kleinen Durchmesser auf, so dass es den meisten Probanden so vorkommt, als würden sie in eine Röhre geschoben werden.



Abbildung 48: Front- und Rückansicht des Siemens MAGNETOM Avanto (1,5 Tesla)⁴⁰²

Die einzelnen Bestandteile eines Magnetresonanztomographen stehen in Bezug zu den bereits beschriebenen Prinzipien der Datenakquisition. Kern eines jeden MR-Scanners ist ein starker Magnet, der das statische Magnetfeld (B_0) erzeugt, um eine Längsmagnetisierung der Spins zu erreichen. Um ein möglichst homogenes Magnetfeld zu gewährleisten, werden zusätzliche Ausgleichsspulen benötigt. Für die tatsächliche Spin-Anregung bedarf es eines Hochfrequenzsenders und für die Messung des auf diese Weise erzeugten MR-Signals entsprechender Empfangsspulen. Um gemessene MR-Signale in dreidimensionale Abbildungen zu übertragen, ist es unabdingbar diese Signale ortsbezogen zu kodieren. Diese Kodierung wird über ein Gradientensystem gewährleistet, welches aus Gradientenspulen mit entsprechenden Verstärkern für alle drei Dimensionen besteht.

Im Verlauf der Anwendung der MRT wurden verschiedene *Magnete* zur Erzeugung des Hauptfeldes eingesetzt. Grob kann zwischen Permanent-, resistiven und supra-leitenden Magneten unterschieden werden.

Die ersten MR-Scanner arbeiteten mit *Permanentmagneten*⁴⁰³. Diese bestehen aus ferromagnetischem Material, d.h. dass dieses Material selbst ein magnetisches Feld erzeugt bzw. von einem externen Magnetfeld angezogen werden kann. Die erzeugte Magnetfeldstärke ist dabei abhängig von der materiellen Zusammensetzung des Permanentmagneten. Da man für die Generierung gewisser Feldstärken eine größere Menge des entsprechenden Materials benötigt, sind Permanentmagneten relativ

⁴⁰² Aufnahme aus dem Scanner-Raum der Life & Brain GmbH in Bonn

⁴⁰³ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 33; Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 190; Jäncke, L. (2005), S. 47; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 38; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 37; Seiderer, M. (1990b), S. 127

schwer, im Vergleich zu anderen Magneten allerdings relativ kostengünstig. Permanentmagneten erzeugen, wie der Name schon verrät, permanente Magnetfelder. Nachteilig an dieser Art von Magnet ist, dass im Prinzip nur sehr schwache Magnetfelder generiert werden können ($< 0,35$ Tesla).

*Resistive bzw. Widerstandsmagnete*⁴⁰⁴ sind im Gegensatz zu Permanentmagneten einfache Elektromagneten. Sie bestehen aus mehreren Spulen, die erst in Folge eines starken Stromflusses ein Magnetfeld erzeugen. Wird die Stromzufuhr abgeschaltet, zerfällt das Magnetfeld wieder. Um ein Magnetfeld aufrecht zu erhalten, wird folglich ständig Strom benötigt, wodurch die Kosten im Gegensatz zu Permanentmagneten steigen. Der Vorteil liegt in der Erzeugung einer etwas höheren Feldstärke (bis ca. 0,5 Tesla). Dass das Magnetfeld hierbei nicht ständig konstant gehalten werden kann, ist hingegen nachteilig.

*Supraleitende Magnete*⁴⁰⁵ sind ebenfalls Elektromagnete. Sie bestehen ebenfalls aus stromdurchflossenen Spulen, die allerdings nicht ständig mit Strom gespeist werden müssen. Vielmehr bedürfen sie nur einer einmaligen Stromzufuhr, um ein Magnetfeld einer bestimmten Stärke aufzubauen und zu erhalten. Sie stellen den Standardmagneten im Kontext der MRT dar, da es mit ihrer Hilfe möglich ist, sehr starke Magnetfelder zu erzeugen (theoretisch > 7 Tesla). Supraleitende Magnete weisen bei Temperaturen nahe dem natürlichen Nullpunkt ($< 12\text{K}$) keinen elektrischen Widerstand auf. Die Eigenschaft der Widerstandslosigkeit ermöglicht die Generierung sehr starker Magnetfelder. Der einmal erzeugte Strom, der zur Erzeugung des Magnetfeldes benötigt wird, wird nicht abgeschwächt und fließt somit konstant in den Spulen. Durch die Einlagerung in flüssigem Helium werden die Magnete so stark abgekühlt, dass sie keinen elektrischen Widerstand mehr aufweisen. Durch den Einsatz und den häufigen Austausch von teurem Helium steigen allerdings die Kosten für MR-Aufnahmen. Neuere Apparaturen arbeiten mit günstigerem Stickstoff anstelle von Helium. Im Ergebnis kann über den Einsatz supraleitender Magnete ein stabiles, weitgehend homogenes Magnetfeld mit großen Feldstärken gewährleistet werden.

Geht man in der Theorie von perfekt homogenen Magnetfeldern aus, liegen in der Praxis generell kleinere Inhomogenitäten vor. Da ein möglichst homogenes Magnetfeld eine entscheidende Grundlage für das Gelingen einer guten Ortskodierung ist, sollte das Magnetfeld (B_0) an betroffenen Stellen ausgeglichen werden. Ein *Ausgleich* ist an den Stellen notwendig, an denen das Magnetfeld zu stark bzw. zu schwach ist. Dieser Ausgleich kann prinzipiell auf zwei Wegen erfolgen.⁴⁰⁶ Zum einen kann über die *Platzierung von Eisenplatten* innerhalb des MR-Scanners eine Anpassung an die örtlichen Gegebenheiten erfolgen. Diese Adjustierung geschieht meist zu

⁴⁰⁴ vgl. Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 38; Jäncke, L. (2005), S. 47, Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 36; Seiderer, M. (1990b), S. 122 f.

⁴⁰⁵ vgl. Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 191 f.; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 35; Jäncke, L. (2005), S. 47, Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 38 f.; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 33 ff.; Seiderer, M. (1990b), S. 123 ff.; Vlaardingerbroek, M. T.; den Boer, J. A. (2004), S. 28 f.

⁴⁰⁶ vgl. Siemens AG, Medical Solution (2003), S. 194; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 41; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 39; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 39 f.

Beginn der Inbetriebnahme. Zum anderen ist der Ausgleich von Magnetfeldinhomogenitäten auch über die Verwendung spezieller *Ausgleichs- bzw. Shimspulen* möglich. Diese Spulen sind innerhalb des Magneten entlang eines eigenen Shim-Rohres angeordnet und können das Magnetfeld aktiv über die Verwendung von kleinen statischen Magnetfeldern mit unterschiedlicher Stärke und Polarität an den entsprechenden Stellen ausgleichen. Die im Rahmen dieses Ausgleichsprozesses verwendeten Magnetfelder sind die einzigen Magnetfelder, die im Zuge der MRT individuell an die Probanden angepasst werden können.⁴⁰⁷ Anders als die Gradienten und der Hochfrequenzpuls, die in gewissen Intervallen an und ausgeschaltet werden, werden die Shimspulen einmal eingestellt und dann konstant beibehalten. Dies berücksichtigt den Umstand, dass jeder Kopf im Rahmen der MRT und somit auch bei der fMRT mit seiner individuellen Größe und Form unterschiedlich zur Inhomogenität beiträgt.

Um ein MR-Signal über eine Veränderung der Energiezustände der entsprechenden Spins zu erzeugen und dies anschließend zu messen, bedarf es eines *Hochfrequenzsystems (HF-Systems)*⁴⁰⁸, das über Hochfrequenzantennen und Sende- wie auch Empfangsverstärker verfügt. Die Antennen werden hierbei über eine Umschaltfunktion vom Sender zum Empfänger bzw. umgekehrt. Aufgabe dieses Systems ist es, das interessierende Gewebe durch die Einstrahlung eines Hochfrequenzimpulses in Form elektromagnetischer Wellen mit der entsprechenden Larmorfrequenz anzuregen und diese elektromagnetischen Wellen im Gegenzug auch wieder zu empfangen. Verstärker werden in diesem Zusammenhang benötigt, da das zu messende MR-Signal generell relativ schwach ist. Sender und auch Empfänger befinden sich im Zusammenhang mit der Darstellung des Gehirns i.d.R. beide innerhalb einer sog. *Kopfspule*⁴⁰⁹.

Im Rahmen des Messprozesses wird der Hochfrequenzsender nur für eine kurze Zeit angeschaltet, um für die Anregung der Spins zu sorgen. Anschließend wird er wieder ausgeschaltet, bis es zur nächsten Anregung kommt. Die Spins nehmen die eingestrahlte Energie auf und werden dadurch in die Quermagnetisierung versetzt. In diesem Zustand verbleiben sie bis die Anregung beendet wird. Sobald der HF-Impuls abgeschaltet wird, streben sie wieder ihren ursprünglichen Gleichgewichtszustand, die Längsmagnetisierung, an. Bei diesem Zurückschwingen geben sie die vorher aufgenommene Energie wieder an die Umgebung ab. Diese Energieabgabe wird dann über die Empfangsspulen erfasst. Dabei gilt: „*The amount of energy that can be transmitted or received by a radiofrequency coil depends on its distance from the sample being measured.*“⁴¹⁰ In Bezug auf das Hochfrequenzsystem sollte „*der FÜLLFAKTOR, das Verhältnis zwischen empfindlichen Volumen der Spule und dem*

⁴⁰⁷ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 41

⁴⁰⁸ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 35 ff.; Siemens AG, Medical Solution (2003), S. 197 ff.; Jäncke, L. (2005), S. 48; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 40; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 40 ff.; Seiderer, M. (1990b), S. 131 ff.

⁴⁰⁹ Bei Aufnahmen, die nicht den Kopf betreffen, spricht man entsprechend von Körperspulen.

⁴¹⁰ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 36

vom Patienten ausgefüllten Teil, [...] möglichst groß sein.“⁴¹¹ Da die Kopfspule unmittelbar um den Kopf herum angelegt wird, ist das bereits angesprochene Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) aus diesem Grund relativ hoch.

Generell kann zwischen zwei Arten von Hochfrequenzsystemen unterschieden werden.⁴¹² Entweder liegt das Hochfrequenzsystem direkt an dem interessierenden Körperbereich oder es besteht ein gewisser Abstand zwischen HF-System und Messobjekt. *Oberflächenspulen*⁴¹³ werden direkt auf dem zu messenden Körperbereich angebracht. Sie sind meistens relativ klein und decken somit nur einen bestimmten Bereich ab. In Bezug auf die Abbildung des Gehirns bedeutet dies, dass bspw. nur der hintere Gehirnbereich abgebildet werden kann. Der vordere Gehirnbereich würde in einer Abbildung schwarz bleiben und in diesem Sinne unkenntlich sein. Oberflächenspulen weisen zwar eine sehr hohe Sensitivität auf, da sie sich z.B. direkt an der Kopfoberfläche befinden, allerdings gilt diese höhere Sensitivität eher für die an der Oberfläche des Kopfes befindlichen Gehirnbereich. Gehirnareale, die tiefer gelegen sind, weisen aufgrund der größeren Distanz zur Oberflächenspule schwächere Signale auf. Zielt eine Untersuchung auf einen speziellen Bereich nahe der Kopfoberfläche so können Oberflächenspulen hilfreich sein. Befasst sich eine Untersuchung mit der Abbildung des gesamten Gehirns, kommt dieser Spulenart eine sehr geringe Bedeutung zu. Im Gegensatz zu Oberflächenspulen weisen bspw. *Arrays spulen*⁴¹⁴ keinen direkt Kontakt mit dem Kopf auf. Sie bestehen aus mehreren unabhängigen Empfangsspulen, deren Informationen am Ende zusammengefügt werden. Im Vergleich zu Oberflächenspulen stellen sie deutlich größere Spulen dar, die den ganzen Kopf umschließen. Auf diese Weise kann trotz des kleinen Abstandes zum Messobjekt die räumliche Abdeckung mit einer zufriedenstellenden Sensitivität gewährleistet werden. „*Arrays spulen vereinen ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis mit den Messfeldern großer Spulen.*“⁴¹⁵ Abbildung 49 zeigt eine Arrays spule. Diese Kopfspulen sind meist in einer Liege integriert, auf der die Patienten bzw. Probanden im Inneren eines MR-Scanners positioniert werden.



Abbildung 49: Die Kopfspule⁴¹⁶

Um letztlich eine räumliche Information aus den gemessenen MR-Signalen zu erhalten, erfolgt eine systematische Modifikation des weitgehend homogenen Magnetfel-

⁴¹¹ Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 198

⁴¹² vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 36 ff.

⁴¹³ Engl.: surface coils

⁴¹⁴ Engl.: phased-array coils

⁴¹⁵ Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 199

⁴¹⁶ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 36

des (B_0). Diese Variation erfolgt über das nacheinander getaktete Ein- und Ausschalten der *Gradientenspulen*⁴¹⁷ für jede Dimension. Im Gegensatz zum statischen Magnetfeld und den Shimspulen bestehen die von den Gradientenspulen erzeugten Magnetfelder nicht durchgehend. Sie werden, ähnlich wie die Hochfrequenzsender, kurzfristig an- und ausgeschaltet, um das homogene Magnetfeld über die Zeit systematisch in Bezug auf alle drei Dimensionen zu verändern. Bei der Verwendung der Gradientenspulen wird mit Gradientenverstärkern gearbeitet, da es hier gilt, eine große Menge an Strom aufzubringen. In Bezug auf die Gradienten ist es sehr wichtig, mit einer hohen Präzision und Stabilität zu arbeiten. Im Vergleich zum Hauptmagnetfeld werden zwar deutlich schwächere Magnetfelder eingesetzt, jedoch wird durch das ständige An- und Ausschalten der Gradientenspulen das für die MRT charakteristische *Hämmern* bzw. *Klopfgeräusch* erzeugt.

Die einfachste Variante einen Feldgradienten zu erstellen, liegt in der Verwendung sog. *Maxwellspulen*.⁴¹⁸ Dazu werden zwei kurze Spulen mit großem Radius gegenüberliegend angeordnet und von einem jeweils gegensinnigen Stromfluss durchströmt. Im Ergebnis entsteht entlang einer Linie zwischen diesen beiden Spulen ein Feldgradient. Werden für den z-Gradienten Maxwellspulen eingesetzt, wird bei den x- und y-Gradienten mit *Golayspulen*⁴¹⁹ gearbeitet. Diese stellen im Vergleich zu Maxwellspulen eine komplexere Anordnung dar und werden für die Erzeugung des x- und y-Gradienten bezogen auf beide Dimensionen jeweils um 90° rotiert. Abbildung 50 veranschaulicht die generelle Positionierung der einzelnen Gradientenspulen zueinander. Wie bereits angemerkt, verändern die z-Gradientenspulen das Magnetfeld entlang der Feldlinie. Daher sind sie von oben nach unten bzw. von Kopf bis Fuß angeordnet. Die y-Gradienten erzeugen eine Veränderung des homogenen Magnetfeldes von der Vorder- bis zur Rückseite. Die x-Gradienten sind für die Variation von linker zu rechter Körperseite zuständig.

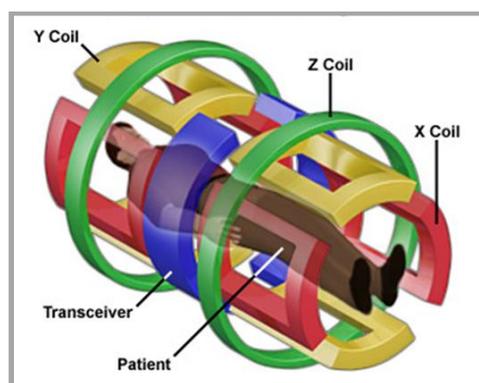


Abbildung 50: Das Gradientensystem⁴²⁰

Abbildung 51 zeigt abschließend wie die verschiedenen Teilkomponenten, die letztlich den MR-Scanner ausmachen, angeordnet sind. Die unterschiedlich grün gestuf-

⁴¹⁷ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 48; Siemens AG, Medical Solution (2003), S. 195; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009). S. 39 f.; Seiderer, M. (1990b), S. 128 ff.

⁴¹⁸ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 38

⁴¹⁹ vgl. ebenda, S. 39 f.

⁴²⁰ <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/mri/fullarticle.html> (abgerufen am 26.04.2013)

ten Röhren repräsentieren die drei Gradientenspulen im inneren Röhrenbereich. Im vorletzten äußeren Ring werden die Shimspulen platziert und die äußere Röhre wird durch den Magneten für das starke statische Magnetfeld (B_0) gebildet.

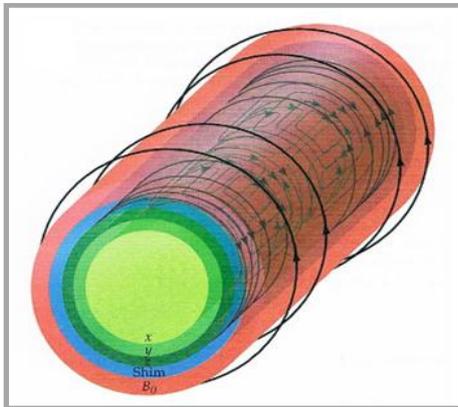


Abbildung 51: Grundstruktur des MR-Scanners⁴²¹

Erst der kombinierte Einsatz dieser unterschiedlich starken Magnetfelder eröffnet die Möglichkeit, mit Hilfe der Erzeugung und Messung des MR-Signals über das Hochfrequenzsystem, dreidimensionale Abbildungen unterschiedlicher Körperbereiche zu erstellen.

Um den MR-Scanner, und in diesem Sinne die genannten Teilkomponenten, in zielführender Weise einzusetzen, bedarf es verschiedener computerbezogener Einheiten.⁴²² Zum einen müssen die einzelnen Teilkomponenten systematisch gesteuert und kontrolliert werden, um eine adäquate Messung sicherzustellen. Zum anderen müssen die Daten gespeichert und aus ihnen Bilder generiert werden. Des Weiteren können auch die physiologischen Werte der Probanden (z.B. die Herzschlagfrequenz) während der Messung festgehalten werden, wenn dies von besonderer Bedeutung ist. Auf diese Weise kann ihr Gesundheitszustand überwacht und im Notfall eingegriffen werden. Für diese Aufgaben werden mehrere Rechner benötigt. Die computerbezogene Infrastruktur befindet sich in einem separaten Raum, dem sog. *Kontrollraum*, von dem aus man den Aufnahme- bzw. Scanner-Raum einsehen kann. Über eine Gegensprechanlage ist es jederzeit möglich, einen Kontakt zwischen Kontroll- und Scanner-Raum herzustellen.

4.4 MRT-Sicherheitsaspekte

Im Rahmen der MRT wird mit relativ starken Magnetfeldern gearbeitet. Generell besitzen diese statischen Magnetfelder eine derartige Stärke, dass sie selbst in Bezug auf schwere ferromagnetische Objekte eine große Anziehungskraft entwickeln können. „A potential danger arises from ferromagnetic objects that may turn into dangerous missiles when brought near the magnet.“⁴²³ Im Ergebnis können diese Gegenstände in einer hohen Geschwindigkeit zum Scanner-Inneren gezogen werden. Man

⁴²¹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 40

⁴²² vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 41 ff.; Siemens AG, Medical Solution (2003), S. 201 ff.

⁴²³ Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2006), S. 143

spricht in diesem Fall vom Projektil-Effekt.⁴²⁴ Aufgrund dieser Tatsache wird oft angenommen, dass starke Magnetfelder auch schädliche Auswirkungen auf das menschliche Gewebe haben. Generell liegen im Rahmen der Magnetresonanztomographie (MRT) drei potenzielle Risikoquellen vor: das statische Magnetfeld (B_0) zum Aufbau der Längsmagnetisierung, die Feldgradienten (G_x , G_y , G_z) für die ortsbezogene Kodierung der MR-Signale und der Hochfrequenzimpuls zur Anregung des interessierenden Gewebes.

In Bezug auf das relativ *starke statische Magnetfeld* sind derzeit keine Langzeiteffekte bekannt.⁴²⁵ Im Gegensatz dazu wurden verschiedene kleinere Kurzzeiteffekte vereinzelt berichtet, die allerdings direkt nach der MRT-Untersuchung bzw. kurz danach wieder abklingen.⁴²⁶ Hierzu zählen bspw. Lichterscheinungen, ein metallischer Geschmack im Mund, Schwindelgefühl, Übelkeit und Kopfschmerzen. Diese Symptome wurden unregelmäßig berichtet. Schwindelgefühl, Übelkeit und Kopfschmerzen traten hierbei öfters im Zusammenhang mit schnellen Kopfbewegungen im Magnetfeld auf. In Bezug auf metallische Gegenstände bestehen generell zwei Effekte des statischen Magnetfeldes. Das größte Sicherheitsrisiko besteht in der Translation⁴²⁷, als Bewegung von ferromagnetischen Objekten in Richtung des Scanners. Durch die Anziehungskraft des Magnetfeldes können die Objekte hierbei hohe Geschwindigkeiten erreichen und stellen somit eine große Gefahr dar. Die Gefahr der Translation richtet sich in erster Linie an ferromagnetische Objekte, die nicht im Körper des Probanden implantiert sind. Eine zweite Gefahr ist in der sogenannten Torsion⁴²⁸ zu sehen. Diese Gefahr betrifft vor allem im Körper des Probanden befindliche Metallobjekte. Die Gefahr besteht darin, dass sich diese Objekte aufgrund ihrer Eigenschaften an dem statischen Magnetfeld ausrichten und somit evtl. ihre Position durch Rotation verändern. Dies kann je nach Lage und Art des Objektes schwerwiegende Folgen für einen Probanden haben.

*„The gradient magnetic fields are much weaker than the static magnetic field, typically changing the overall strength of the field by only a few thousandths of a Tesla (mT) per meter. Therefore, they do not alter the translation or torsion effects on objects.“*⁴²⁹

Dennoch ist es i.V.m. den *Gradienten* ab einer gewissen Stärke möglich, *„... dass an Nervenbahnen elektrische Reize ausgelöst werden (periphere Nervenstimulation), wodurch die versorgten Muskelfasern unwillkürlich kontrahieren.“*⁴³⁰ Dieser Sachverhalt stellt zwar kein Gesundheitsrisiko dar, da jedoch Unannehmlichkeiten für den Probanden entstehen können, werden die Feldgradienten in ihrer Höhe begrenzt.

⁴²⁴ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 44

⁴²⁵ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 48; Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 211; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 137

⁴²⁶ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 49; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 56

⁴²⁷ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 50; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 140

⁴²⁸ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 50; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 140

⁴²⁹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 50

⁴³⁰ Siemens AG, Medical Solution (2003), S. 215

Trotz der geringeren Energie, die im Rahmen der Feldgradienten eingesetzt wird, um eine systematische Variation des homogenen Magnetfeldes zu erreichen, kann die Einschaltung der Feldgradienten z.B. eine Funktionsstörung eines Herzschrittmachers zur Folge haben. Des Weiteren stellt das schnelle An- und Ausschalten der einzelnen Feldgradienten, wie bereits erwähnt, die Ursache für die typischen hämmernden Geräusche dar. *„Die häufigen Wechsel der Magnetfeldausrichtung führen zu mechanischer Beanspruchung der Gradientenspulen, die ihrerseits in Schwingungen geraten und diese Schwingungen auf das Scannergehäuse übertragen können.“*⁴³¹ Die Belastung durch den Geräuschpegel ist auch abhängig von der Stärke des statischen Magnetfeldes. Der Unterschied zwischen einem 3T- und einem 1,5T-Scanner ist wahrnehmbar. Es können allerdings verschiedene Maßnahmen zum Gehörschutz ergriffen werden, wie z.B. Ohrstöpsel aus Wachs. Die Geräuschkulisse kann zwar nicht gänzlich unterbunden werden, doch mit Hilfe entsprechender Maßnahmen kann die Belastung durch den Geräuschpegel gesenkt werden und ist daher in Kauf zu nehmen.

Die *Hochfrequenzimpulse*, die zur Anregung der Spins verwendet werden, befinden sich alle im Bereich der Radiowellen. In Folge der Einstrahlung der Radiowellen bewegen sich die Spins von der Längs- in die Quermagnetisierung und kehren anschließend wieder in den Ausgangszustand zurück. Dabei geben sie die eingestrahlte Energie in Form von Wärme wieder ab, wodurch es zu einem Temperaturanstieg des betroffenen Gewebes kommt. *„Die Temperaturerhöhung ist im allgemeinen geringer als 1°C.“*⁴³² *„Metal devices and wires also absorb radiofrequency energy and may become hotter than the surrounding tissue.“*⁴³³ In diesem Sinne stellen metallische Schmuckstücke, wie z.B. Ketten oder Ohrringe, und sogar ältere Tattoos, aufgrund von Eisenoxid in einigen Farben, Quellen für Verbrennung und Hautirritationen dar.

Für den Bereich des Hochfrequenzimpulses liegt die größte Gefahr für den Probanden in einer Verbrennung. In Bezug auf die Funktionsfähigkeit von Fremdkörpern ist eine Beeinträchtigung durch den Hochfrequenzimpuls theoretisch auch denkbar.

Für das biologische Gewebe konnten in MRT-Untersuchungen bisher keine Langzeiteffekte festgestellt werden. Teilweise können schwache kurzfristige Effekte auftreten. Diese klingen aber i.d.R. nach Beendigung der MRT-Untersuchung wieder ab bzw. können durch geeignete Maßnahmen positiv beeinflusst werden. Für metallische Gegenstände bzw. Fremdkörper gilt aufgrund des mit ihnen verbundenen Risikos generell, dass sie vor Betreten des Scanner-Raumes abgegeben werden müssen. Bereits im Vorfeld einer MRT-Untersuchung wird zudem über einen Fragebogen sichergestellt, dass nur Personen teilnehmen, die in Bezug auf mögliche Risiken unbedenklich sind. Personen mit Herzschrittmacher eignen sich aus den genannten Gründen generell nicht für eine Untersuchung mittels MRT. Da es in MRT-Untersuchungen von Personen mit Herzschrittmachern bereits sechs Todesfälle ge-

⁴³¹ Jäncke, L. (2005), S. 57

⁴³² Siemens AG, Medical Solutions (2003), S. 217

⁴³³ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 53

geben hat⁴³⁴, werden die betroffenen Personen von MRT-Untersuchungen ausgeschlossen. Das größte Risiko besteht in Form des starken statischen Magnetfeldes. Am häufigsten berichten Probanden allerdings von einem Gefühl von Klaustrophobie aufgrund der engen Scanner-Öffnung, in der sie sich während der Aufnahme befinden. Auch hier kann man durch ein genaues Erklären und Probeliegen entgegenwirken. Es bleibt festzuhalten, dass auf dem gegenwärtigen Stand des Wissens und bei Beachtung der Sicherheitsvorschriften ein risikofreier Einsatz der MRT gewährleistet werden kann und generell keine schädlichen Langzeitauswirkungen bekannt sind.

⁴³⁴ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 52

5 Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

Bisher wurden im Rahmen von Kapitel 3 die biologischen Grundlagen zum Gehirn und neuronaler Aktivität besprochen und in Kapitel 4 die physikalischen Aspekte der strukturellen Magnetresonanztomographie (MRT) erläutert. Diese beiden Kapitel bilden essentielle Verständnisgrundpfeiler für die Erfassung der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) und wurden daher im Vorfeld ausführlich dargestellt. Um zu verstehen WAS tatsächlich in biologischem Sinne mittels fMRT gemessen wird und WIE, physikalisch gesehen, diese Messung realisiert werden kann, wird an die unterschiedlichen Erkenntnisse aus Kapitel 3 und 4 zu Beginn von Kapitel 5 angeknüpft, um sich in angemessener Weise mit dem *MR-Signal im Rahmen der fMRT* auseinandersetzen zu können. Es wurde bereits in Kapitel 4 dargelegt, wie die Bilderstellung bei der MRT erfolgt und dass eine MR-Aufnahme zentral vom Signal-zu-Rausch-Verhältnis, dem Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis und der räumlichen Auflösung abhängt. Die MRT zielt hierbei auf die Abbildung strukturbezogener Unterschiede. Es geht darum, die strukturelle Beschaffenheit eines Objektes, hier des Gehirns, darzustellen. Im Ergebnis werden dreidimensionale Abbildungen erzeugt, die in der Lage sind, hochauflösend zwischen unterschiedlichen Gewebetypen im Gehirn zu differenzieren. Die fMRT versucht im Gegensatz dazu aktivitätsbezogene Unterschiede sichtbar zu machen. Wie es zum Signal bei einer fMRT-Messung kommt, wird im ersten Unterkapitel geklärt. Daraufhin werden weitere zentrale Sachverhalte in Bezug auf die fMRT thematisiert. Es wird auf das *experimentelle Design* eingegangen, das für das Gelingen bzw. die sinnvolle Anwendung einer fMRT-Untersuchung entscheidend ist. Anschließend werden einige generelle Anmerkungen zur *Erhebung* und *Messung* im Rahmen der fMRT gemacht. Bevor eine ausführliche Auseinandersetzung mit der *statistischen Datenauswertung* erfolgt, wird auf die dafür erforderliche *Vorverarbeitung der Rohdaten* eingegangen. Abschließend werden *weitere Aspekte* im Zusammenhang mit der fMRT-Datenanalyse angesprochen und das eigene Vorgehen beschrieben, welches diese Aspekte in adäquater Weise berücksichtigt.

5.1 Das MR-Signal im Rahmen der fMRT

Wie bereits angesprochen, geht es einleitend darum, zu klären WAS mittels der fMRT gemessen wird und WIE dieser Sachverhalt gemessen werden kann. An Kapitel 3 anknüpfend erfolgt dazu zunächst die Erläuterung der neurovaskulären Kopplung. Darauf aufbauend geht es dann darum, die Signalentstehung im Rahmen der fMRT, mit Hilfe der grundlegenden physikalischen Erkenntnisse aus Kapitel 4, zu klären. Anschließend gilt es, die Signaleigenschaften darzustellen.

5.1.1 Neurovaskuläre Kopplung

Zentral für das Verständnis des biologischen WAS der Messung mittels fMRT ist die sog. *neurovaskuläre Kopplung*⁴³⁵. Es handelt sich hierbei um die enge Verbindung zwischen neuronaler und vaskulärer Aktivität. Dieses Verständnis stellt die Grundlage dar, die eine Verknüpfung des biologischen Ursprungs mit den physikalischen Aspekten der fMRT-Messung ermöglicht.

Aus Kapitel 3.2⁴³⁶ sollte hervorgegangen sein, was neuronale Aktivität ist und wie sie sich auf verschiedenen Ebenen zeigt. Unter *vaskulärer* bzw. *hämodynamischer Aktivität* versteht man Aktivität in Bezug auf die Strömungsmechanik des Blutes bzw. den Blutfluss in den Blutgefäßen. Ziel der funktionellen MRT (fMRT) ist es, neuronale Aktivität abzubilden. Die fMRT misst neuronale Aktivität jedoch nicht auf direktem Wege, sondern versucht diese über indirekte Begleiterscheinungen zu erfassen. Um dies besser nachvollziehen zu können, geht es im Folgenden zunächst darum, die kausalen Zusammenhänge zwischen den genannten Arten von Aktivität aufzuzeigen. In welchem Sinne die neurovaskuläre Kopplung entscheidend für die Messung im Rahmen der fMRT ist, wird in Kapitel 5.1.2⁴³⁷ geklärt.

Um die angesprochene Beziehung besser zu verstehen, bietet sich als Ausgangspunkt das *ATP (Adenosintriphosphat)* an. Das ATP stellt das Verbindungsstück dar, das den Bezug zwischen neuronaler und vaskulärer Aktivität herstellt. *„Eine Zelle kann nur (über)leben, wenn genügend ATP in der Zelle vorhanden ist. Leben ist an die Anwesenheit von Energie und damit von ATP gebunden“*⁴³⁸. ATP stellt Bioenergie dar, die als universelle Form unmittelbar verfügbarer Energie verstanden werden kann. Diese Bioenergie wird für verschiedene zellinterne stoffwechselbezogene Prozesse benötigt, auf die teilweise noch eingegangen wird. Wie bereits erwähnt wurde, befinden sich innerhalb einer Nervenzelle verschiedene Strukturen, sog. Organellen, mit spezifischen Aufgaben. Eine zentrale Struktur stellen hierbei die Mitochondrien dar. Da sie für die ATP-Generierung zuständig sind⁴³⁹, werden sie auch als Kraftwerke der Nervenzelle bezeichnet. Um Bioenergie bereitstellen zu können, brauchen die Mitochondrien *Glukose* und *Sauerstoff*. *„Der Sauerstoff, den wir einatmen, ist für die Energieerzeugung in den Mitochondrien unverzichtbar. Das Gehirn ist folglich vollständig auf die Versorgung mit Sauerstoff und Glukose durch das Blut angewiesen, da die Mitochondrien in den Nervenzellen ohne diese Substanzen kein ATP synthetisieren können.“*⁴⁴⁰

Die zellinterne Erzeugung von ATP läuft idealer Weise in vier Schritten ab.⁴⁴¹ Glukose-Moleküle, die über das Blut aufgenommen werden, stellen hierbei den Rohstoff

⁴³⁵ vgl. Rosengarten, B.; Gerriets, T.; Stolz, E. (2005), S. 184; Bauer, H. (2007), S. 127; Munk, M. (2011), S. 479 ff.

⁴³⁶ Kapitel 3.2 Die funktionelle Einheit des Gehirns

⁴³⁷ Kapitel 5.1.2 Signalentstehung

⁴³⁸ Menche, N. (2007), S. 25

⁴³⁹ vgl. Bear, M. F.; Connors, B. W.; Paradiso, M. A. (2009), S. 39

⁴⁴⁰ Thompson, R. F. (2001), S. 35

⁴⁴¹ vgl. Menche, N. (2007), S. 19; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 74 ff.; Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 51 f.

dar. Der gesamte Prozess der Umwandlung von Glukose in Energie wird *Zellatmung*⁴⁴² genannt. Im ersten Schritt, der *Glykolyse*, entstehen aus einem Glukose-Molekül zwei ATP-Moleküle und es liegen im Ergebnis zwei Pyruvat-Moleküle vor. Diese Pyruvat-Moleküle werden im zweiten Schritt in Acetyl-Coenzym A umgewandelt. Nachdem im Rahmen des *Zitratzyklus* Elektronen an das generierte Coenzym gebunden wurden, erfolgt im letzten Schritt die Sauerstoffzufuhr. Der vierte Schritt wird auch als *Atmungskette* bezeichnet. Das Resultat der Zellatmung, in der die Sauerstoffzufuhr die entscheidende Komponente für die Generierung der Energiemenge darstellt, kann auf 36 ATP-Moleküle pro Glukose-Molekül beziffert werden. Liegt eine Situation vor, in der kein Sauerstoff in der Zelle vorhanden ist, kann trotzdem ATP hergestellt werden. Im Zuge dieser *anaeroben Glykolyse*⁴⁴³ läuft zumindest der erste der beschriebenen Vorgänge ab und liefert immerhin im Ergebnis 2 ATP-Moleküle. In diesem Fall läuft die Glykolyse zwar schneller ab als unter aeroben Bedingungen, allerdings ist der Prozess sehr ineffizient und erreicht mittel- bis langfristig keine ausreichende ATP-Versorgung der Zelle. Mit Hilfe von Sauerstoff können 36 ATP-Moleküle aus einem Glukose-Molekül erzeugt werden, ohne Sauerstoff lediglich 2. Aus diesem Grund ist eine ausreichende Versorgung der Zellen mit Sauerstoff unabdingbar für die Funktionsweise eines Organismus.

Nachdem geklärt ist, wie ATP in der Zelle generiert wird, ist als Nächstes herauszustellen, auf welche Weise die Zelle mit Glukose und Sauerstoff versorgt wird. Hierbei konzentrieren sich die nachfolgenden Ausführungen auf den Sauerstofftransport, da dieser relevant für die fMRT-Messung ist.

Die beiden zentralen Stoffwechselprodukte werden über das Blut an die Nervenzellen geliefert. Genauer gesagt, sind die roten Blutkörperchen (Erythrozyten) für den Sauerstofftransport verantwortlich. Der Sauerstoff wird an das *Hämoglobin*⁴⁴⁴, den Blutfarbstoff, gebunden. Die roten Blutkörperchen erhalten den Sauerstoff in der Lunge, wodurch aus Hämoglobin sog. Oxyhämoglobin wird.

Ein erhöhter Blutfluss findet sich im Körper immer dort, wo Sauerstoff und Nährstoffe gebraucht werden. Gelangt mit Sauerstoff beladenes Hämoglobin an einen Ort, der Sauerstoff benötigt, löst sich dieser aufgrund des Konzentrationsgefälles automatisch vom Hämoglobin. Nach der Abgabe von Sauerstoff bindet das Hämoglobin wiederum aufgrund des Konzentrationsgefälles vor Ort den Abfallstoff Kohlenstoffdioxid (CO₂). Das nunmehr sauerstoffarme Hämoglobin (Deoxyhämoglobin) gelangt über das Herz zu den Lungen, wo es das CO₂ abgibt und im Gegenzug mit Sauerstoff beladen wird.⁴⁴⁵ Nun steht wieder sauerstoffreiches Hämoglobin (Oxyhämoglobin) zur Verfügung. Dieses sauerstoffreiche Blut wird über das Herz zu den entsprechenden Regionen weitergeleitet. Nachdem sich der Sauerstoff am Zielort gelöst hat, nimmt das Blut erneut CO₂ aus dem Zielort auf und befördert es wieder zurück zu den Lungen.

⁴⁴² vgl. Bauer, E. W. (2006), S. 134; Parker, S. (2008), S. 135

⁴⁴³ vgl. Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 51; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 75

⁴⁴⁴ vgl. Menche, N. (2007), S. 195; Parker, S. (2008), S. 116; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 276 f.; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 215; Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 317

⁴⁴⁵ vgl. Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 379

Die genannten Prozesse der Aufnahme und Abgabe von Sauerstoff und CO₂ nennt man auch *Gasaustausch*⁴⁴⁶. Der beschriebene Weg des Blutes von den Lungen über das Herz zu den Zielzellen und wieder zurück über das Herz zu den Lungen ist als Zusammenfassung des *kleinen* (Lungenkreislauf) und *großen Blutkreislaufs* (Körperkreislauf)⁴⁴⁷ zu verstehen.

Im Zusammenhang mit neuronaler Aktivität gelangt das Blut von den Lungen über das Herz ins Gehirn. Der Transport des Blutes zu den Zielzellen und wieder zurück in die Lungen erfolgt über ein System verschiedener Blutgefäße mit unterschiedlichen Durchmessern. Man spricht in diesem Sinne auch vom *vaskulären System*. In Bezug zu den Zielzellen im Gehirn wird das sauerstoffreiche Blut, auch als arterielles Blut bezeichnet, da es zunächst über sog. *Arterien* in Richtung der Zielzellen fließt. Im nächsten Schritt gelangt Oxyhämoglobin in die noch schmaleren *Arteriolen* und wird letztlich über die *Kapillaren*⁴⁴⁸, die die Blutgefäße mit dem geringsten Durchmesser darstellen, an die Zielzellen abgegeben. Das Kapillarnetz des Gehirns ist hierbei „... so eng geknüpft, dass die meisten Neurone nicht mehr als 50 µm von einer Kapillare entfernt sind.“⁴⁴⁹

Beim bereits beschriebenen Gasaustausch besteht allerdings kein direkter Kontakt zwischen den Kapillarwänden der Blutgefäße und den Neuronen. Zwischen beiden befinden sich die Astrozyten, eine spezielle Art von Gliazellen. Zum einen umschließen die Astrozyten die Nervenzellen. Zum anderen weisen sie auch einen direkten Kontakt mit den Blutgefäßen des Gehirns auf. Sie liegen dabei so dicht an den Blutgefäßen, dass sie eine Art Hülle um die Blutgefäße darstellen. „Diese Astrozytenhülle enthält fetthaltiges Material, sodass sämtliche nicht fettlöslichen Substanzen Schwierigkeiten haben, diese Barriere ins Hirngewebe zu durchdringen. Wie es der Zufall will, sind zahlreiche potenziell schädliche Substanzen nicht fettlöslich.“⁴⁵⁰ Auf diese Weise verhindern die Astrozyten, dass für die Nervenzelle schädliche Stoffe über das Blut in die Zelle eindringen. Neben dieser Schutzfunktion gestatten sie den für die Zelle notwendigen Stoffen auf der anderen Seite den Eintritt in die Zelle. Der Stofftransport zwischen den Blutgefäßen und den Nervenzellen erfolgt intrazellulär über die Astrozyten. Die Eigenschaft dieser Semipermeabilität wird auch als *Blut-Hirnschranke*⁴⁵¹ bezeichnet. Abbildung 52 ist der schematische Aufbau dieser Blut-Hirnschranke zu entnehmen.

⁴⁴⁶ vgl. Bauer, E. W. (2006), S. 134; Menche, N. (2007), S. 278 f.; Parker, S. (2008), S. 134; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 214 ff.; Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 253

⁴⁴⁷ vgl. Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 342 ff.

⁴⁴⁸ vgl. Bauer, E. W. (2006), S. 129; Parker, S. (2008), S. 117; Schwegler, J.; Lucius, R. (2006), S. 348

⁴⁴⁹ Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 25

⁴⁵⁰ Thompson, R. F. (2001), S. 47

⁴⁵¹ vgl. Pinel, J. P. J.; Pauli, P. (2012), S. 66; Schandry, R. (2011), S. 58; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 149 f.; Thompson, R. F. (2001), S. 47; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 25

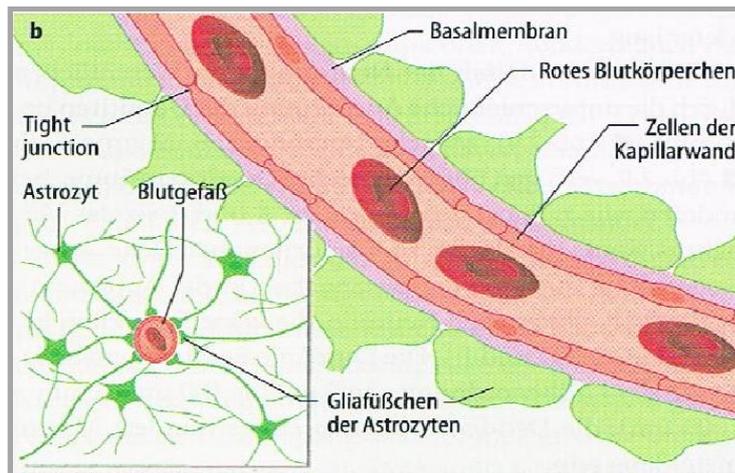


Abbildung 52: Die Blut-Hirnschranke⁴⁵²

Wird an den Kapillaren nach Abgabe des Sauerstoffs CO_2 an die roten Blutkörperchen gebunden, erfolgt der Abtransport des nun sauerstoffarmen Blutes (Deoxyhämoglobin) zunächst über die etwas breiteren *Venolen* und gelangt über die wiederum breiteren *Venen* zurück zu den Lungen. Aus diesem Grund ist im Zusammenhang mit sauerstoffarmem Blut auch von venösem Blut die Rede.

Nachdem in einem ersten Schritt die Bedeutung von ATP und die ATP-Synthese besprochen wurden und in einem zweiten Schritt das vaskuläre System mit seinen Funktionen, der Anlieferung der Stoffwechselprodukte Glukose und Sauerstoff und dem Abtransport von Abfallstoffen dargestellt wurde, geht es im letzten Schritt darum, den Bezug zur neuronalen Aktivität herzustellen.

Die meisten Prozesse innerhalb der Zelle benötigen Energie. Allerdings ist für die Ausbildung und Weiterleitung von Aktionspotenzialen kaum bis keine Energie erforderlich. Dies trifft auch auf die Ausschüttung von Neurotransmittern im Rahmen einer synaptischen Übertragung zu. Bei den genannten Vorgängen spielen spezielle Ionenkonzentrationen die entscheidende Rolle für die Auslösung dieser Prozesse. Bei der Ausbildung und Weiterleitung von Aktionspotenzialen sind Na^+ und K^+ entscheidend, bei der Ausschüttung der Neurotransmitter in den synaptischen Spalt wird der Ablauf durch Ca^{2+} gesteuert.⁴⁵³ Daher erfordern diejenigen Prozesse, die in einem direkten Bezug zu neuronaler Aktivität stehen, kaum bis kein ATP.

Bei Prozessen, die als Nebenprodukte bzw. als weitere Folgen neuronaler Aktivität anfallen, ist hingegen Energie unabdingbar.⁴⁵⁴ Im Anschluss an eine Erregung muss eine Nervenzelle zunächst wieder zu ihrem Ruhepotenzial zurückkehren, um erneut stimuliert werden zu können. Zentral für die Wiederherstellung des Ruhepotenzials ist die *Natrium-Kalium-Pumpe*⁴⁵⁵. Um die ursprüngliche Ionenkonzentration wieder herzustellen, pumpt diese Na^+ -Ionen aus der Zelle heraus und K^+ -Ionen aus dem Extrazellularraum in die Zelle hinein. Damit diese Pumpe beide Ionenarten gegen

⁴⁵² Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 24

⁴⁵³ vgl. Pritzel, M.; Brand, M.; Markowitsch, H. J. (2009), S. 63 f.

⁴⁵⁴ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 167 f.; Klose, U.; Erb, M.; Raddi, A.; Grodd, W. (1999), S. 27; Buxton, R. B. (2009), S. 14 f.

⁴⁵⁵ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 64 f.; Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 18 f.; Schandry, R. (2011), S. 69 ff.; Carlson, N. R. (2004), S. 54

ihre Konzentrationsgefälle bewegen kann, benötigt sie „... *eine beträchtliche Menge an Bioenergie in Form von ATP*“⁴⁵⁶. Je größer das Konzentrationsgefälle ist, desto aktiver wird die Pumpe und desto mehr Energie verbraucht sie. Im Ergebnis „... *wird mehr als 1/3 des Energieverbrauchs der Zelle für die Na⁺-K⁺-Pumpe aufgewandt*.“⁴⁵⁷ „*Bis zu 40% der metabolischen Reserven eines Neuron werden für ihren Betrieb verbraucht*.“⁴⁵⁸

In der Synthese von Neurotransmittern kann ein weiterer Prozess gesehen werden, der infolge neuronaler Aktivität auf ATP angewiesen ist.⁴⁵⁹ Wie in Kapitel 3.2.3⁴⁶⁰ dargestellt wurde, geht im Zuge einer synaptischen Übertragung, als Ergebnis neuronaler Aktivität an chemischen Synapsen, immer etwas Neurotransmitter verloren. Im Vergleich zur freigesetzten Neurotransmittermenge gelangt auf unterschiedliche Wege meistens nur eine geringere Menge wieder zurück in die präsynaptische Nervenzelle. Zum einen wird ATP für die teilweise Wiederaufnahme des ausgeschütteten Neurotransmitters, auch *Reuptake* genannt, benötigt.⁴⁶¹ Zum anderen müssen neue Neurotransmitter hergestellt werden, um den bei jeder Übertragung entstehenden kleinen Verlust auszugleichen. Würde keine Neusynthese stattfinden, wäre eine synaptische Übertragung nach einer gewissen Zeit nicht mehr möglich.

Dies sind drei Beispiele für Folgeprozesse von neuronaler Aktivität, die ohne ATP nicht stattfinden. Um diesen ATP-Bedarf decken zu können, sind Nervenzellen bei neuronaler Aktivität auf eine erhöhte Blutzufuhr über das vaskuläre System angewiesen. In Bezug auf die Blutzufuhr ist generell festzuhalten, dass sich im Körper ca. 5-6 Liter Blut befinden. Dieses *Blutvolumen* ist relativ konstant über die Zeit, reicht aber nicht aus, um alle Bereiche gleichzeitig mit genügend Blut zu versorgen. Der *lokale Blutfluss* hingegen kann sich infolge des Stoffwechselbedarfs ändern, so dass aktive Bereiche entsprechend mit sauerstoffreichem Blut für die Energiegewinnung versorgt werden und Bereiche, in denen gegenwärtig keine bzw. sehr wenig Energie benötigt wird, schwächer durchblutet sind. Kurzfristig kann zwar auch ohne Sauerstoffzufuhr Energie erzeugt werden, diese Möglichkeit ist allerdings stark begrenzt, so dass Nervenzellen schon nach kurzer Zeit ohne Blut- und damit ohne Sauerstoffzufuhr nicht mehr funktionsfähig sind.⁴⁶² Ein wichtiger Mechanismus für die Mehrversorgung mit sauerstoffreichem Blut, der bis heute nicht vollständig aufgeschlüsselt ist, ist die sog. *Vasodilation*. Im Fall von Sauerstoffmangel erfolgt in den betreffenden Regionen eine Gefäßerweiterung, die den Widerstand in den Gefäßen verringert und auf diese Weise den lokalen Blutfluss beeinflusst.⁴⁶³ Die Blutversorgung wird in diesem Sinne über eine Art Pull-Mechanismus gesteuert, bei dem der lokale Blutfluss verstärkt in die

⁴⁵⁶ Thompson, R. F. (2001), S. 64

⁴⁵⁷ Schmidt, R. F.; Schaible, H.-G. (2006), S. 18

⁴⁵⁸ Carlson, N. R. (2004), S. 54

⁴⁵⁹ vgl. Thompson, R. F. (2001), S. 35; Munk, M. (2011), S. 479 ff.; Raab, G.; Gernsheimer, O.; Schindler, M. (2009), S. 64

⁴⁶⁰ Kapitel 3.2.3 Die synaptische Übertragung

⁴⁶¹ vgl. Pritzel, M.; Brand, M.; Markowitsch, H. J. (2009), S. 71

⁴⁶² vgl. Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 613; Gertz, S. D. (2003), S. 132; Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2003), S. 456

⁴⁶³ vgl. Birbaumer, N.; Schmidt, R. F. (2010), S. 202 f.; Mörike, K. D.; Betz, E.; Mergenthaler, W. (2007), S. 613; Menche, N. (2007), S. 259

Regionen geleitet wird, die infolge neuronaler Aktivität einen erhöhten Stoffwechselbedarf rückmelden.

5.1.2 Signalentstehung

In Kapitel 4 wurde bereits darauf eingegangen, wie eine 3D-Gehirnabbildung im Rahmen der strukturellen Magnetresonanztomographie (MRT) über die entsprechenden MR-Signale generiert wird. Das zugrunde liegende Messprinzip in Form der Spin-Ausrichtung der Wasserstoffatomkerne am statischen Magnetfeld, der Anregung der Spins über einen Hochfrequenzimpuls und der anschließenden Signaldektion beim Zurückschwingen der Spins in den Ausgangszustand wird auch im Zuge der fMRT angewendet. Da die fMRT anders als die MRT darauf abzielt, Unterschiede hinsichtlich der neuronalen Aktivität herauszustellen, bedarf es in diesem Zusammenhang einer biophysikalischen Eigenschaft, die sich im Zuge der Informationsverarbeitung verändert und in diesem Sinne als Marker⁴⁶⁴ für Gehirnaktivität verwendet werden kann. In Kapitel 5.1.1⁴⁶⁵ wurde dargestellt, was unter *neurovaskulärer Kopplung* zu verstehen ist und warum die beschriebenen Stoffwechselprozesse in der Lage sind, neuronale Aktivität zu indizieren. Im Folgenden geht es darum aufzuarbeiten, inwiefern das Phänomen der neurovaskulären Kopplung zentral für die Messung im Rahmen der fMRT ist und auf welche Weise sie genutzt werden kann, um eine Veränderung im gemessenen MR-Signal zu erzeugen.

Aufgrund der bereits beschriebenen Verbindung kann die Blutflussreaktion genutzt werden, um aktive Gehirnregionen zu erfassen. Die physikalische Messung kann hierbei prinzipiell auf Grundlage verschiedener Gegebenheiten angesetzt werden. Für die fMRT sind potenziell drei relevante Kontrastmechanismen⁴⁶⁶ zu nennen. Bei der *Blutvolumenänderung*⁴⁶⁷ beruht die Erfassung von Gehirnaktivität auf einem Anstieg der Gesamtblutmenge. Durch die bereits angesprochene Blutflussreaktion nimmt das Blutvolumen logischerweise in aktiven Gehirnregionen zu. Im Rahmen dieser Variante ist die zweimalige Injektion eines MR-Kontrastmittels für die Messung des regionalen zerebralen Blutvolumens (rCBV) und somit für die Visualisierung aktiver Regionen unverzichtbar. Durch die Injektionen kommt es allerdings häufig zu Bewegungen der Patienten bzw. Probanden, die sich nachteilig auf die Messung auswirken.⁴⁶⁸

Eine weitere Möglichkeit die dynamischen Prozesse im Gehirn abzubilden, liegt in der Berücksichtigung der *Blutflussänderung*⁴⁶⁹. Ist der relevante Zielort bekannt, ist

⁴⁶⁴ Ein Biomarker ist eine biologische Substanz, die als Indikator auf einen biologischen Zustand hindeutet.

⁴⁶⁵ Kapitel 5.1.1 Neurovaskuläre Kopplung

⁴⁶⁶ Hierbei handelt es sich um unterschiedliche Vorgehensweisen, die eine Differenzierung zwischen aktivierten und nicht-aktivierten Gehirnregionen ermöglichen.

⁴⁶⁷ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 79 f.; Vlaardingerbroek, M. T.; den Boer, J. A. (2004), S. 385 ff.; Burke, M. (2000), S. 32 f.

⁴⁶⁸ Warum es Bewegungen der Probanden im Rahmen einer fMRT-Messung zu vermeiden gilt, wird in Kapitel 5.3.2 *Vorverarbeitung der Daten* angesprochen.

⁴⁶⁹ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 80; Vlaardingerbroek, M. T.; den Boer, J. A. (2004), S. 388 ff.; Detre, J. A.; Leigh, J. S.; Williams, R. S.; Koretsky, A. P. (1992), S. 37 f.

es möglich die Wasserstoffatomkerne in den angrenzenden Bereichen über einen geeigneten HF-Impuls anzuregen. Gelangt in Folge der Blutflussänderung sauerstoffreiches Blut über die Arterien in die Nähe des Zielortes werden die Wasserstoffatomkerne im Blut dort zunächst angeregt. Die Anregung findet außerhalb des relevanten Gewebes statt. Diffundieren die bereits angeregten Wasserstoffatome anschließend in die Nervenzelle⁴⁷⁰, interagieren sie mit dem dort befindlichen Wasser. Aufgrund der vorherigen Anregung kommt es zu einer stärkeren Reaktion als im Falle nicht angeregter Wasserstoffatome. Durch diese starke Reaktion ist überall dort, wo es nach der Blutflusserhöhung zur Diffusion an Zellmembranen kommt, ein MR-Signalanstieg zu verzeichnen. Dieses Vorgehen galt lange Zeit als vielversprechender Ansatz⁴⁷¹, doch letztlich erwies sich die Messung neuronaler Aktivität auf diesem Weg als zu kompliziert.

Die beiden genannten Kontrastmechanismen, die auch als *MR-Perfusionsbildgebung* und *arterielle Spinmarkierung* bezeichnet werden, finden im Rahmen der wissenschaftlichen Erforschung neuronaler Aktivität kaum bis keine Anwendung. Sie werden vor allem im Hinblick auf unterschiedliche klinische Fragestellungen eingesetzt. Die gängigste Art, neuronale Aktivität über die fMRT abzubilden, liegt im sog. *BOLD-Kontrast*⁴⁷². Die Abkürzung BOLD steht für Blood Oxygenation Level Dependent und deutet auf einen Effekt in Abhängigkeit vom Sauerstoffgehalt des Blutes hin. „Die physiologische Erklärung für die Entstehung des BOLD-Signals liegt in der Erhöhung des rCBF während neuronaler Aktivität, wobei der lokale Sauerstoffverbrauch nicht in dem Maße erhöht ist, wie sauerstoffreiches Blut angeboten wird (Sauerstoffüberschuss).“⁴⁷³ Dieser Überschuss führt dazu, dass in aktivierten Gehirnregionen weniger sauerstoffarmes Blut und dafür eine viel höhere Konzentration an sauerstoffreichem Blut vorzufinden ist. Dieser Sachverhalt kann aufgrund seiner physikalischen Eigenschaften für die Messung des MR-Signals bei der fMRT ausgenutzt werden. Der Physiker und Chemiker Linus Pauling stellte fest, dass sauerstoffreiches und sauerstoffarmes Blut unterschiedliche magnetische Eigenschaften aufweisen.⁴⁷⁴ Genauer gesagt, basiert die fMRT auf den sich ändernden magnetischen Eigenschaften des Hämoglobins (roter Blutfarbstoff), je nachdem ob Sauerstoff gebunden ist oder nicht. „Hämoglobin besteht aus vier Häm-Gruppen, im Zentrum jeder Häm-Gruppe befindet sich ein Eisenatom, an das ein Sauerstoffmolekül binden kann.“⁴⁷⁵ Liegt Oxyhämoglobin vor, so wird die magnetische Wirkung des Eisenatoms durch den gebundenen Sauerstoff unterdrückt. Entsteht in Folge der Sauerstoffabgabe Deoxyhämoglobin, wird die magnetische Wirkung des Eisenatoms nicht länger durch

⁴⁷⁰ Sauerstoffreiches Blut weist mehr Wasserstoff auf als sauerstoffarmes. In der Folge dringt neben Zucker und Sauerstoff auch Wasserstoff in die Zelle ein.

⁴⁷¹ Die Messung der Blutflussänderung ähnelt stark dem PET-Ansatz, der in *Kapitel 2.1 Allgemeiner Anwendungsbereich* kurz beschrieben wurde.

⁴⁷² vgl. Jäncke, L. (2005), S. 80 ff.; Plassmann, H. (2006), S. 115 ff.; Ogawa, S.; Tank, D. W.; Menon, R.; Ellermann, J. M.; Kim, S.-G.; Merkle, H.; Ugurbil, K. (1992), S. 5951; Braus, D. F.; Müller, M. J.; Weniger, G. (2010), S. 243 f.

⁴⁷³ Jäncke, L. (2005), S. 81

⁴⁷⁴ vgl. Pauling, L.; Coryell, C. D. (1936)

⁴⁷⁵ Albrecht, J. (2008), S. 25

den Sauerstoff unterdrückt und kommt stärker zu Geltung. Oxyhämoglobin ist diamagnetisch und in der Folge weniger stark magnetisierbar als Deoxyhämoglobin. Das paramagnetische Deoxyhämoglobin weist ein stärkeres eigenes Magnetfeld auf, was dazu führt, dass das externe Magnetfeld gestört wird. Durch die Störung des externen Magnetfeldes verkürzt sich im betroffenen Gewebe die T_2^* -Zeit. Diese Verkürzung kommt in einer Abschwächung des zu messenden MR-Signals der angeregten Wasserstoffatomkerne zum Ausdruck.⁴⁷⁶ Im Gegensatz dazu weist Oxyhämoglobin, das im Zuge neuronaler Aktivität in den betroffenen Regionen überschüssig vorhanden ist, ein geringeres eigenes Magnetfeld auf und trägt auf diese Weise dazu bei, dass es im Vergleich zu Deoxyhämoglobin durch eine geringere Signalstörung zu einem MR-Signalanstieg kommt. Oxyhämoglobin verstärkt hierbei allerdings nicht das MR-Signal. Vielmehr verhält es sich so, dass der Überschuss an Oxyhämoglobin den hemmenden Einfluss von Deoxyhämoglobin unterdrückt und auf diese Weise das MR-Signal deutlicher hervorsteht.⁴⁷⁷

*„Die erhöhte Sauerstoffsättigung HbO_2 führt zu einem verlangsamten Zerfall des MRT-Signals im Vergleich zum nicht aktivierten Ruhezustand (Kontrollbedingung). Diese Unterschiede sind physikalisch messbar.“*⁴⁷⁸ Im Ergebnis bleibt festzuhalten, dass in Bereichen neuronaler Aktivität durch das Überangebot an sauerstoffreichem Blut ein stärkeres MR-Signal gemessen werden kann. Durch die Erläuterungen zur neurovaskulären Kopplung und die Ausführungen zur Signalentstehung im Rahmen der fMRT sollte deutlich geworden sein, dass die Messung über den BOLD-Kontrast eine indirekte Messung neuronaler Aktivität darstellt.

Die verschiedenen Wechselwirkungen zwischen den unterschiedlichen Prozessen auf dem Weg von neuronaler Aktivität bis hin zur Messung des MR-Signals sind in Abbildung 53 noch einmal veranschaulicht.

⁴⁷⁶ vgl. Albrecht, J. (2008), S. 25; Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 82

⁴⁷⁷ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 193 f.; Kaufmann, C.; Auer, D. P. (2002), S. 200; Noll, D. C. (2001), S. 7 f.; Klose, U. et al. (1999), S. 27; Haacke, E. M.; Lai, S.; Reichenbach, J. R.; Kuppusamy, K.; Hoogenraad, F. G. C.; Takeichi, H.; Lin, W. (1997), S. 341 ff.; Bandettini, P. A.; Kwong, K. K.; Davis, T. L.; Tootell, R. B. H.; Wong, E. C.; Fox, P. T.; Belliveau, J. W.; Weisskoff, R. M.; Rosen, B. R. (1997), S. 63 f.; Kwong, K. K.; Belliveau, J. W.; Chesler, D. A.; Goldberg, I. E.; Weisskoff, R. M.; Poncelet, B. P.; Kennedy, D. N.; Hoppel, B. E.; Cohen, M. S.; Turner, R.; Cheng, H.-M.; Brady, T. J.; Rosen, B. R. (1992), S. 5676 f.; Bandetti, P. A.; Wong, E. C.; Hinks, R. S.; Tikofsky, R. S.; Hyde, J. S. (1992), S. 390 f.

⁴⁷⁸ Plassmann, H. (2006), S. 117

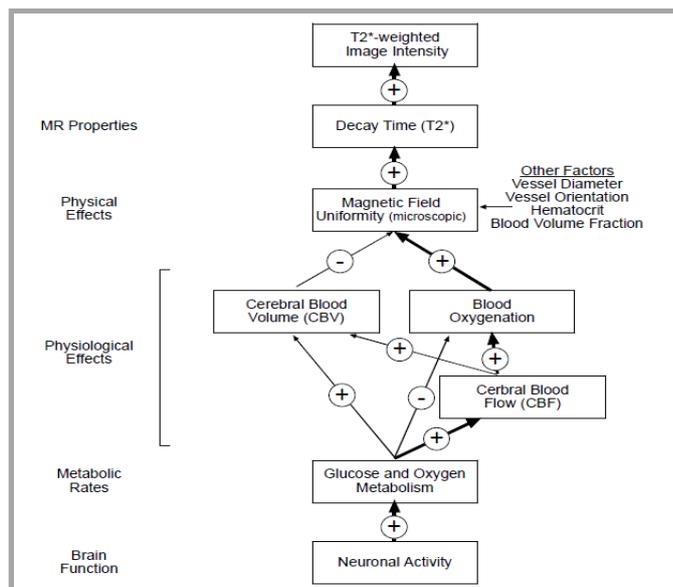


Abbildung 53: Wechselwirkung der verschiedenen Prozesse von der neuronalen Aktivität bis zur Messung des MR-Signals⁴⁷⁹

Es existiert theoretisch eine weitere Messvariante, die im Kontrast zu den drei vorgestellten Mechanismen steht. Von der Idee her wird auch hier der BOLD-Effekt ausgenutzt, allerdings handelt es sich um eine direktere Möglichkeit Gehirnaktivität zu messen. Wie Abbildung 54 zu entnehmen ist, besteht in Bezug auf den Verlauf des BOLD-Signals eine zeitliche Verzögerung der blutflussbezogenen, also hämodynamischen, Reaktion. Unmittelbar nach einer Erregung gelangt folglich noch kein neues sauerstoffreiches Blut in die aktivierten Regionen. Da die Regionen mit einer erhöhten neuronalen Aktivität Energie benötigen, liegt in dieser ersten Verlaufsphase eine höhere Konzentration von sauerstoffarmem Blut nahe den Zielzellen vor. Diese kurzzeitige Deoxyhämoglobin-Konzentration kann als Stoffwechselprodukt angesehen werden. In diesem Sinne steht Deoxyhämoglobin im Vergleich zu Oxyhämoglobin in noch engerer Verbindung zu neuronaler Aktivität. Wie bereits besprochen wurde, ist Deoxyhämoglobin paramagnetisch und schwächt dadurch das gemessene MR-Signal ab. Kennzeichnend für diese erste Verlaufsphase ist ein kleiner Signalabfall, der als *initial dip*⁴⁸⁰ bezeichnet wird. Der Kern dieses Messprinzips ist einleuchtend, allerdings ist eine zielführende Umsetzung noch nicht gelungen. Für die praktische Anwendung stellt der initial dip eine zu kleine Signalveränderung dar. In Abbildung 54 ist zu erkennen, dass die Veränderung lediglich ca. ein Zehntel der Veränderung des BOLD-Signals ausmacht. Zudem ist der initial dip von so kurzer Dauer, dass dieses Ereignis aufgrund des Messvorgangs bei der fMRT⁴⁸¹ theoretisch zwischen zwei Messungen liegen kann und somit evtl. verpasst wird. Mit dem technischen Standard ist dieses Messprinzip nicht umsetzbar.

⁴⁷⁹ Noll, D. C. (2001), S. 8

⁴⁸⁰ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 83 f.; Buxton, R. B. (2009), S. 416 ff.; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 147; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 211 ff.

⁴⁸¹ Auf den Messvorgang wird im Nachfolgenden noch genauer eingegangen.

Im Rahmen von wissenschaftlichen fMRT-Untersuchungen wird neuronale Aktivität aufgrund der beschriebenen Schwächen verschiedener Messprinzipien in aller Regel über den dargelegten BOLD-Kontrast erfasst. Wie aus den bisherigen Ausführungen hervorgeht, korrespondiert das letztlich gemessene MR-Signal im Rahmen der fMRT mit der beschriebenen hämodynamischen Veränderung infolge neuronaler Aktivität. Diese blutflussbezogene Veränderung wird auch als hämodynamische Antwortfunktion (HRF⁴⁸²) bezeichnet. Es wird vermehrt sauerstoffreiches Blut zu den Zielzellen transportiert, welches im Vergleich zu sauerstoffarmem Blut aufgrund seiner magnetischen Eigenschaften an diesen Stellen ein höheres MR-Signal ermöglicht. Abbildung 54 zeigt den typischen Verlauf des mit der hämodynamischen Reaktion korrespondierenden BOLD-Signals.

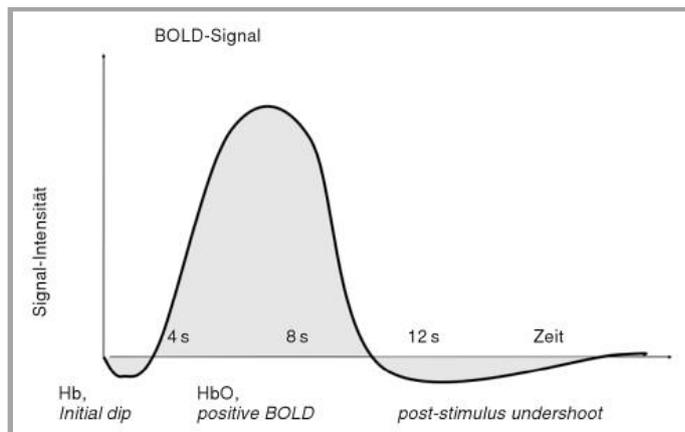


Abbildung 54: Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem kurzen Stimulus)⁴⁸³

Wie bereits weiter oben ausgeführt, ist infolge neuronaler Aktivität zunächst ein kleiner Signalverlust, der sogenannte *initial dip*, zu verzeichnen. Die Zielzelle benötigt im Fall neuronaler Aktivität mehr Energie. „Der Sauerstoffmetabolismus reagiert allerdings nur langsam auf eine Änderung im Energieverbrauch.“⁴⁸⁴ Daher liegt kurzzeitig ein Überschuss an Deoxyhämoglobin nahe den Zielzellen vor. Die blutflussbezogenen Prozesse entwickeln sich verglichen mit neuronaler Aktivität, die im Millisekunden-Bereich liegt, relativ langsam. Es besteht eine gewisse Latenz der Blutflussreaktion, d.h. es gibt eine zeitliche Differenz zwischen der neuronalen Reaktion auf einen Stimulus und der hämodynamischen Reaktion infolge der neuronalen Aktivität. Die vermehrte Zufuhr von Oxyhämoglobin erfolgt somit zeitverzögert. Es dauert ca. 4-7 Sekunden bis die hämodynamische Reaktion ihren Höhepunkt erreicht und das stärkste MR-Signal messbar ist. Anschließend entwickelt sich diese Reaktion wieder zurück in Richtung Ausgangspunkt. Im Zuge der Rückentwicklung unterschreitet das Signal nach ungefähr 8-12 Sekunden sogar das Ausgangsniveau. Dieses Phänomen wird als *Post-Stimulus Undershoot* bezeichnet. Nach ungefähr 20 Sekunden pendelt sich das BOLD-Signal dann wieder am Ausgangsniveau ein.⁴⁸⁵

⁴⁸² HRF: Hemodynamic Response Function

⁴⁸³ Jäncke, L. (2010), S. 107

⁴⁸⁴ Jäncke, L. (2005), S. 81

⁴⁸⁵ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 208 ff.; Jäncke, L. (2010); S. 117; Buxton, R. B. (2009), S. 401; Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 147

Liegt eine länger andauernde Stimulierung vor, so verändert sich der typische Verlauf des BOLD-Signals ein wenig. Wird bspw. ein Stimulus für 20 Sekunden dargeboten oder aber derselbe Reiz wiederholt präsentiert, so wird aus dem generellen Peak bei einer kurzen Stimulierung ein *Plateau*. Wie in Abbildung 55 dargestellt, dauert das Signal in der Folge länger an und es vergeht auch mehr Zeit, bevor sich der Ausgangszustand wieder einstellt.

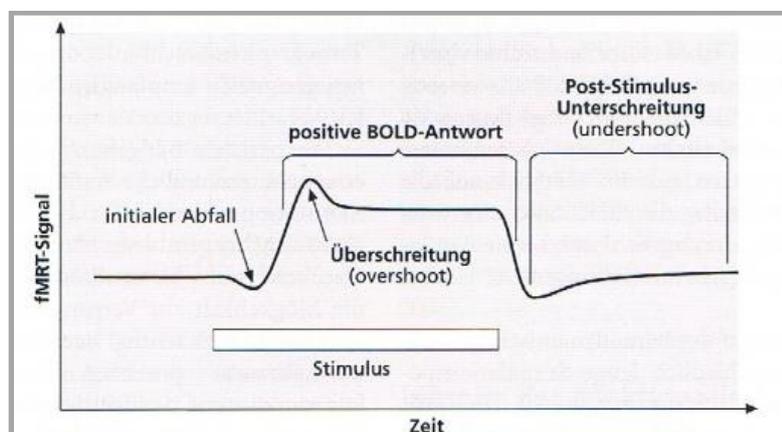


Abbildung 55: Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem länger andauernden Stimulus)⁴⁸⁶

Der beschriebene BOLD-Effekt stellt im Zusammenhang mit der hämodynamischen Reaktion die Grundlage dar, um für jedes einzelne Voxel ein entsprechendes aktivitätsbezogenes MR-Signal zu generieren. Die Kenntnis des BOLD-Signalverlaufs ist die Ausgangsbasis für alle Prozesse im Rahmen einer fMRT-Untersuchung. Dieser Signalverlauf beeinflusst sowohl den Aufbau bzw. die Durchführung eines fMRT-Experiments im Sinne des zeitlichen Designs als auch das Vorgehen im Rahmen der fMRT-Datenanalyse.

5.2 Grundlegendes zur fMRT-Messung

Nachdem geklärt ist, wie das gemessene Signal im Rahmen der fMRT auf physiologischer Basis mit neuronaler Aktivität verbunden ist und auch dargelegt wurde wie bzw. wodurch das Signal letztlich entsteht, thematisiert dieses Unterkapitel grundlegende Sachverhalte in Bezug auf die Erhebung und die konkrete Messung der fMRT-Daten. Diese Ausführungen stellen die fundamentale Basis dar, um die weiterführenden Aspekte in Kapitel 5.3⁴⁸⁷ und auch die Datenauswertung in Kapitel 5.4⁴⁸⁸ transparenter zu gestalten.

5.2.1 Experimentelles Design

Im Rahmen von Kapitel 5.1.2⁴⁸⁹ wurde bereits auf den BOLD-Effekt eingegangen und auch der charakteristische Verlauf des BOLD-Signals i.V.m. der hämo-

⁴⁸⁶ Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005a), S. 27

⁴⁸⁷ Kapitel 5.3 Spezielles zur fMRT-Messung

⁴⁸⁸ Kapitel 5.4 Statistische Datenauswertung

⁴⁸⁹ Kapitel 5.1.2 Signalentstehung

dynamischen Reaktion⁴⁹⁰ dargestellt. Generell kann man die, in gewissem Maße eingeschränkte, Aussagekraft des BOLD-Signals folgendermaßen beschreiben: „... *the BOLD fMRI signal has no absolute interpretation.*“⁴⁹¹ Die Kenntnis des Verlaufs und die Tatsache, dass das gemessene BOLD-Signal eine relative Signalveränderung und keinen absoluten Aktivitätswert repräsentiert, wie in Kapitel 5.3.1⁴⁹² noch genauer dargestellt wird, sind zentral, um den Aufbau und die Logik hinter dem *experimentellen Design*⁴⁹³ einer fMRT-Untersuchung zu verstehen. In der Folge ist es zur Herausstellung einer signifikanten Aktivierung unabdingbar, die Signalveränderungen bezogen auf zwei unterschiedliche Bedingungen miteinander zu vergleichen. Dieser Grundgedanke führt zur sog. *Subtraktionslogik*. „*Subtraction logic was developed in the nineteenth century for the study of reaction times to infer differences in cognitive processing. In subtraction logic, one compares two events that putatively differ by only one factor.*“⁴⁹⁴ Ursprünglich untersuchte Donders⁴⁹⁵ die Unterschiede zwischen kognitiven Prozessen über die Reaktionszeit. Hierzu verglich er die Reaktionszeiten bei zwei kognitiven Prozessen bzw. Aufgaben. Probanden wurden in einer ersten Aufgabenstellung (A) darum gebeten, immer dann auf einen Knopf zu drücken, wenn sie einen Lichtreiz sahen. Im Zuge einer zweiten Anweisung (B) wurden die Probanden dazu aufgefordert, immer dann mit der rechten Hand auf einen Knopf zu drücken, wenn ein roter Lichtreiz eingeblendet wurde und einen Knopf mit der linken Hand zu betätigen, sobald sie ein weißes Licht sahen. Die beiden beschriebenen Bedingungen sind bis auf die Diskriminierungsaufgabe identisch. „*Assuming that condition B differs from A only in the need to discriminate the color of the light, a subtraction of the reaction time for A from that for B should reveal the cognitive processing time required to make the discrimination (with components common to both tasks, say visual processing time, being “subtracted out”).*“⁴⁹⁶

Betrachtet man fMRT-Untersuchungen aus der Perspektive klassischer Experimente, so stellt das gemessene BOLD-Signal in jedem Voxel die abhängige Variable dar. Anhand dieser abhängigen Variable bzw. anhand ihrer Veränderung versucht man die Wirkung der unabhängigen Variablen herauszustellen. Da die abhängige Variable eine relative Größe darstellt, benötigt eine fMRT-Untersuchung mindestens zwei unterschiedliche Bedingungen, um eine Entscheidung darüber zu treffen, ob ein konkreter Effekt besteht oder nicht. Im einfachsten Fall liegen eine experimentelle Bedingung (z.B. Kaufangebote, die Sonderangebote darstellen) und eine Kontrollbedingung (z.B. Kaufangebote, die ein reguläres Kaufangebot darstellen) vor. Dies sind die unabhängigen Variablen bzw. Bedingungen des Experiments. Im Zuge der Untersuchung werden beide Bedingungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten präsentiert

⁴⁹⁰ vgl. Abbildungen 54: *Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem kurzen Stimulus)* und 55: *Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem länger andauernden Stimulus)*

⁴⁹¹ Aguirre, G. K.; D’Esposito, M. (1999), S. 370

⁴⁹² Kapitel 5.3.1 Signal und Rauschen

⁴⁹³ vgl. Aguirre, G. K.; D’Esposito, M. (1999), S. 370 ff.; Culham, J. C. (2006), S. 54 ff.; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 293 ff.; Jäncke, L. (2005), S. 86 ff.; Kellermann, T.; Habel, U. (2013), S. 140 ff.; Plassmann, H. (2006), S. 118 ff.

⁴⁹⁴ Culham, J. C. (2006), S. 54 f.

⁴⁹⁵ vgl. Donders, F. C. (1868)

⁴⁹⁶ Culham, J. C. (2006), S. 55

und grob gesprochen im Sinne der Subtraktionslogik voneinander subtrahiert⁴⁹⁷. Es geht bei diesem Beispiel aus der eigene Untersuchung⁴⁹⁸ um die neuronalen Aktivierungen im Zusammenhang mit Sonderangebotssignalen. Beide Bedingungen unterscheiden sich lediglich durch die An- bzw. Abwesenheit eines Sonderangebotssignals. Im Ergebnis der Subtraktion der beiden Bedingungen sollten diejenigen Aktivierungen übrig bleiben, die durch Sonderangebotssignale ausgelöst werden.

Die Subtraktionslogik stellt die Grundlage aller fMRT-Untersuchung dar. Hat man einmal den zu untersuchenden Prozess (experimentelle Bedingung) fixiert, ist es die wichtigste und zugleich schwerste Aufgabe eines Forschers, diejenige Kontroll- bzw. Kontrastbedingung zu definieren, die wie im beschriebenen Beispiel alle gemeinsamen Details eliminiert, damit am Ende das Detail von Interesse isoliert werden kann. Diese Kontrollbedingung muss folglich mit der experimentellen Bedingung bis auf ein Detail bzw. einen Prozess vergleichbar sein. „*But if the conditions differ in more than one way, then there could be multiple explanations for experimental effects.*“⁴⁹⁹ In diesem Fall stellt jeder weitere Unterschied zwischen den beiden Bedingungen einen Konfundierungsfaktor dar. Liegt mehr als ein Unterschied zwischen den zu vergleichenden Bedingungen vor, ist eine eindeutige Interpretation des Ergebnisses unmöglich. „*Good experimental design is probably the most critical aspect of fMRI research.*“⁵⁰⁰ Die *Relevanz des experimentellen Designs* für das Gelingen einer fMRT-Untersuchung liegt auf der Hand. Zum einen sind gute bzw. robuste Bedingungen Grundvoraussetzung dafür, dass überhaupt die gewünschten neuronalen Prozesse ausgelöst und entsprechende Signale erfassbar werden. Da das Signal bei einer fMRT-Untersuchung recht schwach ist⁵⁰¹, ist es umso wichtiger robustes Stimulusmaterial zu generieren. Das eingesetzte Stimulusmaterial muss in der Lage sein, den zugrundeliegenden kognitiven Prozess deutlich zum Vorschein zu bringen. Erstellt man in Bezug auf die experimentelle Bedingung schwache bzw. unscharfe Stimuli, so ergibt dies in der Folge meist keine ausreichend starken Signale und die Untersuchung führt nicht zu den angestrebten Zielen. Zum anderen muss bei der Erstellung der Stimuli für die Kontrollbedingung darauf geachtet werden, dass sie der experimentellen Bedingung so ähnlich wie möglich sind. Hierbei gilt: Je komplexer die zu untersuchende Fragestellung, desto schwieriger die Generierung adäquater Kontrollbedingungen. Abbildung 56 zeigt an einem einfachen Beispiel die Herausforderung, welche es bei der Auswahl einer passenden Kontrollbedingung zu meistern gilt.⁵⁰² In diesem Beispiel soll für die experimentelle Bedingung *Gesichterverarbeitung (A)* eine geeignete Kontrollbedingung gefunden werden.

⁴⁹⁷ Der konkrete Ablauf der Datenanalyse gestaltet sich etwas komplizierter und ist in *Kapitel 5.4 Statistische Datenauswertung* ausführlich dargelegt.

⁴⁹⁸ vgl. Kapitel 6 Eine fMRT-Studie zur Wirkung von Sonderangebotssignalen bei Kaufentscheidungen; Es geht an dieser Stelle nur um ein theoretisches Beispiel für zwei Bedingungen, die bis auf ein Detail vergleichbar sind.

⁴⁹⁹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 300

⁵⁰⁰ ebenda, S. 303

⁵⁰¹ vgl. Kapitel 5.3.1 Signal und Rauschen

⁵⁰² vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 300 f.

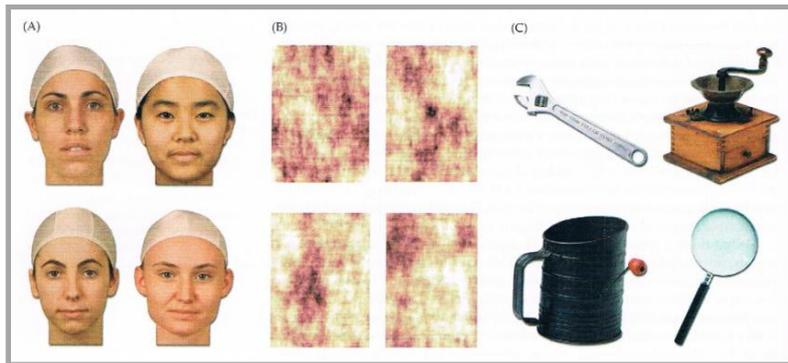


Abbildung 56: Experimentelle Bedingung (Gesichter) und mögliche Kontrollbedingungen⁵⁰³

Theoretisch gibt es verschiedene Möglichkeiten. So könnte man als Kontrollbedingung *gar nichts* im Sinne eines schwarzen Hintergrundes zeigen. Allerdings besteht im Vergleich zwischen den Bedingungen mehr als ein Unterschied. Die beiden Bedingungen unterscheiden sich bezüglich der Helligkeit, der Existenz von Grenzen, der Benennbarkeit und auch in Bezug auf das visuelle Interesse. Eine weitere Option besteht in sog. *scramble faces* (B). Hierzu werden die Original-Bilder der Gesichter in viele kleine Teile zerlegt und anschließend wieder zufällig zusammengefügt. Bei dieser Umsetzung der Kontrollbedingung besteht hinsichtlich der Helligkeit und dem räumlichen Aufbau eine Ähnlichkeit zur experimentellen Bedingung. Allerdings beinhaltet der Prozess der Gesichterverarbeitung mehr als nur die Analyse physikalischer Bildeigenschaften. Die Darstellung verschiedener Objekte (C) kann, sofern sie eine vergleichbare Komplexität wie die Gesichter aufweisen, in diesem Beispiel als eine geeignete Kontrollbedingung aufgefasst werden. Da sich die beiden Bedingungen nur noch dadurch unterscheiden, dass in einem Fall Gesichter präsentiert werden und in dem anderen Fall verschiedene Objekte, kann im Sinne der Subtraktionslogik durch den Vergleich eine Identifikation der Gehirnbereiche erfolgen, die stärker auf Gesichter reagieren.

Eine zentrale Voraussetzung der Subtraktionslogik besteht in der Annahme der sog. *pure insertion*⁵⁰⁴. Wie beschrieben werden im Sinne der Subtraktionslogik zwei Bedingungen miteinander verglichen, die sich nur in einem Detail unterscheiden sollen. Die Aktivierung, die übrig bleibt, wird dann dem einen Detail zugeschrieben. Durch die Anwendung dieser Systematik geht man gleichzeitig davon aus, dass man bereits ablaufende kognitive Prozesse um einen zusätzlichen kognitiven Prozess erweitern kann, ohne dass dieser die anderen beeinflusst. „*This assumption is difficult to prove because one would need an independent measure of the preexisting processes in the absence and presence of the new process.*“⁵⁰⁵ Sollte die Annahme der *pure insertion* allerdings nicht zulässig sein, kann die im Ergebnis berichtete Aktivierung nicht mehr auf den zusätzlichen Prozess allein zurückgeführt werden, sondern steht vielmehr i.V.m. Interaktionseffekten, die durch den zusätzlichen Prozess verursacht werden. In diesem Fall ist eine sinnvolle Interpretation nicht möglich und eine derartige Vorgehensweise nicht zu empfehlen.

⁵⁰³ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 300

⁵⁰⁴ vgl. Aguirre, G. K.; D'Esposito, M. (1999), S. 372

⁵⁰⁵ ebenda, S. 372

Ein genereller Aspekt bezüglich des experimentellen Designs betrifft die Frage, ob es sich um ein *Between-Subject-Design* handelt oder um ein *Within-Subject-Design*. Im erstgenannten Fall stellen die verschiedenen Gruppen die unabhängigen Variablen dar. Man versucht herauszufinden, ob und wenn ja, welche Unterschiede zwischen den Gruppen vorhanden sind. Bei *Within-Subject-Designs* wird innerhalb einer Gruppe auf signifikante Unterschiede bei verschiedenen Bedingungen getestet. „*Designs that have different groups of subjects do different tasks are used less commonly, because differences in the groups' characteristics such as in age, gender, or education, could confound the results. For this reason, most fMRI studies use within subjects manipulations, where each subject participates in all experimental conditions.*“⁵⁰⁶

Der Komplexitätsgrad einer fMRT-Untersuchung lässt sich durch die Anzahl der verwendeten Faktoren ausdrücken. Es geht um *faktorielle Designs*.⁵⁰⁷ Die einfachste Form arbeitet nur mit einem Faktor, der im Laufe der Untersuchung variiert wird. Ab der Verwendung von zweifaktoriellen Designs, die hinsichtlich zweier Faktoren mindestens zwei Ausprägungen aufweisen, wird die Situation komplexer.

Im Rahmen einer fMRT-Untersuchung werden die Probanden mit Stimulusmaterial konfrontiert, das jeweils die unabhängigen Variablen darstellt. In Bezug auf die Darbietung des Stimulusmaterials unterscheidet man generell zwischen *Block-Design* und *Event-related Design*.

Im Zuge des *Block-Designs* erfolgt ein systematischer Wechsel zwischen der experimentellen Bedingung und der Kontrollbedingung. Zuerst werden mehrere Stimuli dargeboten, in denen die experimentelle Bedingung nicht vorhanden ist (OFF-Bedingung), z.B. werden sieben Stimuli nacheinander jeweils für 3s gezeigt, die ein reguläres Kaufangebot widerspiegeln. Diese sieben Stimuli bilden den ersten Off-Block mit einer Dauer von insgesamt 21s. Es gibt eine kurze Pause und anschließend werden sieben weitere Stimuli gezeigt, die Sonderangebote zum Ausdruck bringen. Hierbei handelt es sich um den ersten Block der ON-Bedingung. Zentral für das *Block-Design* ist der Wechsel von länger andauernden Bedingungen. Wie in Abbildung 55⁵⁰⁸ dargestellt ist, kommt es in Folge einer längeren Stimulierung (z.B. durch mehrere Events einer Bedingung) nach einer kurzen Hochphase zur Aufrechterhaltung eines konstanten BOLD-Signals. Dadurch kann ein Vergleich zwischen Situationen stattfinden, die zum einen den interessierenden Prozess auslösen und zum anderen den interessierenden Prozess nicht ansprechen.⁵⁰⁹ Neben der einfachen Version einer fMRT-Untersuchung mit lediglich zwei Bedingungen, ist ebenfalls möglich, mehrere ON-Bedingungen einzusetzen. Es kann dann nicht nur ON vs. OFF getestet werden, sondern auch ON vs. ON. Abbildung 57 zeigt ein Design zur Untersuchung der Fragestellung, ob Musikhören Lernprozesse unterstützt. Alle Versuchspersonen hören 20 Wörter nacheinander, bei den ersten 10 läuft Musik im Hinter-

⁵⁰⁶ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 296

⁵⁰⁷ vgl. Plassmann, H. (2006), S. 121 f.

⁵⁰⁸ vgl. Abbildung 55: Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem länger andauernden Stimulus)

⁵⁰⁹ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 87

grund, bei den zweiten 10 herrscht Stille. Bei der grundlegenden Analyse eines jeden Block-Designs geht es um den Vergleich der abhängigen Variable in jeder Blockbedingungen. Block-Designs sind einfach aufzustellen und direkt analysierbar. Diese Design-Art dominierte die frühen Jahre der fMRT-Untersuchungen.



Abbildung 57: Block-Design⁵¹⁰

Der Grund für die Verwendung von Block-Designs ist in den frühen 90er Jahren zu suchen. Zu diesem Zeitpunkt waren das BOLD-Signal und seine Veränderung in Folge neuronaler Aktivität noch nicht gut verstanden. Man dachte, dass eine längere Stimulierung nötig sei, um eine neuronale Reaktion zu erzeugen, die über das BOLD-Signal erfasst werden konnte. Wegen des im Vergleich zur neuronalen Aktivität langsamen Anstiegs und Abfalls des BOLD-Signals wurde zudem vermutet, dass einzelnen Events nicht in der Lage wären, eine messbare Reaktion zu erzeugen. Verschiedene Erkenntnisse führten in der Mitte der 90er Jahre zur Verwerfung dieser Annahmen und zur Entwicklung von Event-related Designs.⁵¹¹

„Gesichert jedenfalls ist, dass selbst kürzeste Ereignisse mit ausreichend neuronaler Aktivität einhergehen, um eine messbare Veränderung im BOLD-Signal hervorzurufen.“⁵¹² Aufgrund dieser Erkenntnis wurde im Zuge des Event-related Designs die Block-Systematik aufgebrochen. Die unabhängigen Variablen bzw. Bedingungen einer fMRT-Untersuchung werden hier jeweils durch einzelne Stimuli repräsentiert, die abwechselnd dargeboten werden. Jeder Stimulus wird als Event gesehen, für das ein messbares Signal bezogen auf die neuronale Aktivität herausgestellt werden kann. Da nun nicht mehr mit Blöcken gearbeitet werden muss, die immer eine gewisse Anzahl an Stimuli derselben Bedingung beinhalten, besitzt diese Vorgehensweise „... eine höhere zeitliche Auflösung und hat den Vorteil der randomisierten Vorgabe von Stimuli und Bedingungen.“⁵¹³ Eine Schlüsselrolle hinsichtlich der Detektion des BOLD-Signals infolge eines kurzen Events spielt das *Interstimulus-Intervall (ISI)*. Es geht hierbei um die Zeitspanne zwischen zwei aufeinander folgenden Stimuli. Im Rahmen der Stimuluspräsentation werden die einzelnen Events jeweils durch das ISI voneinander getrennt. Nur wenn diese Intervalle zufällig variiert werden, wird „... eine feste Beziehung zwischen Stimulusdarbietung und EPI-Aufnahme verhindert.“⁵¹⁴ Im

⁵¹⁰ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 304

⁵¹¹ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 303; Culham, J. C. (2006), S. 57

⁵¹² Jäncke, L. (2005), S. 90

⁵¹³ Kellermann, T.; Habel, U. (2013), S. 142

⁵¹⁴ Jäncke, L. (2005), S. 92

Kontext des Block-Designs dauert das ISI immer gleich lang. Nach jedem Block gibt es eine Pause mit einer Länge von bspw. 5s. Die Abfolge sieht dann folgendermaßen aus: 1. Block (21s), ISI₁ (5s), 2. Block (21s), ISI₂ (5s), ..., n. Block (21s), ISI_n (5s). Beim Event-related Design hingegen sollen diese konstanten Intervalle gerade vermieden werden. Die zeitliche Struktur kann man sich wie folgt vorstellen: Stimulus A (3s), ISI₁ (3s), Stimulus B (3s), ISI₂ (7s), Stimulus A (3s), ISI₃ (5s), Stimulus B (3s), ISI₄ (4s), ..., n. Block (3s), ISI_n (6s). Das Interstimulus-Intervall (ISI) variiert in diesem Beispiel zufällig zwischen 3-7s. Diese Systematik bezeichnet man als *Jittering*. Durch die Verwendung des Jittering kann das jeweils gemessene Signal zum einen deutlicher hervortreten und zum anderen auch im Rahmen der statistischen Datenanalyse besser einer konkreten Bedingung zugeordnet werden.

Sowohl das Block-Design wie auch das Event-related Design finden im Zuge von fMRT-Untersuchungen Anwendung. Die Wahl des passenden Designs ist immer abhängig von der konkreten Fragestellung, die es zu untersuchen gilt bzw. dem zugrunde liegenden kognitiven Prozess. Beide Designs haben Vor- wie Nachteile, daher muss in jedem konkreten Fall eine Abwägung vorgenommen werden. Das Block-Design ist immer dann zu präferieren, wenn einfache Fragestellungen Gegenstand einer Untersuchung sind. Immer dann, wenn es um die Abbildung längerdauernder, mehr gleichförmiger, nichtzeitkritischer psychischer Prozesse geht und die Reaktion auf *eine* Stimulierung nicht von Interesse ist, ist dieses Design zu empfehlen. Im Vergleich ist das Block-Design einfach in der Handhabung, ungleich robuster und effizienter, indem es eine höhere statistische Power aufweist. *„Nachteilig sind die Möglichkeit der Erwartungs- und Antizipationsbildung, der Habituation von Aktivierungen (...) und der Schwierigkeit der Randomisierung von Stimuli; ferner können Wiederholungseffekte nur bedingt kontrolliert werden, und die relativen Ereignishäufigkeiten der Stimuli können nicht verändert werden.“*⁵¹⁵ *„Although event-related designs have a somewhat lesser statistical power to detect activation than block designs, they offer many valuable advantages.“*⁵¹⁶ Event-related Designs ermöglichen aufgrund ihrer Struktur einen Grad an Flexibilität, den die meisten Block-Designs nicht aufweisen. Sie kommen immer dann zum Zug, wenn eine Randomisierung der Stimuli erforderlich ist und abgrenzbare Einzelereignisse im Fokus stehen. Der inhaltliche Untersuchungsschwerpunkt liegt vor allem auf Versuchsanordnungen, die vom Probanden gesteuert werden und somit im Vorfeld nicht zu kontrollieren sind. Dies ist in allen interaktiven Situationen der Fall, z.B. bei Gedächtnisaufgaben, beim Treffen von Entscheidungen und immer dann, wenn sog. *targets* bzw. Zielkategorien im Mittelpunkt einer Untersuchung stehen.

Lässt man einmal die Design-Auswahl außer Acht, kann resümiert werden, dass die Definition einer je nach Situation geeigneten Kontrollbedingung einen zentralen Faktor hinsichtlich einer fMRT-Untersuchung darstellt. Kontrollbedingung und experimentelle Bedingung sollten in Bezug auf fast alle Details so ähnlich wie möglich sein, hin-

⁵¹⁵ Kellermann, T.; Habel, U. (2013), S. 142 f.

⁵¹⁶ Culham, J. C. (2006), S. 57

sichtlich des im Fokus der Betrachtung stehenden Details allerdings so unterschiedlich wie möglich.

5.2.2 Datenakquisition und Daten

Nachdem über die Auseinandersetzung mit dem experimentellen Design die generelle Erhebungssystematik und die zugrunde liegende Subtraktionslogik erläutert wurden, richtet sich der Fokus nun auf die Datenakquisition bzw. die tatsächlichen Messung.

Im Rahmen einer fMRT-Untersuchung werden sowohl anatomische wie auch funktionelle Messungen in Bezug auf einen Probanden durchgeführt. Wie bereits in Kapitel 4.2.1⁵¹⁷ beschrieben, basiert die MRT auf *T₁-gewichteten Messsequenzen*. Diese, relativ gesehen, langsamen Sequenzen sind besonders gut für die Abbildung T₁-bezogener Eigenschaften geeignet. Da die verschiedenen Gewebetypen vor allem über ihre T₁-Zeiten unterschieden werden können, erfüllt eine derartige Messsequenz das Ziel einer hochauflösenden, kontrastreichen, anatomischen Messung des Gehirns. Im Gegensatz dazu verfolgt die fMRT eine andere Zielsetzung. Es geht hierbei um die Abbildung neuronaler Aktivität. Von generellem Interesse ist die Differenzierung zwischen Bereichen, die eine höhere Sauerstoffsättigung des Blutes aufweisen und solchen, die eine geringere Oxygenierung zeigen. Im Zuge der Datenakquisition werden *T₂*-gewichtete Sequenzen* verwendet.

Theoretisch existieren verschiedene Messsequenzen. Die erste erfolgreiche funktionelle Messung⁵¹⁸ wurde unter Verwendung einer *Fast low angle shot (FLASH)-Sequenz*⁵¹⁹ erreicht. Diese Sequenz erfasst einzelne Schichten, indem diese mehrmals über einen Hochfrequenzimpuls (HF-Puls) angeregt werden. Teilt man eine Schicht in Zeilen und Spalten, so muss jede Zeile einer Schicht durch einen separaten HF-Puls angeregt werden. Die Aufnahmezeit für eine Schicht dauert daher ca. 1,5-2,5s. Eine weitere Möglichkeit stellt eine *Spin-Echo-Sequenz*⁵²⁰ dar, deren Vorzug im Vergleich zu anderen Sequenzen in einer hohen Lokalisationsgenauigkeit besteht. Dieser Vorteil wird allerdings durch einen gravierenden Nachteil aufgehoben. Die zur Unterscheidung zwischen aktivierten und nicht-aktivierten Bereichen verwendeten Signale weisen eine zu geringe Differenz auf. Als dominante T₂*-bezogene Messsequenz hat sich mittlerweile die *Echo Planar Imaging (EPI)-Sequenz*⁵²¹ herauskristallisiert. Ihre, für die Erfassung neuronaler Aktivität zentrale, Leistungsfähigkeit liegt in der relativ schnellen bzw. kurzen Akquisitionszeit. Im Endeffekt ist es aufgrund der EPI-Sequenz möglich, alle Schichten bzw. das gesamte Gehirn in 2-3s zu erfassen. Dies gelingt, da in Bezug auf die Messung einer Schicht lediglich eine einzige Anregung nötig ist. Neben der konkreten Sequenz beeinflussen

⁵¹⁷ Kapitel 4.2.1 Grundlegende Anmerkungen

⁵¹⁸ vgl. Frahm, J.; Bruhn, H.; Merboldt, K.-D.; Hancicke, W. (1992)

⁵¹⁹ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 84

⁵²⁰ ebenda, S. 84 f.

⁵²¹ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 85; Klose, U. et al. (1999), S. 27; Bandettini, P. A. et al. (1992), S. 390 f.; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 147 f.; Albrecht, J. (2008), S. 24 f.; Cohen, M. S.; Schmitt, F. (2012), S. 655 ff.

auch die konkreten Sequenzparameter⁵²² die erfassbare Signalqualität. Eine Repetitionszeit (TR) zwischen 1000-3000ms, eine Echozeit (TE) zwischen 30-140ms und eine möglichst niedrige Schichtdicke⁵²³ haben sich als adäquate Kennzahlen in Hinblick auf die EPI-Sequenz erwiesen.⁵²⁴

Allgemein gesprochen wird das Gehirn im Zuge einer jeden fMRT-Messung über die Definition der Voxelgröße⁵²⁵ in mehrere Schichten eingeteilt. Die einzelnen Schichten werden i.d.R. nacheinander angeregt. Aufgrund der Systematik der Messung ist eine parallele Aufnahmen verschiedener Schichten nicht möglich. Anschließend werden die jeweiligen Resonanzsignale ausgelesen. Man spricht in diesem Sinne auch von einer *Multi-Schicht-Messung*. Die beschriebene EPI-Sequenz repräsentiert im Vergleich zu T₁-gewichteten Sequenzen schnellere Sequenzen, die besonders sensibel für Magnetfeldinhomogenitäten sind. Diese Inhomogenitäten sind, wie in Kapitel 5.1.2⁵²⁶ ausführlich erläutert wurde, mit neuronaler Aktivität verbunden. Im Ergebnis der fMRT kann man Bereiche detektieren, in denen neuronale Aktivität stattfindet bzw. stattgefunden hat.

In Bezug auf die Multi-Schicht-Messung ist noch anzumerken, dass es nicht ausreicht alle Schichten einmal zu erfassen. „*Da die Signalveränderungen relativ klein sind, werden üblicherweise alle Schichten wiederholt aufgenommen.*“⁵²⁷ In Kapitel 4.2.3⁵²⁸ wurde bereits eine Verknüpfung zum messtheoretischen Ansatz der Klassischen Testtheorie (KT) hergestellt. Wie im Rahmen der MRT ist auch bei der fMRT geboten, das Signal-zu-Rausch-Verhältnis zu erhöhen. Kombiniert man diesen Sachverhalt mit den Ausführungen zum experimentellen Design⁵²⁹, so resultiert daraus, dass eine fMRT-Untersuchung insgesamt eine relativ lange Erhebungszeit aufweist und ein Proband innerhalb eines fMRT-Experiments mit vielen Stimuli konfrontiert wird bzw. viele Entscheidungen treffen muss. Erhebungszeiten von 30-60 Minuten sind je nach Komplexität der Fragestellung und des Designs nicht ungewöhnlich.

Es wurde bereits dargestellt, dass im Zuge einer fMRT-Untersuchung sowohl eine strukturelle (MRT) wie auch ein funktionelle Messung (fMRT) durchgeführt wird. In beiden Fällen wird dasselbe Messprinzip angesetzt. Es werden jedes Mal Wasserstoffatomkerne angeregt und deren Resonanzsignale aufgefangen. Der Unterschied zwischen beiden Messungen besteht in der konkreten Messequenz und den Eigenschaften, die durch die jeweilige Messequenz in den Vordergrund gerückt werden. Im Ergebnis einer fMRT-Untersuchung liegen für eine Person aufgrund der beschriebenen unterschiedlichen Kontrastschwerpunkte zwei bildbezogene Datensätze (Vo-

⁵²² vgl. Kapitel 4.2.1 Grundlegende Anmerkungen

⁵²³ Bei einer Veränderung der Schichtdicke von 8mm auf 4mm, ist fast eine Verdopplung der Signalintensität beobachtbar.

⁵²⁴ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 86

⁵²⁵ vgl. 4.2.1 Grundlegende Anmerkungen

⁵²⁶ Kapitel 5.1.2 Signalentstehung

⁵²⁷ Weishaupt, D.; Köchli, V. D.; Marincek, B. (2009), S. 82

⁵²⁸ Kapitel 4.2.3 Bildqualität

⁵²⁹ vgl. Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

lumenaufnahmen) vor. Diese weisen von ihrer Auflösung her Unterschiede auf.⁵³⁰ Die anatomischen Bilddaten (MRT) sind räumlich hochauflösend. Die aktivitätsbezogenen Bilddaten (fMRT) weisen zwar auch eine gewisse räumliche Auflösung auf, doch im Vergleich ist diese wesentlich niedriger. Dies ist anschaulich in Abbildung 58 dargestellt, in der links das funktionelle Bild und rechts das anatomische Bild zu sehen sind. „*Unfortunately, functional data typically are of low resolution and of little anatomical contrast, ...*“⁵³¹. Im Endeffekt werden die funktionellen Daten daher mit den anatomischen Daten verbunden. Diese Verbindung wird als *Koregistrierung*⁵³² bezeichnet. Auf der einen Seite kann eine erfasste neuronale Aktivität durch das Koregistrieren anatomisch genauer verortet werden. Auf der anderen Seite kann eine für die Gruppenanalyse erforderliche Normalisierung⁵³³ der funktionellen Daten mit Hilfe der Information aus den anatomischen Daten optimiert werden. „*A typical functional image appears as a relatively undifferentiated and blurry blob, with only the ventricles and the barest outlines of gray matter distinguishable (...). High resolution structural images appear remarkably detailed by comparison, with clear outlines of the different sulci and gyri and distinct boundaries between gray and white matter (...).*“⁵³⁴

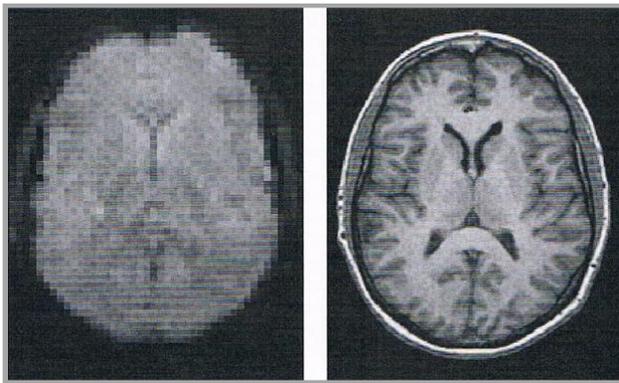


Abbildung 58: Anatomisches vs. funktionelles Bild⁵³⁵

Um diese beiden Bilder zu verbinden, gibt es verschiedene Optionen. „*Eine Möglichkeit dazu besteht darin, die zu koregistrierenden Bilder nach grauer und weißer Substanz und Liquor zu segmentieren. Die durch diese Methode des Segmentierens erzeugten Karten eines Gewebetyps können dann durch Translation und Rotation aufeinander angepasst werden.*“⁵³⁶ Bei der Anpassung werden die zugrunde liegenden Bilder nicht in ihrer Form verändert. Lediglich ihre Ausrichtung wird aufeinander abgestimmt. Ziel ist die optimale räumliche Übereinstimmung der beiden unterschiedlichen, aber dennoch zusammengehörigen, Bilddatensätze.

⁵³⁰ vgl. Vul, E.; Harris, C.; Winkielman, P.; Pashler, H. (2009), S. 276

⁵³¹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 280

⁵³² vgl. Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 155 f.; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 280 f.

⁵³³ vgl. Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁵³⁴ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 280

⁵³⁵ ebenda, S. 281

⁵³⁶ Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 155

Im Zusammenhang mit fMRT-Daten wird oft von einem *vierdimensionalen Datensatz*⁵³⁷ gesprochen. Es liegen drei räumliche Dimensionen vor und eine zusätzliche Dimension mit einem Zeitbezug. Betrachtet man die Messung des gesamten Gehirns als eine Messung, so stellen die Daten „*Zeitreihen von dreidimensionalen funktionellen Volumina*“⁵³⁸ dar. Diese Sichtweise hilft beim besseren Verständnis unterschiedlicher räumlicher Korrekturen bei der noch zu besprechenden Vorverarbeitung der Daten⁵³⁹. Wählt man die Perspektive eines Voxels, so liegt hinsichtlich jeden Voxels eine separate Zeitreihe vor. Diese Betrachtungsweise ist ihrerseits sehr hilfreich, um die statistische Datenanalyse besser nachzuvollziehen, da hier mit einer voxelweisen Statistik⁵⁴⁰ gearbeitet wird. In Abbildung 59 ist beispielhaft eine voxelbezogene Zeitreihe dargestellt. Zu erkennen ist, dass in Bezug auf eine Schicht bzw. einen Voxel mehrere Bilddateien existieren, aus denen die Signalintensitäten zu unterschiedlichen Zeitpunkten über eine *Grauwertkodierung*⁵⁴¹ herausgefiltert werden können. Letztlich entsteht auf diese Weise eine voxelbezogene Zeitreihe.

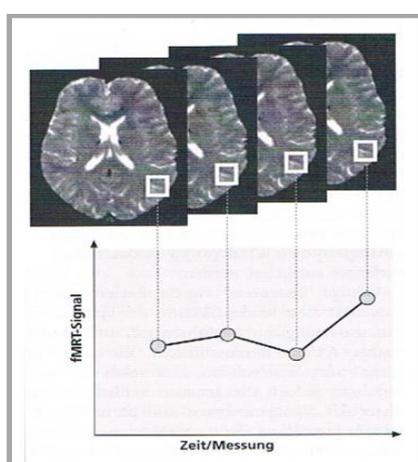


Abbildung 59: fMRT-Daten⁵⁴²

Für jede Person liegen nach der Messung und der Koregistrierung individuelle fMRT-Daten vor, d.h. es liegen personenbezogene dreidimensionale Abbildungen des Gehirns mit Signalunterschieden in Bezug auf die T_2^* -Zeit vor. Diese Signalunterschiede sind über die angesprochene Grauwertkodierung in die Bilder integriert. Die Grauwertkodierung ist gut im linken Bereich von Abbildung 58 zu erkennen, in der die Signalintensitäten aller Voxel dieser Schicht durch unterschiedliche Grautöne repräsentiert werden. Für alle Schichten liegen mehrere Messungen in Form derartiger Bilddateien vor. In diesen Bildern beschreiben unterschiedliche Grauwerte unterschiedliche Signalintensitäten.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die fMRT-Messung anatomische und funktionelle Bilddateien über die Verwendung entsprechender Messesequenzen

⁵³⁷ vgl. Goebel, R.; Kriegeskorte N. (2005b), S. 32 f.; Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 152

⁵³⁸ Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 32

⁵³⁹ vgl. Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁵⁴⁰ vgl. Kapitel 5.4 Statistische Datenauswertung

⁵⁴¹ vgl. Kapitel 4.2.2 Generierung der räumlichen Information

⁵⁴² Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 33

erzeugt. Im Sinne einer Multi-Schicht-Messung werden alle Schichten mehrmals erfasst. In der Folge liegen viele anatomische und funktionelle Bilddateien als Rohdaten vor. Diese Bilddateien werden im Zuge der Koregistrierung kombiniert, so dass die funktionellen Daten letztlich anatomisch hochaufgelöst abgebildet werden können. Für jede Person stehen im Ergebnis funktionelle Datenreihen zur Verfügung, die für jeden definierten Voxel erfasst werden. Es liegen folglich voxelbezogene bzw. voxelweise Daten vor. Diese Datenreihen in Bezug zur Signalintensität können aus den Bilddateien extrahiert werden. Je nach Einstellung kann ein Gehirn in bis zu 100.000 Voxel eingeteilt werden. Damit die Rohdaten sinnvoll statistisch analysiert werden können, müssen sie einer Vorverarbeitung unterzogen werden. Dieser essentielle Schritt wird in Kapitel 5.3.2⁵⁴³ genauer thematisiert.

5.2.3 Stichprobengröße und Einsatz erfahrener Probanden

Bevor speziellere Aspekte hinsichtlich der fMRT-Messung in den Fokus gerückt werden, sollen abschließend noch zwei generelle Punkte aufgegriffen werden. Zum einen geht es um die Arbeit mit erfahrenen Probanden und zum anderen um die Frage nach der adäquaten Stichprobengröße.

fMRT-Untersuchungen finden in speziellen Laboren statt, die häufig in eine Uniklinik eingebunden sind. Auf diese Weise können die relativ teuren Tomographen sowohl mit einem klinischen wie auch mit einem wissenschaftlichen Hintergrund eingesetzt werden. Im wissenschaftlichen Bereich bestehen meist uniklinikinterne Probandendatenbanken mit mehreren hundert freiwillig registrierten Probanden. Ist eine Person Teil einer Datenbank bedeutet dies generell, dass sie mindestens einmal an einer fMRT-Studie dieses Labors teilgenommen hat. Die überwiegende Zahl der Probanden von fMRT-Studien besitzt folglich eine gewisse Erfahrung in Bezug auf die Erhebungsmethode. Dieser Umstand stellt zwar keine notwendige Voraussetzung dar, kann sich allerdings aus verschiedenen Gründen durchaus als Vorteil erweisen. Bei Personen, die sich zum wiederholten Mal zu fMRT-Experimenten bereit erklären, gibt es weniger Bedenken hinsichtlich der gesundheitlichen Verträglichkeit. Sie sind zudem mit der generellen Erhebungssituation vertraut und fühlen sich daher nicht unwohl bzw. sind nicht nervös. Dies spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass sie im Vergleich zu Probanden, die zum ersten Mal in einem MR-Scanner liegen und von der ungewohnten Situation stärker beeinflusst werden, weniger bis keine Bewegungsartefakte im Verlauf der Untersuchung aufweisen. Dies wirkt sich umso negativer aus, je länger eine fMRT-Untersuchung dauert. Insgesamt sind erfahrene Probanden aufgrund ihrer Vertrautheit mit der Erhebungssituation belastbarer und tragen somit auch zur Datenqualität bei. Wie noch in Kapitel 5.3⁵⁴⁴ zu erläutern ist, stellen gerade Kopfbewegungen eine der relevantesten Störgrößen dar, die es auf verschiedene Arten zu minimieren bzw. korrigieren gilt. Eine präventive Maßnahme besteht im Einsatz *erfahrener Probanden*.

⁵⁴³ Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁵⁴⁴ Kapitel 5.3 Spezielles zur fMRT-Messung

Ein wichtiger bzw. häufig kritizierter Aspekt im Zusammenhang mit fMRT-Studien ist die Frage nach dem *Stichprobenumfang*.⁵⁴⁵ Generell hängt die Stichprobengröße von der Fragestellung und den Zielvariablen ab.⁵⁴⁶ Hierbei ist die Kenntnis über die Grundgesamtheit der zentrale Faktor. Kritisch in Bezug auf Untersuchungen innerhalb der Marktforschung ist, dass im Zuge einer Befragung meistens mehrere Sachverhalte abgefragt werden. Somit ist es schwierig die eine themenbezogene Grundgesamtheit auszumachen. fMRT-Untersuchungen beziehen sich im Gegensatz dazu immer nur auf einen inhaltlichen Aspekt und untersuchen generelle Effekte. Ein weiterer positiver Effekt in Bezug auf die Probandendatenbanken der einzelnen Institute besteht darin, dass man die Ausprägungen der Probanden hinsichtlich verschiedener weiterer Variablen kennt. Es ist somit relativ schnell und einfach möglich Probanden zu selektieren, die aufgrund verschiedener Kriterien für eine konkrete fMRT-Untersuchung in Frage kommen. Zudem handelt es sich bei der fMRT nicht um eine gewöhnliche Erhebungsmethode mit gewöhnlichen Ergebnisdaten, sondern um hierarchisch strukturierte Daten, weswegen die speziellen Gegebenheiten bei der Beantwortung der Frage nach der adäquaten Stichprobengröße berücksichtigt werden müssen. Je nach Perspektive stellt die fMRT-Datenanalyse eine *Mehrebenenanalyse* bzw. eine *Multilevel-Analyse*⁵⁴⁷ dar. Hinsichtlich der Analyse liegen zwei Ebenen bzw. Level vor. Die unterste Ebene betrifft die Daten der einzelnen Personen. Die Daten bestehen in Form voxelbezogener Zeitreihen, die Analyse bezieht sich auf eine voxelweise Statistik.⁵⁴⁸ Man spricht hierbei auch von einer 1st-Level-Analyse. Die zweite Ebene umfasst alle Personen und führt somit die Daten bzw. die Ergebnisse der ersten Ebene auf der Gruppenebene zusammen. Die Gruppenanalyse wird daher auch als 2nd-Level-Analyse bezeichnet. „*Although any rule of thumb should be taken with a grain of sand, a sample size less than 20 (i.e., a level of analysis represented by less than 20 units) usually will give only quite restricted information about this population (i.e., this level of analysis), and sample sizes less than 10 should be regarded with suspicion.*“⁵⁴⁹ Diese Empfehlung hinsichtlich der Stichprobengrößen bezieht sich nicht konkret auf fMRT-Untersuchungen, sondern generell auf die klassische wirtschaftswissenschaftliche bzw. sozialwissenschaftliche Forschung. Daher muss die fMRT-Datenstruktur genauer betrachtet werden. Im bereits beschriebenen Sinne kann generell zwischen einem internen und einem externen Stichprobenumfang unterschieden werden. Der *interne Stichprobenumfang*⁵⁵⁰ bezieht sich auf die Voxel-Ebene innerhalb eines Probanden (within-subject). Da jede Person mit bis zu 100.000 Voxeln und den jeweiligen Zeitreihen in die Betrachtung einfließt, ist der interne Stichprobenumfang im Vergleich zu klassischen Marktforschungsstudien sehr hoch. Beim *externen Stichprobenumfang* verlässt man die Perspektive des einzelnen Probanden und fokussiert die Ebene der Testpersonen (between-subject). In Bezug

⁵⁴⁵ vgl. Plassmann, H. (2006), S. 122 f.

⁵⁴⁶ vgl. Hartung, J.; Elpelt, B.; Klösener, K.-H. (2009), S. 316 f.

⁵⁴⁷ vgl. Hummell, H. J. (1972); Langer, W. (2009); Snijders, T. A. B. (2003); Goldstein, H. (2011); Ditton, H. (1998)

⁵⁴⁸ vgl. Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten; Kapitel 5.4 Statistische Datenauswertung

⁵⁴⁹ Snijders, T. A. B. (2003), S. 676

⁵⁵⁰ vgl. Plassmann, H. (2006), S. 122

auf die obige Definition wirkt der externe Stichprobenumfang von fMRT-Untersuchungen mit 10-20 Probanden pro Untersuchung eher gering. Allerdings konnte herausgestellt werden, dass fMRT-Untersuchungen mit 10-20 Probanden zu ausreichend reliablen, in Sinne von reproduzierbaren, Ergebnissen führen.⁵⁵¹ Generell gilt: Je mehr Probanden, desto besser. Aufgrund der besonderen Rahmenbedingungen bei fMRT-Untersuchungen stellen Experimente mit einem Umfang von 10-20 Probanden den Standard dar.

5.3 Spezielles zur fMRT-Messung

In Kapitel 5.1⁵⁵² wurde bereits erläutert, dass neuronale Aktivität mit Hilfe der fMRT über den BOLD-Kontrast abgebildet wird. Hierbei wurde sowohl auf die biologischen als auch auf die physikalischen Zusammenhänge i.V.m. der MR-Signalentstehung eingegangen und abschließend der typische Signalverlauf infolge einer neuronalen Stimulierung dargestellt. Nachdem im Rahmen von Kapitel 5.2⁵⁵³ verschiedene grundlegende Sachverhalte in Bezug auf die Erhebungssystematik und die Messung erläutert wurden, ist es an dieser Stelle wichtig, ein Verständnis dafür zu schaffen, wie die letztlich verwendeten Daten in Hinblick auf die fMRT aussehen, was sie aussagen und wie sie über die verschiedenen Vorverarbeitungsschritte entstehen.

5.3.1 Signal und Rauschen

Wie bereits im Zuge von Kapitel 4.2.3⁵⁵⁴ thematisiert wurde, existiert bei einer MRT-Messung neben dem eigentlichen Signal immer auch zusätzliches Rauschen bzw. Störgrößen. Für das Verständnis des MR-Signals im Zuge der fMRT ist diese Unterscheidung ebenfalls sehr relevant.

Um den Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen Signal und dem Rauschen anhand eines plausiblen Beispiels zu verdeutlichen, bietet sich die Darstellung des sog. *Cocktailparty-Effektes*⁵⁵⁵ an. Dieser Effekt bezieht sich generell auf selektives Hören. Hierfür kann man sich eine Party vorstellen, auf der sich mehrere Gäste miteinander unterhalten. Führt man selber auch ein Gespräch, so findet das eigene Gespräch quasi in mitten der anderen Gespräche statt. Wie gut man dem, was der Gesprächspartner erzählt, folgen kann, hängt jedoch nicht nur von der Lautstärke der Stimme des Gegenübers ab. Die Lautstärke und die Eigenarten der anderen Gespräche können ebenfalls einen entscheidenden Einfluss nehmen. In diesem Sinne können die Worte des Gesprächspartners als Signal und alle anderen Geräusche, die das aufmerksame Folgen des Gesprächs erschweren, als Rauschen bzw. Störgrößen verstanden werden. *„Recall that in an fMRI experiment, only one physical quantity is measured: the magnitude of the current in a detector coil. Thus far we have referred*

⁵⁵¹ vgl. Desmond, J. E.; Glover, G. H. (2002); Andreasen, N. C.; Arndt, S.; Cizadlo, T.; O'Leary, D. S.; Watkins, G. L.; Ponto, L. L. B.; Hichwa, R. D. (1996)

⁵⁵² Kapitel 5.1 Das MR-Signal im Rahmen der fMRT

⁵⁵³ Kapitel 5.2 Grundlegendes zur fMRT-Messung

⁵⁵⁴ Kapitel 4.2.3 Bildqualität

⁵⁵⁵ vgl. Cherry, E. C. (1953)

to this quantity as the MR signal.“⁵⁵⁶ Im MR-Signal kommen sowohl das interessierende Signal wie auch das Rauschen zum Ausdruck. Mit *Signal* sind hierbei bedeutende Veränderungen des MR-Signals gemeint, die auf die hämodynamische Reaktion infolge neuronaler Aktivität zurückzuführen sind. Das ist der Sachverhalt, den es im Zuge der fMRT letztlich adäquat abzubilden gilt. *Rauschen* beschreibt im Gegensatz dazu Veränderungen im gemessenen MR-Signal, die auf anderen Ursachen beruhen. Da das Rauschen das gemessene MR-Signal tendenziell in derselben Weise beeinflussen kann wie das eigentliche Signal, geht es genau wie im Rahmen der MRT darum, ein gutes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) zu erreichen.

Wie bereits erwähnt fällt bei der fMRT all das unter den Begriff des Rauschens, was eine Veränderung in der MR-Signalintensität verursacht, aber nicht als Folge der hämodynamischen Reaktion angesehen wird. Grob gesprochen unterscheidet man fünf Hauptquellen des Rauschens.⁵⁵⁷ Im Rahmen einer jeden MR-Messung liegt sog. *Wärmerauschen* vor. Diese Rauschart wird sowohl durch wärmebedingte Elektronenbewegungen innerhalb eines Probanden wie auch i.V.m. der Scanner-Hardware verursacht. Je höher die Temperatur ist, die im Körper oder an der Scanner-Hardware entsteht, desto stärker fällt das Rauschen ins Gewicht. Eine zweite Rauschquelle besteht in Form von *Systemrauschen*. Die Veränderung des MR-Signals wird dadurch verursacht, dass der Messvorgang nicht perfekt ist. In Bezug auf das externe Magnetfeld kann bspw. festgehalten werden, dass es, entgegen der Theorie, nicht an allen Stellen homogen ist. Vielmehr ist dies an *fast allen* Stellen der Fall. Es gibt aber immer ein paar kleine Bereiche, die eine leichte Inhomogenität aufweisen. Auch instabile bzw. nicht 100% stabile Gradienten können Verzerrungen mit sich bringen. Eine sehr relevante Form des Systemrauschens stellt der sog. *Scanner drift*⁵⁵⁸ dar. Es ist möglich, dass auch durch die kleinen Abweichungen (drifts) im imperfekten externen Magnetfeld über die Zeit systematische Veränderungen im MR-Signal hervorgerufen werden. Wie Abbildung 60 zeigt, ist in der Folge bspw. ein im Zeitverlauf linearer Signalabfall erkennbar.

⁵⁵⁶ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 245

⁵⁵⁷ vgl. ebenda, S. 255 ff.

⁵⁵⁸ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 258; Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 161

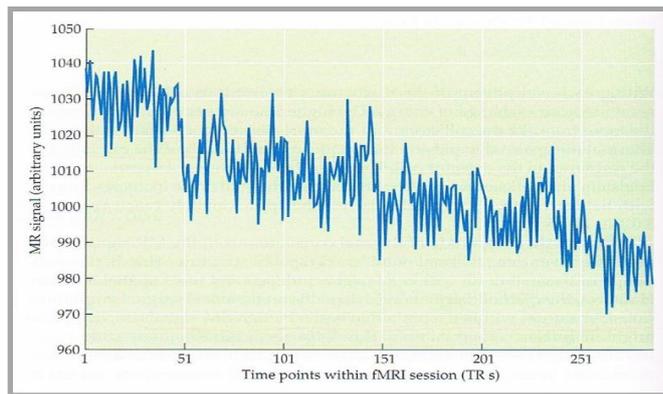


Abbildung 60: Scanner drift⁵⁵⁹

Im Gegensatz zu unbelebten Gegenständen laufen im Gehirn, als Messobjekt, neben der konkret interessierenden Gehirnaktivität in Folge einer Stimulierung parallel bzw. ständig noch weitere *physiologische Prozesse* ab, die ebenfalls in der Lage sind, das MR-Signal zu verändern. Hierzu zählen bspw. eine verstärkte Atmung, ein erhöhter Herzschlag, aber auch Schlucken in Folge von Nervosität. Die stärkste Rauschquelle innerhalb der fMRT stellen allerdings *Kopfbewegungen* dar.⁵⁶⁰ Für die Reduzierung der Kopfbewegung werden verschiedene Maßnahmen vor der Messung ergriffen und im Anschluss an die Erhebung erfolgt im Sinne einer Bereinigung explizit eine Bewegungskorrektur. Die besondere Bedeutung des physiologischen bzw. bewegungsbezogenen Rauschens besteht darin, dass diese Verzerrungen meistens ereigniskorreliert auftreten. Ein Proband könnte z.B. jedes Mal seinen Kopf leicht nach links bewegen bzw. deutlich tiefer Luft holen, wenn ein angsterregendes Gesicht präsentiert wird. Möchte man die neuronalen Aktivierungen in Bezug auf die Verarbeitung angsterregender Gesichter untersuchen, ist die Rauschquelle in einem derartigen Fall schwer identifizierbar, da sie im Einklang mit der Stimulierung erfolgt. Eine weitere Rauschquelle stellen *neuronale Veränderungen* dar, die *unabhängig von der zu untersuchenden Aufgabe ablaufen*. Beispiele hierfür sind Augenbewegungen, aber auch Gedanken an aufgabenunabhängige Dinge. Als letztes sind noch Veränderungen des MR-Signals zu nennen, die dadurch entstehen, dass unterschiedliche Probanden *unterschiedliche Lösungswege und Reaktionsmuster* wählen bzw. zeigen können. Eine Person könnte 250ms für eine Reaktion benötigen, eine andere 2,5s. Je nach Aufgabenstellung können sich auch die Lösungsstrategien der Probanden für dieselbe Aufgabe unterscheiden.

Rauschen das zufällig auftritt, stellt kein Problem dar. Immer dann wenn systematische Verzerrungen vorliegen, kann dies negative Konsequenzen für das Messergebnis bedeuten. Ist eine Verzerrung systematisch, aber nicht ereigniskorreliert (z.B. Scanner drift), so kann sie im Rahmen der Datenanalyse über die Parameterschätzung berücksichtigt werden. Bei ereigniskorrelierten Verzerrungen ist eine Korrektur schwer bzw. teilweise unmöglich, da man sie nicht bzw. nur schwer erkennen kann.

⁵⁵⁹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 258

⁵⁶⁰ vgl. Mathiak, K.; Goebel, R.; Weiskopf, N. (2013), S. 112

Da die Relevanz und Auswirkung von Bewegungsartefakten bekannt sind, erfolgt im Zuge der Vorverarbeitung explizit eine Bewegungskorrektur⁵⁶¹.

Ein hohes Signal-zu-Rausch-Verhältnis (SNR) ist in Bezug zur MRT⁵⁶² nicht ausreichend, um eine gute Bildqualität zu erzeugen. Entscheidend ist zusätzlich, dass ein hohes *Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR)* besteht. Dieses Verhältnis ist insofern relevant, als dass es im Rahmen der MRT darum geht, gut zwischen unterschiedlichen Gewebetypen zu differenzieren. Bei der fMRT ist die Zielsetzung eine andere, daher spielt das angesprochene Kontrast-zu-Rausch-Verhältnis (CNR) hier keine Rolle. In Hinblick auf die fMRT werden die einzelnen Voxel separat betrachtet und in diesem Sinne voxelweise daraufhin untersucht, ob signifikante Signalunterschiede beim Vergleich zweier Bedingungen innerhalb des betrachteten Voxels vorliegen. Die relevante Größe hinsichtlich einer gelungenen fMRT-Messung stellt somit das *funktionelle Signal-zu-Rausch-Verhältnis (functional SNR)* dar. „*The concept of functional SNR is closely related to that of effect size in statistics, which refers to the difference between two conditions in units of standard deviation.*“⁵⁶³ Die Situation bezüglich des BOLD-Signals kann folgendermaßen beschrieben werden: „*In fMRI experiments, small but meaningful changes in brain activity lie buried within highly variable measurements.*“⁵⁶⁴ Neben der Tatsache geringer Signalveränderungen konnte zudem festgestellt werden, dass sich die messbare Signalintensität in Abhängigkeit der Gehirnregion unterscheidet: „*... task-evoked fMRI signal changes are largest in primary motor or sensory areas, and generally decrease in amplitude in regions associated with higher cognitive function.*“⁵⁶⁵ Wie Abbildung 61 zeigt, liegt des Weiteren beim Signalvergleich zweier Bedingungen (z.B. Gesichtswahrnehmung vs. Objektwahrnehmung) ein viel kleinerer Unterschied vor, als die ohnehin schon kleine Signalveränderung bei den einzelnen Bedingungen (roter bzw. blauer Verlauf) verglichen mit dem Grundniveau.

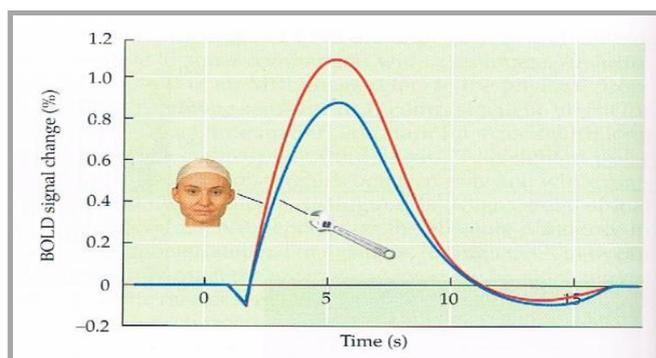


Abbildung 61: Veränderung des BOLD-Signals für Gesichtswahrnehmung und Objektwahrnehmung im fusiformen Gyrus⁵⁶⁶

⁵⁶¹ vgl. Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁵⁶² vgl. Kapitel 4.2.3 Bildqualität

⁵⁶³ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 248

⁵⁶⁴ ebenda, S. 243

⁵⁶⁵ ebenda, S. 248

⁵⁶⁶ ebenda, S. 250

Generell gilt, dass die Signalveränderungen keine Null-Eins-Antwort darstellen. Es geht nicht um die Frage ob eine Veränderung vorliegt oder nicht, sondern um die Frage des Ausmaßes der Veränderung. Betrachtet man beide Bedingungen in Abbildung 61 separat, so sind Signalveränderungen von 1,1% (Gesichtswahrnehmung) und 0,8% (Objektwahrnehmung) zu verzeichnen. „*Thus, the difference in signal between the conditions would be 0.3%. The more similar the conditions are, the smaller the functional SNR for detecting a difference between them.*“⁵⁶⁷ Um das i.d.R. geringe funktionelle SNR zu verbessern, bestehen, wie auch bei der MRT, zwei grundlegende Möglichkeiten. Entweder konzentriert man sich auf das Signal. In diesem Fall kann man zur Verstärkung des Signals die Magnetfeldstärke erhöhen oder mehrere Messungen durchführen. Eine andere Strategie besteht darin, das Rauschen zu verringern, indem man robuste experimentelle Designs aufstellt und die Daten adäquat vorverarbeitet.

Da Institute häufig mit einem konkreten Scanner ausgestattet sind (in einigen Fällen existieren auch zwei Scanner), kann man im Zuge einer fMRT-Untersuchung nicht viel an der Magnetfeldstärke verändern ohne größere Kosten auf sich zu nehmen. Zudem ist die beim Menschen einsetzbare Magnetfeldstärke begrenzt. Aus diesem Grund wird durch häufige Messwiederholung versucht, das Signal zu verbessern. Man ist folglich an längere Erhebungszeiten gebunden.

Im Rahmen von Kapitel 5.2.1⁵⁶⁸ wurde bereits ausdrücklich auf die Bedeutung eines gut durchdachten Designs hingewiesen. Kapitel 5.3.2⁵⁶⁹ setzt sich nachfolgend mit den einzelnen Vorverarbeitungsschritten auseinander. „*Preprocessing has two principle goals: to remove uninteresting variability from the data and to prepare the data for statistical analysis.*“⁵⁷⁰ Aufgrund der zwei fundamentalen Probleme der fMRT-Datenanalyse ist eine Vorverarbeitung der Rohdaten unabdingbar. Generell gilt: „... *the measured BOLD signal change is very small compared with the total intensity of the MR-Signal.*“⁵⁷¹ In Bezug auf die Analyse ist zudem anzumerken, dass „... *the task-related change in the BOLD signal is very small compared with other sources of spatial and temporal variability across and within images.*“⁵⁷² Vor allem durch die Vorverarbeitung der Rohdaten ist überhaupt möglich, die fMRT-Daten trotz verschiedener erschwerender Umstände statistisch auszuwerten. Im Anschluss an die Vorverarbeitung liegen für jeden gemessenen Voxel so gut wie möglich bereinigte Zeitreihen in Bezug auf das BOLD-Signal vor. Abbildung 62 zeigt grafisch eine derartige Zeitreihe in Form der Veränderung des BOLD-Signals über die Zeit. Diese Zeitreihe bezieht sich auf eine Untersuchung, in der es zwei Bedingungen gab. Bedingung A stellt eine Ruhephase dar. Im Rahmen von Bedingung B wurde darum gebeten, beide Fäuste zu ballen. Der untere Pfeil in Abbildung 62 markiert einen Zeitpunkt (Zeitpunkt 45) an dem Bedingung A vorlag. Im Vergleich dazu repräsentiert der obere Pfeil einen späteren Zeitpunkt (Zeitpunkt 50), an dem beide Fäuste geballt wurden.

⁵⁶⁷ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 250

⁵⁶⁸ Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

⁵⁶⁹ Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁵⁷⁰ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 267

⁵⁷¹ ebenda, S. 243

⁵⁷² ebenda, S. 243

Die abgebildete Zeitreihe bezieht sich auf einen Voxel im primären motorischen Cortex.

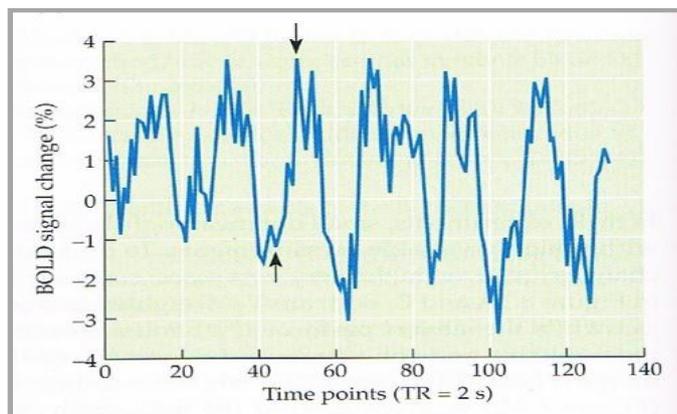


Abbildung 62: Zeitreihe in Bezug auf das BOLD-Signal (bereinigte Daten)⁵⁷³

Betrachtet man die Signalveränderungen beim Vergleich beider Pfeile so stellt man fest, dass sich der Signalunterschied auf ca. 5% beläuft. Auf der Basis genau dieser kleinen Signalunterschiede zwischen zwei experimentellen Bedingungen wird letztlich im Rahmen der statistischen Analyse entschieden, ob eine signifikante Aktivierung vorliegt oder nicht.

In Abbildung 62 ist vor allem die Einheit der Zeitreihe zu beachten. Im Ergebnis entsteht kein Signal in Bezug auf eine fixe Intensitätsskala. Vielmehr beinhalten die Zeitreihen die relative Veränderung des BOLD-Signals über die Zeit, hier ausgedrückt über Prozentwerte. In einigen Darstellungen finden sich auch Zahlenwerte auf der Einheitsdimension, doch sie sind willkürlich gewählt. Faktisch wird stets die relative Signalveränderung i.V.m. der hämodynamischen Antwortfunktion abgebildet. BOLD-Signale „... measure only the relative change from a control condition or baseline (the BOLD level from which the relative change is measured will henceforth be referred to as 'baseline')“⁵⁷⁴ Wie bereits erwähnt, variiert die messbare Signalintensität auch in Abhängigkeit von der untersuchten Gehirnregion. Generell ist nach der Vorverarbeitung der Daten mit einer BOLD-abhängigen Signalveränderung in Höhe von 1-5%⁵⁷⁵ zu rechnen.

5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

Bevor es in Kapitel 5.4⁵⁷⁶ um die konkrete Datenauswertung geht, werden nachfolgend die einzelnen Schritte aufgearbeitet, die im Zuge der Vorverarbeitung durchgeführt werden. Abbildung 62⁵⁷⁷ zeigt beispielhaft wie die fMRT-Daten nach erfolgter Vorverarbeitung für jeden Voxel aussehen. Wie bereits erwähnt, ist die Signalverän-

⁵⁷³ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 244

⁵⁷⁴ Stevensen, R. A.; Kim, S.; James, T. W. (2009), S. 184

⁵⁷⁵ vgl. Schwarzmüller-Erber, G.; Silberstein, E. (2010), S. 147; Heun, R.; Meyer-Lindenberg, A. (2001), S. 74; Albrecht, J. (2008), S. 26

⁵⁷⁶ Kapitel 5.4 Statistische Datenauswertung

⁵⁷⁷ Abbildung 62: Zeitreihe in Bezug auf das BOLD-Signal (bereinigte Daten)

derung im Zusammenhang mit der hämodynamischen Reaktion relativ klein. Zudem bestehen verschiedene Rauschquellen, die das Messergebnis verschlechtern können. Bei der fMRT-Datenanalyse wird letztlich auf Basis dieser geringen Signalunterschiede entschieden, an welchen Gehirnregionen konkrete experimentelle Bedingungen eine erhöhte Aktivierung bewirken. Die Vorverarbeitung dient dazu, die Daten insofern zu bereinigen bzw. aufzubereiten, dass sie für eine statistische Analyse verwendet werden können. Mit den Rohdaten alleine wäre dies nicht möglich. Die Vorverarbeitung ist folglich eine unabdingbare Voraussetzung in Bezug auf die fMRT-Datenanalyse und erhält dadurch eine zentrale Bedeutung.

Im Rahmen dieses Unterkapitels soll ein generelles Verständnis hinsichtlich der Vorverarbeitungsschritte geschaffen werden. Bereits in Kapitel 5.2.2⁵⁷⁸ wurde darauf eingegangen, dass im Ergebnis von fMRT-Messungen vierdimensionale Daten vorliegen. Es bestehen sowohl drei räumliche Dimensionen wie auch eine zeitliche Dimension. Dies ist hilfreich, um die einzelnen Vorverarbeitungs- aber auch Analyse-schritte transparent zu machen. Wichtig hinsichtlich der Datenvorverarbeitung ist auch die Einhalten der grundlegenden Arbeitsschrittfolge. Generell können die Vorverarbeitungsschritte in vier Teile untergliedert werden. Dies sind die Bewegungskorrektur, die zeitliche Korrektur der Schichtmessung, die Normalisierung der Daten und am Ende das räumliche Glätten der Daten. Die Korrektur in Bezug auf die Schichtmessung bezieht sich hierbei auf die zeitliche Korrektur der Rohdaten, die anderen drei genannten Bearbeitungsschritte zielen auf die räumliche Korrektur der Rohdaten ab. Fundamentale Voraussetzung für die Vorverarbeitung der fMRT-Daten ist, dass sich die gemessenen Daten durch die einzelnen Schritte nicht verändern, sondern diese lediglich relokalisiert und zeitlich auf denselben Zeitpunkt interpoliert werden.

Zunächst wird die *Grundausrichtung der Gehirnbilder (proper slice orientation)* im Sinne der Abbildung der linken und rechten Gehirnhälfte kurz thematisiert. Nach der Datenanalyse erhält man für verschiedene Kontraste Gehirnabbildungen, die statistisch signifikante Aktivierungen für das gesamte Gehirn anzeigen.⁵⁷⁹ Im Endeffekt können mit Hilfe der entsprechenden Software alle Voxel innerhalb eines Gehirns angesteuert und über drei Schnittebenen betrachtet werden. Eine dieser Schnittebenen ist der Coronarschnitt. Hierbei wird das Gehirn von vorne nach hinten in Schichten zerteilt. Im Zuge dieser Abbildung ist es von essenzieller Bedeutung zu wissen, auf welcher Seite die beiden Gehirnhälften abgebildet sind. Es stellt sich folglich die generelle Frage wo links und wo rechts in Bezug auf das dargestellte Gehirn ist. Diesbezüglich unterscheidet man zwischen der *radiologischen* und der *neurologischen Konvention*. Die radiologische Konvention⁵⁸⁰ bildet im Coronarschnitt die rechte Gehirnhälfte links und die linke Gehirnhälfte rechts ab. Man kann sich hierfür vorstellen, dass man vor einer Testperson steht und dieser frontal ins Gesicht schaut. Ist dies die gewählte Perspektive, so befindet sich die rechte Kopfseite der Testperson

⁵⁷⁸ Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

⁵⁷⁹ vgl. Abbildung 74: Beispielhafte t-Karte aus der eigenen Untersuchung

⁵⁸⁰ vgl. Stephan, K. E.; Fink, G. R. (2007), S. 347

im linken Sichtfeld und andersrum. Bei Anwendung der neurologischen Konvention⁵⁸¹ wird die linke Gehirnhälfte auch im Coronarschnitt links angezeigt. Bei der Erklärung hilft die Situation einer Gehirnoperation. Der Patient liegt bspw. bewusstlos auf dem Rücken. Der Chirurg steht am Kopfende der Liege und schaut von oben auf den Patienten. Aus dieser Perspektive befindet sich die linke Gehirnhälfte des Patienten im linken Sichtfeld des Chirurgen und die rechte Gehirnhälfte im rechten Sichtfeld. Prinzipiell ist es nicht entscheidend welche Konvention verwendet wird, allerdings muss unbedingt dokumentiert werden, welche Variante gewählt wird. Für eine intuitive Interpretation der Gehirnschnitte ist die neurologische Konvention zu empfehlen. Je nachdem in welcher Konvention die fMRT-Rohdaten vorliegen, müssen sie entweder gespiegelt werden oder benötigen keine Korrektur.

Wie bereits in Kapitel 5.3.1⁵⁸² beschrieben wurde, stellen Kopfbewegung die potentiell stärkste Rauschquelle für fMRT-Daten dar. Um dem entgegen zu wirken, wird die sog. *Bewegungskorrektur (realignment)*⁵⁸³ vorgenommen.

Hierzu muss man sich zunächst nochmal den fMRT-Messvorgang vor Augen halten. Aufgrund der geringen Signalveränderungen müssen die einzelnen Gehirnschichten wiederholt angeregt und gemessen werden. Im Ergebnis liegen für jede Schicht folglich mehrere Gehirnbilder vor.⁵⁸⁴ Bewegt ein Proband seinen Kopf bzw. erfolgt eine leichte Lageveränderung des Kopfes im Verlauf der Messung⁵⁸⁵, so ist die Ausrichtung der erzeugten Bilder nicht mehr einheitlich. In der Konsequenz ist nicht mehr gewährleistet, dass ein konkreter Voxel (V_1) in allen Bildern an derselben Stelle liegt. Gerade dies ist eine fundamentale Bedingung um die Daten sinnvoll auszuwerten. V_1 muss sich in Bild₁, Bild₂, Bild₃, ... und Bild_n immer an derselben Stelle befinden.

Im Zuge der Bewegungskorrektur wird zunächst ein Referenzbild ausgewählt. Meistens wird das erste Bild einer Zeitreihe als Referenz definiert. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Probanden zu Beginn eines fMRT-Experiments relativ entspannt bzw. konzentriert sind und daher eher keine Kopfbewegungen aufweisen.⁵⁸⁶ In diesem Sinne kann ein Bild vom Anfang der Zeitreihe als Vorlage für die anderen Bilder verwendet werden. Alle anderen Bilder der betreffenden Schicht werden auf dieses Referenzbild ausgerichtet. Die Ausrichtung kann im Sinne einer *Rigid-Body-Transformation*⁵⁸⁷ verstanden werden. Hierbei werden die Bilder als starre unverän-

⁵⁸¹ vgl. Meyer, M. (2013), S. 355

⁵⁸² Kapitel 5.3.1 Signal und Rauschen

⁵⁸³ vgl. Heun, R.; Meyer-Lindenberg, A. (2001), S. 75; Mathiak, K.; Goebel, R.; Weiskopf, N. (2013), S. 112; Klose, U. et al. (1999), S. 29 f.; Jäncke, L. (2005), S. 99 ff.; Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 33 f.; Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 152 f.; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 276; Plassmann, H. (2006), S. 129; Kellermann, T. (2007), S. 19 f.

⁵⁸⁴ Bspw. wurde jede Schicht 250 Mal angeregt und gemessen.

⁵⁸⁵ Je nach Länge der Erhebung ist dies nur eine Frage der Zeit. Eine minimale Kopfbewegung reicht hierbei schon aus, um Verzerrungen zu verursachen.

⁵⁸⁶ Eine andere Möglichkeit besteht darin, ein Bild aus dem mittleren Bereich der Zeitreihe als Referenzbild zu verwenden. Im Verlauf der Messung gewöhnen sich die Probanden besser an die Erhebungssituation, sind in der Folge in der Mitte der Messung relativ entspannt und neigen zu weniger Kopfbewegungen.

⁵⁸⁷ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 276; Plassmann, H. (2006), S. 129; Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 153

derbare Körper betrachtet, die lediglich rotiert bzw. gedreht werden. Bei diesem Vorverarbeitungsschritt werden die Bilder nicht in Bezug auf ihre Beschaffenheit verändert. Sie werden lediglich gedreht bzw. rotiert, damit am Ende alle Bilder dieselbe Ausrichtung aufweisen. In Abbildung 63 ist das grundlegende Prinzip hinsichtlich der Bewegungskorrektur dargestellt. Alle Bilder der Zeitreihe werden hierbei an die Ausrichtung des ersten Bildes der Zeitreihe angepasst.

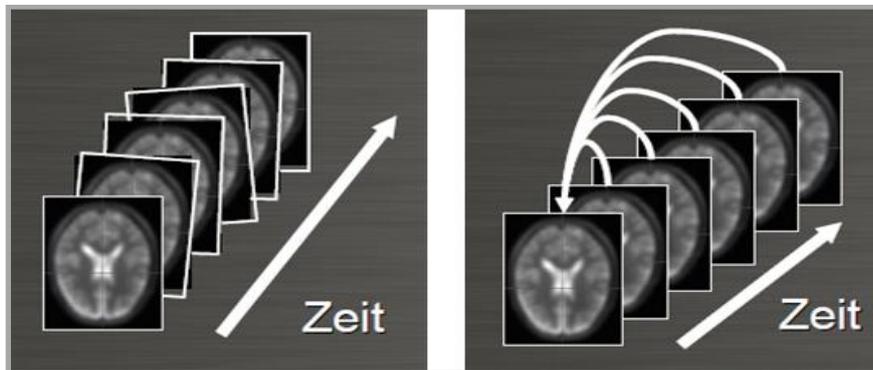


Abbildung 63: Die Bewegungskorrektur⁵⁸⁸

„Als Algorithmus für die Registrierung bietet sich entsprechend der Methode der kleinsten Quadrate an, die beiden zu verarbeitenden Bilder voneinander zu subtrahieren und das Quadrat der verbleibenden Restaktivität zu minimieren. Diese Zielgröße würde genau dann Null werden, wenn die beiden Bilder identisch sind. Die zur Minimierung verwandten Verfahren unterscheiden sich von Programm zu Programm.“⁵⁸⁹ Im Ergebnis der Bewegungskorrektur kann ein gemessenes Signal über die gesamte Zeitreihe hinweg exakt demselben Gehirnbereich zugeordnet werden. Es bleibt jedoch festzuhalten, dass größere Kopfbewegungen nicht korrigiert werden können. „Den verfügbaren Korrekturverfahren sind Grenzen gesetzt, und zwar bei ruckartigen Bewegungen wie auch bei der maximalen absoluten Verschiebung der Kopfposition.“⁵⁹⁰ Beträgt die Veränderung mehr als zwei Voxellängen bzw. 5 oder mehr Millimeter, dann sollte nicht mit den Daten weitergearbeitet werden.⁵⁹¹ Treten lediglich kleinere Kopfbewegungen auf, so ist dies nach der eigentlichen Erhebung korrigierbar. Um größere Kopfbewegungen zu vermeiden, werden vor der Erhebung verschiedene Maßnahmen ergriffen, um die Auftrittswahrscheinlichkeit von Kopfbewegungen zu minimieren.⁵⁹² Früher wurde oft eine Beißschiene verwendet. Ebenso ist es möglich Gesichtsmasken einzusetzen, um die Kopfbewegungen zu beschränken. Des Weiteren wird standardmäßig auf kleinere Sandsäcke bzw. gepolsterte kleine Kissen zurückgegriffen, die den Freiraum zwischen Kopf und Kopfspule weitgehend ausfüllen sollen.

⁵⁸⁸ Gaser, C. (2004)

⁵⁸⁹ Heun, R.; Meyer-Lindenberg, A. (2001), S. 75

⁵⁹⁰ Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 153

⁵⁹¹ vgl. Goebel, R. Kriegeskorte, N. (2005b), S. 33

⁵⁹² vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 274 f.; Jäncke, L. (2005), S. 99; Mathiak, K.; Goebel, R.; Weiskopf, N. (2013), S. 112

Neben den dreidimensionalen Volumen beinhalten die fMRT-Daten auch eine zeitliche Komponente. Konzentriert man sich zunächst auf einen Voxel, so stellen fMRT-Daten Zeitreihen hinsichtlich der Signalintensität dar. Wie in Kapitel 5.2.2⁵⁹³ bereits angesprochen ist der fMRT-Messvorgang nicht als Volumenmessung zu verstehen. Das gesamte Gehirn wird nicht über eine generelle Messung erfasst. Vielmehr wird jede Schicht⁵⁹⁴ nacheinander aufgezeichnet, d.h. jede Schicht wird zu einem anderen Zeitpunkt gemessen. Die Messung kann auf verschiedene Weisen durchgeführt werden. So wird generell zwischen Top-down- und Bottom-up-Messungen unterschieden. Bei einer 30-Schichten-Einteilung des Gehirns steht Top-down für eine Messreihenfolge von der obersten Schicht bis zur untersten (1/ 2 / .../ 30). Bottom-up beschreibt die Messung, die bei der untersten Schicht anfängt und sich dann bis in die oberste Schicht fortsetzt (30/ 29/ .../ 1). Eine weitere relevante Messung besteht in der verschachtelten Messung (interleaved). Hierbei werden bspw. zuerst alle ungeraden Schichten (1/ 3/ .../ 29) und anschließend alle geraden Schichten (2/ 4/ .../ 30) erhoben. Da der zur Anregung verwendete HF-Puls nicht perfekt ist, kann es durchaus dazu kommen, dass auch eine benachbarte Schicht leicht angeregt wird. Aus diesem Grund kann es von Vorteil sein, benachbarte Schichten nicht nacheinander zu messen, sondern verschachtelt.

Wie im Zuge von Kapitel 4.2.1⁵⁹⁵ dargestellt wurde, ist die Repetitionszeit (TR) die Zeit, die zwischen der wiederholten Messung einer Schicht vergeht. Geht man bspw. von der Einteilung des Gehirns in 30 Schichten aus und verwendet eine Messsequenz mit einer TR von 3s, so besteht eine zeitliche Lücke zwischen der ersten und der letzten aufgenommenen Schicht von ca. 3 Sekunden. Wie ersichtlich geworden sein sollte, werden die einzelnen Schichten des Gehirns jeweils zu einem anderen Zeitpunkt innerhalb der TR erhoben. „Insofern wird die hämodynamische Reaktion in der obersten Schicht zu einem anderen Zeitpunkt erfasst als in der untersten Schicht.“⁵⁹⁶ Für die statistische Analyse und auch die Ergebnisdarstellung wird die beschriebene Messung allerdings als ein Volumen behandelt, das zu einem Zeitpunkt erhoben wurde. Im Rahmen der fMRT möchte man letztlich die Signale für das gesamte Gehirn zum selben Zeitpunkt vergleichen. Um diese zeitliche Homogenität zwischen den verschiedenen Schichten herzustellen, ist die *zeitliche Korrektur der Schichtmessung (slice timing)*⁵⁹⁷ erforderlich. Diese Korrektur wird über eine *Interpolation* erreicht, für die verschiedene Algorithmen existieren. Um das grundlegende Prinzip hinter der Interpolation nachzuvollziehen, muss man sich zum einen die Idee einer Referenzzeit bzw. einer damit verbundenen Referenzschicht und zum anderen die Daten bzw. Zeitreihen in Bezug auf eine einzelne Schicht vor Augen halten. Um zu gewährleisten, dass alle Schichten im Ergebnis Signalintensitäten zum selben Zeitpunkt repräsentieren, muss zunächst ein Referenzpunkt innerhalb der TR ge-

⁵⁹³ Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

⁵⁹⁴ Die Schichtanzahl ist abhängig von der Definition der Schichtdicke bzw. der Voxelgröße.

⁵⁹⁵ Kapitel 4.2.1 Grundlegende Anmerkungen

⁵⁹⁶ Jäncke, L. (2005), S. 102

⁵⁹⁷ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 269 ff.; Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 34; Jäncke, L. (2005), S. 102 f.; Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 154 f.

wählt werden, auf den alle Schichten angepasst bzw. für den sie geschätzt werden sollen. Diesen Referenzpunkt kann man entweder in Bezug auf die TR oder in Bezug auf die Schicht, die zu diesem konkreten Zeitpunkt gemessen wird, zum Ausdruck bringen. Im Zuge der Interpolation wird i.d.R. die mittlere Schicht, sprich $\frac{1}{2}$ TR, verwendet. Dies entspricht dem Zeitpunkt bzw. der Schicht mit der geringsten Abweichung zu allen anderen Messpunkten bzw. Schichten.⁵⁹⁸ Die Frage, die letztlich durch die Interpolation geklärt wird, lautet: Wie sähe das Signal aus, wenn es für jeden Voxel zum Zeitpunkt $\frac{1}{2}$ TR gemessen worden wäre. In Abbildung 64 ist dieser Sachverhalt dargestellt. Hierbei soll das orange Oval das Gehirn repräsentieren, welches im Zuge der fMRT-Messung in 30 Schichten unterteilt wird. Jede Schicht wird alle 3s wiederholt gemessen. Das gesamte Gehirn wird in diesem Fall schichtweise nacheinander von oben nach unten aufgezeichnet (Top-down-Messung).

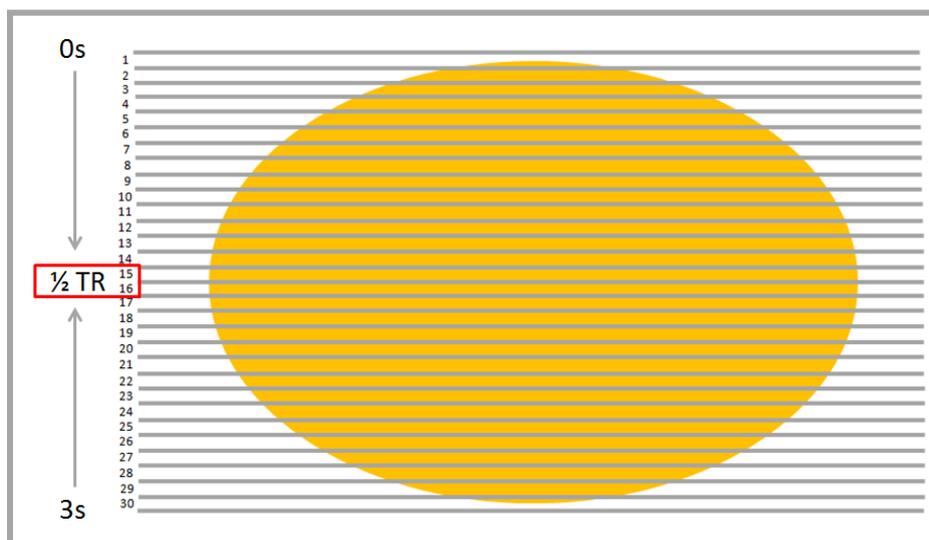


Abbildung 64: Korrektur auf $\frac{1}{2}$ TR bzw. die mittlere Schicht (Top-down/ TR = 3s) (eigene Darstellung)

Je nachdem, wie die Messung vorgenommen wurde, ob Top-down, Bottom-up oder interleaved, ergibt sich der entsprechende Zeitpunkt $\frac{1}{2}$ TR. Im dargestellten Fall, wie auch bei einer Bottom-up-Messung, erfolgt die zeitliche Korrektur auf Schicht 15 bzw. 16. Wurde hingegen eine verschachtelte Messung verwendet, wird auf Schicht 29 bzw. 2 korrigiert. Je nachdem ob die geraden oder die ungeraden Schichten zuerst erfasst wurden, repräsentiert entweder Schicht 29 oder Schicht 2 den Zeitpunkt $\frac{1}{2}$ TR.

Nachdem die Frage des Referenzpunktes geklärt ist, geht es nun um das Verständnis für die Daten, die im Zuge der Messung für eine einzelne Schicht gesammelt werden. Im Verlauf einer fMRT-Messung werden alle Schichten wiederholt gemessen, d.h. für jede Schicht (genauer gesagt für jeden Voxel) bestehen Zeitreihen in Bezug auf die Signalintensität. Bei einer TR von 3s erhält man folglich im Drei-Sekunden-Takt Messungen derselben Schicht. Es wurde bereits erwähnt, dass die Signale einer jeden Schicht über eine Interpolation zeitlich an einen Referenzpunkt angepasst werden sollen. Dieser Zeitpunkt wurde mit $\frac{1}{2}$ TR definiert. Für die unterste Schicht bzw. für alle Schichten außer den im Messverlauf mittleren Schichten liegen

⁵⁹⁸ vgl. <http://mindhive.mit.edu/node/109> (abgerufen am 06.05.2014)

allerdings keine Werte für den Zeitpunkt $\frac{1}{2}$ TR vor. Diese Werte können nur geschätzt bzw. interpoliert werden, indem man für die einzelnen Schichten Informationen benachbarter Zeitpunkte berücksichtigt. Über die vorhandene Zeitreihe einer Schicht werden somit die Intensitätswerte zum Zeitpunkt $\frac{1}{2}$ TR geschätzt. Konkret kann eine Interpolation umgesetzt werden „...*, indem z.B. eine Fourier-Analyse durchgeführt und eine Phasenkorrektur des Signals vorgenommen wird.*“⁵⁹⁹ Im Ergebnis der zeitlichen Korrektur liegt ein neuer Datensatz vor, der für jeden Voxel Zeitreihen beinhaltet, die den gleichen Zeitpunkt widerspiegeln.

Warum ist es inhaltlich überhaupt erstrebenswert, die Signalwerte jeder Schicht auf denselben Zeitpunkt zu interpolieren? Abbildung 65 bringt den kritischen Sachverhalt zum Ausdruck. Falls eine Gehirnregion oder -struktur nicht nur eine, sondern zwei bzw. drei Schichten umfasst, ist man i.d.R. daran interessiert, wie das Signal der gesamten Region bzw. Struktur aussieht. Ohne Korrektur könnte man bspw. zu dem Ergebnis kommen, dass der Teil, der später gemessen wurde (z.B. Schicht 17), stärker aktiv ist als der Teil, der früher gemessen wurde (z.B. Schicht 15). Tatsächlich könnte man aber bei der späteren Messung einfach näher am Peak gelegen haben. Derartige Fehlinterpretationen gilt es durch die zeitliche Korrektur zu vermeiden.

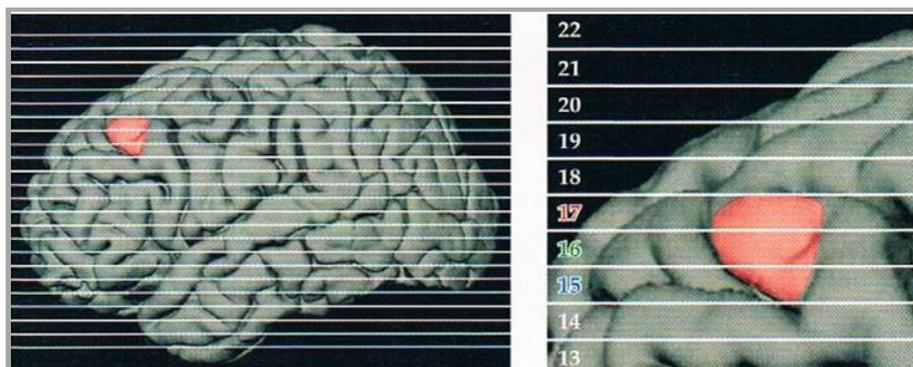


Abbildung 65: Problematik i.V.m. der Schichtmessung⁶⁰⁰

Eine Schwierigkeit in Bezug auf die beschriebene zeitliche Korrektur besteht darin, dass es je nach gewählter Messsequenz theoretisch möglich ist, eine konkrete Schicht immer an einer Stelle der TR zu erfassen, die mit geringen Signalintensitäten verbunden ist. Ist diesem Fall kann auch die Interpolation mit Hilfe der generierten Zeitreihe nur ein verzerrtes Bild hinsichtlich der tatsächlichen Signalintensitäten ergeben. Eine Lösung dieser Schwierigkeit besteht in der bereits dargestellten Anwendung des *Jittering*⁶⁰¹. Durch das Jittering, wird die starre zeitliche Struktur in Form einer konstanten Stimuluspräsentationsdauer und einer konstanten Pause aufgebrochen, indem die Zeit zwischen zwei Stimuli zufällig variiert wird (3s Stimulus, 2s Pause, 3s Stimulus, 5s Pause, ...). Dieses Vorgehen bewirkt, dass jede Schicht zu unterschiedlichen Zeitpunkten ausgelesen werden kann. Im Ergebnis kommt es durch die Interpolation zu einer besseren Schätzung.⁶⁰² „*Da der Effekt des Messzeitpunkts*

⁵⁹⁹ Jäncke, L. (2005), S. 102 f.

⁶⁰⁰ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 270

⁶⁰¹ vgl. Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

⁶⁰² vgl. Jäncke, L. (2005), S. 103

einer Schicht auf das Signal zumeist kleiner ist als der Effekt der Probandenbewegung, außer bei Sequenzen mit überlappender Schichtreihenfolge, wird die «slice time correction» in der Regel nach der Bewegungskorrektur durchgeführt.⁶⁰³

Wie noch im Rahmen von Kapitel 5.4⁶⁰⁴ zu erläutern ist, kann man die fMRT-Datenanalyse in die Einzel- und Gruppenanalyse aufteilen. Um verallgemeinerbare Aussagen treffen zu können, ist eine Gruppenanalyse notwendig. Um die Daten bzw. Ergebnisse einzelner Personen in Form einer Gruppenanalyse zu bündeln, muss vorher gewährleistet sein, dass sich die zu bündelnden Informationen auf dieselbe anatomische Basis beziehen. Genau dies ist das Ziel der *Normalisierung der Daten (normalization)*⁶⁰⁵.

In Bezug auf die fMRT-Daten gilt es sicherzustellen, dass Voxel_x sowohl für Person 1 wie auch für Person 2 an derselben Stelle definiert ist und dieselbe Region widerspiegelt. Die generelle Gehirnanatomie ist zwar weitgehend über Personen vergleichbar, doch identisch sind die Gehirne unterschiedlicher Personen nicht. Eine anatomische Übereinstimmung der Personen ist allerdings die unabdingbare Voraussetzung für die Durchführung einer Gruppenanalyse. Ist nicht davon auszugehen, dass in den Daten eine derartige Uniformität besteht, so macht eine Gruppenanalyse wenig Sinn. Die angesprochene gemeinsame Basis kann mit dem Begriff des *Standardgehirns* in Verbindung gebracht werden. Es existieren verschiedene Standardgehirne bzw. Möglichkeiten eine Vorlage im Sinne eines Referenzgehirns zu erstellen. Die beiden bekanntesten Gehirnatlanten sind der Talairach-Atlas⁶⁰⁶ und der MNI-Atlas⁶⁰⁷. Talairach und Tournoux waren die Pioniere in diesem Bereich. Ihr Atlas beruht allerdings nur auf dem Gehirn einer toten Person. „*While the standardization provided by this framework has been extraordinarily important for neuroscience, the use of a single brain presents many problems, notably that the brain used was unrepresentative of the population at large.*“⁶⁰⁸ Das Standardgehirn, das sich mittlerweile durchgesetzt hat, ist der MNI-Atlas. Im Gegensatz zum Talairach-Atlas wurde dieses Standardgehirn auf der Grundlage mehrerer hundert gesunder Personen erzeugt. Im Montreal Neurological Institute (MNI) wurden dazu ursprünglich 305 Gehirne zusammengefasst. Diese 305 Gehirne wurden in ein Koordinatensystem transformiert „...“, *das sich wiederum weitgehend an dem von Talairach und Tournoux definierten stereotaktischen Hirnatlas orientiert.*“⁶⁰⁹ Unabhängig davon, für welches Standardgehirn man sich entscheidet, besteht die grundlegende Idee darin, die individuellen personenbezogenen fMRT-Daten⁶¹⁰ auf einen gemeinsamen anatomischen Raum anzugleichen.

⁶⁰³ Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 154

⁶⁰⁴ Kapitel 5.4 Statistische Datenauswertung

⁶⁰⁵ vgl. Jäncke, L. (2005), S. 104; Plassmann, H. (2006), S. 130 f.; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 280 ff.; Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 156 f.; Kellermann, T. (2007), S. 20 f.; Heun, R.; Meyer-Lindenberg, A. (2001), S. 75 f.; Klose, U. et al. (1999), S. 34

⁶⁰⁶ vgl. Talairach, J.; Tournoux, P. (1988)

⁶⁰⁷ vgl. Evans, A. C.; Collins, D. L.; Mills, S. R.; Brown, D. E.; Kelly, R. L.; Peters, T. M. (1993)

⁶⁰⁸ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 283

⁶⁰⁹ Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 156

⁶¹⁰ vgl. Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

Im Gegensatz zur bereits angesprochenen Bewegungskorrektur, die eine rigid-body-Transformation darstellt, wird im Zuge des Transformationsprozesses der Normalisierung auch die Form der individuellen Daten verändert. Der Grad der Veränderung ist davon abhängig, wie stark sich die individuellen Gehirnanatomien vom Standardgehirn unterscheiden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten die ursprünglichen Daten an das konkrete Standardgehirn anzupassen. Der Transformationsprozess kann grob gesprochen in zwei Teile untergliedert werden. In einem ersten Schritt geht es um die Neuausrichtung der Daten der unterschiedlichen Personen. Hierbei werden die Daten wie bei der Bewegungskorrektur nicht verändert, sondern lediglich gedreht bzw. rotiert. Dieser erste Schritt stellt sicher, dass die Daten aller Personen eine identische Orientierung aufweisen. Die Zielerreichung wird hierbei über die Minimierung der Abweichungsquadrate im Vergleich zu einer Referenz gesteuert. Eine einheitliche Ausrichtung ist die Voraussetzung für eine sinnvolle Anwendung des zentralen zweiten Transformationsschrittes. Hierbei steht eine Größenveränderung der Daten im Vordergrund. Durch Stauchung und Streckung ist es nun möglich alle individuellen Daten auf ein Standardgehirn anzupassen. *„Mitunter werden solche linearen Transformationen für Teilbereiche des Gehirns isoliert bestimmt, um eine genauere Anpassung zu erzielen. Die Genauigkeit der Anpassung bestimmt sich auch hier zu meist über die Summierung der Abweichungsquadrate zwischen individuellem Gehirn und einem Referenzgehirn.“*⁶¹¹ Wären die individuellen Daten nicht im Vorfeld reorientiert worden, würde eine anschließende Größenveränderung nicht zum gewünschten Ziel führen. Die beschriebene Normalisierung gleicht die individuellen Unterschiede zwischen Personen aus. Die Gehirnanatomien unterschiedlicher Personen werden hierbei auf ein Standardgehirn ausgerichtet bzw. normalisiert. Nach der Normalisierung sind die Daten der einzelnen Probanden vergleichbar und in diesem Sinne für eine Gruppenanalyse geeignet.

Den letzten Vorverarbeitungsschritt stellt die *räumliche Glättung (smoothing)*⁶¹² im Anschluss an die Normalisierung der Daten dar. Hierbei erfolgt eine Art Weichzeichnung der Konturen in Bezug auf die bereits normalisierten fMRT-Daten. Grob gesprochen erreicht man durch die räumliche Glättung auf Kosten einer etwas geringeren Detailauflösung eine insgesamt gesehen bessere Datenqualität. Im Zuge des Glättungsvorgangs werden benachbarte Signalintensitäten aneinander angepasst. *„Glättungsoperationen kann man sich als gleitende Durchschnittsbildungen benachbarter Voxel vorstellen.“*⁶¹³ Zur Ermittlung gewichteter Intensitätswerte werden jeweils die ursprünglichen Intensitätswerte eines Voxels mit denen der anliegenden Voxel verrechnet. Folglich werden alle Voxelwerte neu berechnet. Wie stark die anliegenden Voxel in die Neuberechnung einfließen, hängt von ihrer Entfernung zum betreffenden Voxel ab. *„Die Gewichtung dieser Voxel ist umso höher je kleiner die Euklidi-*

⁶¹¹ Jäncke, L. (2005), S. 104

⁶¹² vgl. Jäncke, L. (2005), S. 105 ff.; Plassmann, H. (2006), S. 131 f.; Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 157; Heun, R.; Meyer-Lindenberg, A. (2001), S. 76 f.; Brett, M.; Penny, W. D.; Kiebel, S. (2004), S. 870 f.; Friston, K. J. (2004), S. 604 f.; Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 34 f.; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 287 f.; Kellermann, T. (2007), S. 21

⁶¹³ Heun, R.; Meyer-Lindenberg, A. (2001), S. 76

sche Distanz zum Voxel im Zentrum ist.“⁶¹⁴ Der zentrale Voxel liefert immer den höchsten Beitrag. Wie stark die anliegenden Voxel konkret einfließen wird durch eine dreidimensionale Gauß-Funktion determiniert. Dieser Mechanismus kann als eine Art Filter verstanden werden, auf Basis dessen die Daten räumlich geglättet bzw. räumlich gewichtet werden. Daher spricht man von einem *Gauß-Filter* oder auch von einem *Gauß-Kernel*. Im Zusammenhang mit dem Gauß-Filter spielt die sog. *Full Width at Half Maximum (FWHM)* eine entscheidende Rolle. Sie bezieht sich auf die Breite des Gauß-Filters und gibt das Ausmaß an, in welchem die anliegenden Voxel in die Glättung einbezogen werden. „Dieser Wert gibt die räumliche Distanz der benachbarten Voxel in mm an, ab der die Werte mit halber Gewichtung in die Glättung eingehen.“⁶¹⁵ „An FWHM of 10 pixels means that, at five pixels from the centre, the value of the kernel is half its peak value.“⁶¹⁶

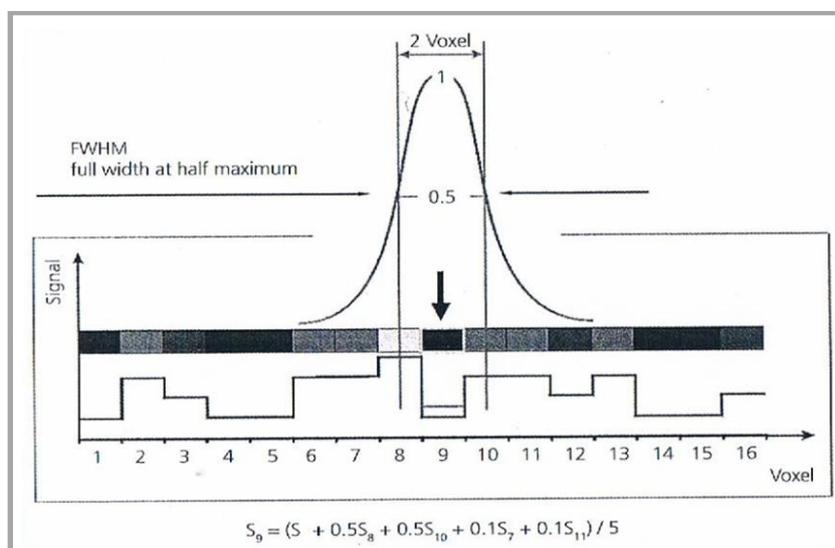


Abbildung 66: Prinzip des Gauss-Filters in einer Dimension⁶¹⁷

In Abbildung 66 ist ein Gauß-Filter mit einer FWHM von zwei Voxeln zu erkennen. Durch die räumliche Glättung auf Basis dieses Filters wird der zentrale Voxel (V_9) mit einem Gewicht von 1 in der Neuberechnung der gewichteten Signalintensität für diesen Voxel berücksichtigt. V_8 und V_{10} , die nächstgelegenen Voxel, befinden sich im Bereich der FWHM und fließen daher jeweils mit einem Gewicht von 0,5 in die Berechnung ein. Auch V_7 und V_{11} werden in die Berechnung integriert, allerdings entsprechend ihrer Entfernung zum Zentrum des Filters mit einem deutlich geringeren Gewicht (0,1). V_6 und V_{12} spielen keine Rolle mehr. Anzumerken bleibt noch, dass die, in Abbildung 66 visualisierte, räumliche Glättung nicht nur in Bezug auf eine Dimension stattfindet, sondern gleichzeitig alle drei Dimensionen mit in die Betrachtung einschließt.

⁶¹⁴ Kellermann, T. (2007), S. 21

⁶¹⁵ Jäncke, L. (2005), S. 105

⁶¹⁶ Brett, M.; Penny, W. D.; Kiebel, S. (2004), S. 871

⁶¹⁷ Jäncke, L. (2005), S. 106

Die räumliche Glättung besitzt aus verschiedenen Gründen eine besondere Relevanz. Eine wichtige Konsequenz aus der räumlichen Glättung ist die Verbesserung des Signal-zu-Rausch-Verhältnisses. Durch den beschriebenen Prozess der Glättung kann das, in den Rohdaten vorhandene, Rauschen verringert werden. Da jeder Voxel mit seinen Voxelnachbarn verknüpft wird, können zufällige Effekte heraus gemittelt werden. Dies führt dazu, dass eine bessere Differenzierung zwischen Signal und Rauschen möglich ist. In der Folge können tatsächliche Aktivierungen besser detektiert werden. Gleichzeitig wird die Wahrscheinlichkeit von zufälligen Aktivierungen verringert. In Bezug auf die noch zu erläuternde fMRT-Datenanalyse⁶¹⁸ stellt die räumliche Glättung sicher, dass eine zentrale Voraussetzung erfüllt ist. *„Durch das Glätten der Daten werden die Fehler stärker an die Normalverteilung angepasst, was die Validität der statistischen Aussagen erhöht, die auf parametrischen Tests beruhen.“*⁶¹⁹ Da die Daten über einen Gauß-Filter geglättet werden, kann im Zuge der statistischen Analyse zudem auf die Theorie der Gauß-Felder zurückgegriffen werden, um multiples Testen zu korrigieren.⁶²⁰ Zum einen wird die Abhängigkeit zwischen den Voxeln durch die räumliche Glättung systematisch erhöht, zum anderen kann diese Abhängigkeit mit in die Analyse einfließen. Des Weiteren wird durch das bessere Signal-zu-Rausch-Verhältnis generell die Validität der statistischen Analysen erhöht. Des Weiteren wird durch die systematische Verknüpfung benachbarter Voxel die räumliche Korrelation zwischen anliegenden Voxeln verstärkt. Inhaltlich wird der zugrunde liegende Prozess, neuronale Aktivität bzw. die darauf folgende hämodynamische Reaktion, auf diese Weise realistischer wiedergespiegelt. *„Die hämodynamischen Reaktionen, die mit der fMRI gemessen werden können, haben eine gewisse räumliche Ausdehnung, [...]. Das heißt, je nach Größe der Voxel sind die Veränderungen, die in benachbarten Voxeln gemessen werden, nicht unabhängig, sondern auf die gleiche Ursache zurückzuführen.“*⁶²¹

Betrachtet man die räumliche Glättung und die vorher erfolgte Normalisierung im Bündel, so können durch die Kombination beider Vorverarbeitungsschritte insgesamt die individuellen Rohdaten an einen gemeinsamen Standardraum angenähert werden. Die Normalisierung der individuellen Daten ist nicht immer perfekt. Daher können durch die zusätzliche Weichzeichnung der Konturen im Zuge der räumlichen Glättung individuelle Unterschiede weiter minimiert bzw. eliminiert werden. *„In conjunction with spatial smoothing, normalization greatly reduces anatomical differences between subjects, at a cost of functional resolution.“*⁶²² Im Ergebnis der angesprochenen Weichzeichnung gehen einige feinere Details verloren, da in der Folge der Glättung die individuellen anatomischen Konturen bzw. Grenzen etwas undeutlicher werden. Auf der einen Seite verringert dieser Umstand die individuellen Unterschiede. Auf der anderen Seite führt dies dazu, dass die Auflösung der Daten insgesamt leicht reduziert wird. *„Viele Studien zielen jedoch auf zentimetergroße homogene Ak-*

⁶¹⁸ vgl. Kapitel 5.4 Statistische Datenanalyse

⁶¹⁹ Plassmann, H. (2006), S. 132

⁶²⁰ vgl. Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

⁶²¹ Jäncke, L. (2005), S. 105

⁶²² Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 365

*tivierungen ab. Unter solchen Bedingungen reduziert Glättung lediglich das Rauschen und betont die interessierenden Effekte.*⁶²³

Als Fazit zum Themenkomplex der Vorverarbeitung kann festgehalten werden, dass die räumliche und zeitliche Korrektur der Rohdaten dazu führt, dass die Daten aller Personen in Bezug auf einen konkreten Voxel immer dieselbe Gehirnregion repräsentiert und dass die Signalwerte für unterschiedliche Voxel denselben Zeitpunkt widerspiegeln. Im Endeffekt kann die fMRT-Messung nach erfolgreicher Vorverarbeitung als ein Volumen behandelt werden, das zu einem Zeitpunkt erhoben wurde. Beginnt man auf der Personenebene, so ist durch die Bewegungskorrektur gewährleistet, dass sich die wiederholten Messungen einer Schicht immer auf dieselbe Gehirnregion beziehen. Neben der räumlichen wird auch eine zeitliche Korrektur auf Personenebene durchgeführt. Über die Anwendung einer Interpolation können die Werte der unterschiedlichen Schichten so behandelt werden, als wären sie zum selben Messzeitpunkt erhoben worden. Für eine Einzelanalyse wären diese beiden Vorverarbeitungsschritte ausreichend. Da allerdings i.d.R. Gruppenanalysen angestrebt werden, um aussagekräftigere Ergebnisse zu erzielen, bedarf es noch zweier weiterer Anpassungen. Um sinnvoll auf Gruppenebene arbeiten zu können, müssen die individuellen anatomischen Daten verschiedener Personen so verändert werden, dass sie im Ergebnis dieser Transformation alle eine vergleichbare Größe und Beschaffenheit aufweisen. Dies wird im Rahmen der Normalisierung erreicht. Als letztes erfolgt noch die räumliche Glättung dieser, über die Gruppe vergleichbaren, Daten, um die Ausgangssituation in Bezug auf die statistische Analyse zu verbessern. Nach erfolgreicher Vorverarbeitung können die fMRT-Daten somit sinnvoll auf Einzel- wie auch auf Gruppenebene einer statistischen Analyse unterzogen werden. Wie aus den Ausführungen zur Vorverarbeitung der Daten hervorgegangen sein sollte, ist dieser Prozess unabdingbar für die weitere Verwertung von fMRT-Daten.

5.4 Statistische Datenauswertung

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um fMRT-Daten auszuwerten. Die nachfolgenden Ausführungen gelten generell und werden im letzten Unterkapitel auf die eigene fMRT-Studie ausgerichtet. Das Ziel bei der Darstellung der fMRT-Datenanalyse besteht darin, den generellen Prozess mit den jeweiligen Teilschritten in dem hier zur Verfügung stehenden Rahmen transparent abzubilden. Daher gestaltet sich die Ausarbeitung so generell wie möglich und so speziell wie nötig.⁶²⁴

Die Datenanalyse kann unter verschiedenen Aspekten betrachtet werden. Die erste Unterscheidung hinsichtlich der Analyse betrifft die Frage, ob lediglich die Daten einer Person untersucht werden sollen oder ob eine Gruppenanalyse relevant ist. Unter klinischen Aspekten stellen Einzelanalysen sehr häufig das Ziel der Analyse dar.

⁶²³ Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 34

⁶²⁴ Für eine genauere Auseinandersetzung mit speziellen Aspekten unterschiedlicher Bereiche der Datenanalyse bietet sich die Lektüre der Spezialliteratur an, die im Rahmen dieser Arbeit nicht im Fokus steht.

Im (neuro-)wissenschaftlichen Bereich geht es hingegen meistens um verallgemeinerbare Aussagen. Grundlegend basieren beide Analyseebenen auf der Anwendung des *Allgemeinen linearen Modells (ALM)*⁶²⁵, allerdings gilt es in Bezug auf die Gruppenanalyse weitere Sachverhalte zu berücksichtigen. Aus diesem Grund widmet sich Kapitel 5.4.1 der *Einzelanalyse*⁶²⁶, deren Bearbeitung alle fundamentalen Sachverhalte zur fMRT-Datenanalyse beinhaltet. Kapitel 5.4.2 überträgt diese Grundlage anschließend auf die *Gruppenanalyse*⁶²⁷.

Ein wichtiger Sachverhalt besteht in der sog. *voxelweisen Statistik*. Am Ende der Analyse entsteht zwar eine dreidimensionale Gehirnabbildung mit den farblich markierten aktivierten Gehirnregionen, dennoch bedeutet dies nicht, dass im Zuge der Datenanalyse nur eine Analyse für das gesamte Gehirn durchgeführt wird. Vielmehr werden für alle Voxel separate Analysen gerechnet, die letztlich zusammengeführt werden und auf diese Weise das grafische Ergebnis einer fMRT-Untersuchung ausmachen.

Eine zweite Unterscheidung bezieht sich auf das Ausmaß der Analyse. Die generellste Analyse bezieht das gesamte Gehirn mit ein und wird als *Whole-Brain-Analyse* bezeichnet. Hierbei wird das gesamte Gehirn in Voxel eingeteilt, wobei für jede dieser Volumeneinheiten eine eigene Statistik berechnet wird. Eine Alternative in Bezug auf das Ausmaß besteht in Form der sog. *Region-of-Interest (ROI)-Analyse*. Im Zuge dieser Analyse werden vom Volumen her kleinere Bereiche genauer untersucht. Beide Varianten, wie auch weitere spezielle Aspekte hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse, werden in Kapitel 5.4.3⁶²⁸ thematisiert.

Generell erfolgt in den einzelnen Schritten die Fokussierung auf die kleinste Einheit der zugrunde liegenden dreidimensionalen Gehirnabbildung, den *Voxel*. Versteht man die grundlegende Idee hinter der Analyse, so kann man diese problemlos auf die Gesamtheit aller Voxel ausweiten. Je nach Art der Analyse kann sich die relevante Datenmenge aus mehreren hundert bis zu mehreren zehntausend solcher Voxel zusammensetzen, die Datenanalyse an sich bleibt jedoch unabhängig von der Anzahl betrachteter Voxel unverändert.

Kapitel 5.4.1 bezieht sich auf die *Whole-Brain-Analyse* und setzt inhaltlich an dem Punkt an, an dem die Rohdaten die verschiedenen Vorverarbeitungsschritte⁶²⁹ durchlaufen haben und nun im Sinne einer statistischen Datenanalyse auf signifikante Aktivierungen bzw. Deaktivierungen untersucht werden können.

5.4.1 Einzelanalyse

Wie bereits erwähnt, besteht das Ziel der Analyse von fMRT-Daten darin, aktivierte bzw. deaktivierete Gehirnbereiche herauszustellen. Bevor auf einzelne Analyseverfahren

⁶²⁵ vgl. Friston K. J.; Holmes, A. P.; Worsley, K. J.; Poline, J.-B.; Frith, C. D.; Frackowiak, R. S. J. (1994)

⁶²⁶ im Englischen *1st-Level-* bzw. *Single-Subject-Analysis* genannt

⁶²⁷ im Englischen als *2nd-Level-* bzw. *Group-Analysis* bezeichnet

⁶²⁸ Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

⁶²⁹ vgl. Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Rohdaten

ren eingegangen wird, gilt es zunächst die gegenwärtige Situation festzuhalten. Nach der Vorverarbeitung der Rohdaten liegen für jeden betrachteten Voxel *BOLD-Signal-Zeitreihen* vor, d.h. dass jeder Voxel zu mehreren Zeitpunkten in Bezug auf das BOLD-Signal gemessen wurde. Des Weiteren ist die zeitliche Taktung der verschiedenen experimentellen Bedingungen⁶³⁰ bekannt, d.h. man kann zeitlich genau zuordnen, wann welcher Stimulus präsent war.

In Kapitel 5.2.1⁶³¹ wurde bereits die *Subtraktionslogik* angesprochen. Vor diesem Hintergrund könnte man sich vorstellen, dass der *t-Test für unabhängige Stichproben*⁶³² bei der Verfolgung des generellen Ziels weiterhelfen kann. Hierbei können zwei Gruppen (bzw. Bedingungen) anhand ihrer Mittelwertdifferenz auf signifikante Unterschiede getestet werden. Kern des Tests ist die Berechnung des t-Werts und der Vergleich dieser berechneten Größe mit einer konkreten t-Verteilung. Der t-Wert lässt sich folgendermaßen darstellen:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\hat{\sigma}_{(\bar{X}_1 - \bar{X}_2)}} \quad 633$$

Der t-Wert stellt folglich die Differenz der Mittelwerte relativiert an ihrer Variation dar. In den Nenner fließen die Abweichungen innerhalb beider Gruppen (bzw. Bedingungen) mit ein. Im Vergleich zu einer weniger aussagekräftigen einfachen Differenzbildung der Mittelwerte kann aufgrund dieser Vorgehensweise eine Aussage über die Signifikanz des Unterschiedes getroffen werden. Wie in Kapitel 5.1.2⁶³⁴ dargestellt wurde, korrespondiert das gemessene BOLD-Signal mit der hämodynamischen Veränderung in Folge neuronaler Aktivität. Allerdings weist diese hämodynamische Antwortfunktion (HRF) einen charakteristischen Verlauf auf⁶³⁵, der durch unterschiedliche Signalintensitäten über die Zeit gekennzeichnet ist. Dieser graduelle Verlauf kann über den beschriebenen t-Test nicht modelliert werden. „*While the t-test can be applied to many fMRI studies, it cannot be used to analyse the shape of the hemodynamic response.*“⁶³⁶

Eine besser geeignete Analysemöglichkeit stellt die *Korrelationsanalyse*⁶³⁷ dar. „*Eine Korrelationsanalyse ist zur Auswertung von fMRT-Daten mit kleinen TR-Werten und schnellen Signalveränderungen besser geeignet als ein Mittelwertsvergleich (t-Test), da die Korrelation den graduellen Kurvenverlauf modellieren kann, der Mittelwertsvergleich jedoch nicht.*“⁶³⁸ „*Der beschriebene t-Test ist für Mittelwertdifferenzen als Spezialfall der Varianzanalyse für qualitative (kategoriale) unabhängige Variablen geeignet, d.h. für unabhängige Variablen mit wenigen diskreten Abstufungen. Die*

⁶³⁰ Jede experimentelle Bedingung wird durch mehrere, ihr zugehörige, Stimuli repräsentiert.

⁶³¹ vgl. Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

⁶³² vgl. Bortz, J. (2005), S. 140 ff.

⁶³³ ebenda, S. 141

⁶³⁴ vgl. Kapitel 5.1.2 Signalentstehung

⁶³⁵ vgl. Abbildung 54: Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem kurzen Stimulus)

⁶³⁶ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 338

⁶³⁷ vgl. Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 36 f.; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S.338 ff.

⁶³⁸ Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 37

*Korrelationsanalyse ist hingegen zur Auswertung von quantitativen unabhängigen Variablen geeignet, d.h. für unabhängige Variablen, die kontinuierlich variieren.*⁶³⁹

Die kontinuierliche unabhängige Variable im Rahmen der Korrelationsanalyse ist die Modellierung des erwarteten Kurvenverlaufs für eine konkrete Bedingung (z.B. SA-Signal vorhanden). Da man die Zeitpunkte kennt, an denen Stimuli der betreffenden Bedingung (alle Stimuli, die ein SA-Signal enthalten) präsentiert wurden, ist es mit einem *Modell für die hämodynamische Antwortfunktion* möglich, den Signalverlauf über die Erhebungszeit zu modellieren, der sich in Folge der Bedingung (SA-Signal vorhanden) in den Daten zeigen sollte. Anders ausgedrückt erfolgt für die Erstellung der kontinuierlichen unabhängigen Variable eine Verknüpfung des experimentellen Designs mit einer Schätzfunktion für die hämodynamische Reaktion. Analysetechnisch wird für jedes Voxel geprüft, ob und wie gut dieser geschätzte Signalverlauf (unabhängige Variable) mit dem tatsächlich erfassten Signalverlauf (abhängige Variable) über alle Messzeitpunkte übereinstimmt. Die abhängige Variable ist in Abbildung 67 beispielhaft dargestellt. Für jeden Voxel erfolgen im Zuge einer Untersuchung wiederholte Messungen des BOLD-Signals. Im Ergebnis erhält man für jeden Voxel eine Zeitreihe, die durch die Variation zwischen stärkeren und schwächeren Signalen gekennzeichnet ist.

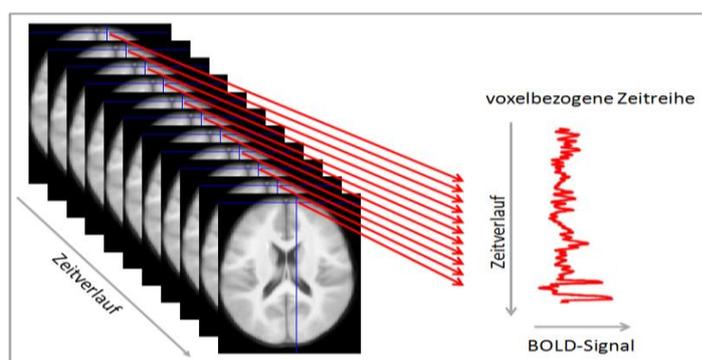


Abbildung 67: Tatsächlich erfasste BOLD-Signal-Zeitreihe für einen Voxel (eigene Darstellung)

Die zugrundeliegende Idee der Korrelationsanalyse ist in Abbildung 68 anschaulich dargelegt. Im Ergebnis der Korrelationsanalyse lässt sich festhalten, wie stark beide Signalverläufe bzw. Zeitreihen kovariieren. Entwickeln sich beide Verläufe gleichmäßig zueinander (beide steigen bzw. fallen gemeinsam), ergibt sich ein positiver Korrelationskoeffizient. Verhalten sich beide Verläufe entgegengesetzt zueinander (der eine Verlauf steigt, während der andere fällt und umgekehrt), so liegt eine negative Korrelation vor. Beläuft sich die Korrelation hingegen auf einen Wert von Null bzw. nahe Null, so deutet dies darauf hin, dass beide Verläufe unabhängig voneinander sind. Es liegt folglich keine Beziehung zwischen dem erwarteten und dem beobachteten Verlauf vor. Der geschätzte Signalverlauf in Kombination mit der konkreten experimentellen Bedingung (SA-Signal vorhanden) hat in diesem Fall nichts mit der tatsächlich gemessenen BOLD-Signal-Zeitreihe zu tun. Wie im hypothetischen Beispiel aus Abbildung 68 zu erkennen ist, stimmen die geschätzte Funktion (rot) und die tatsächliche Funktion (blau) relativ gut überein. Beide Verläufe verhalten sich weitest-

⁶³⁹ Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 36

gehend gleichmäßig zueinander, daher erhält man für dieses Beispiel einen relativ hohen Korrelationskoeffizient ($r = 0.81$).

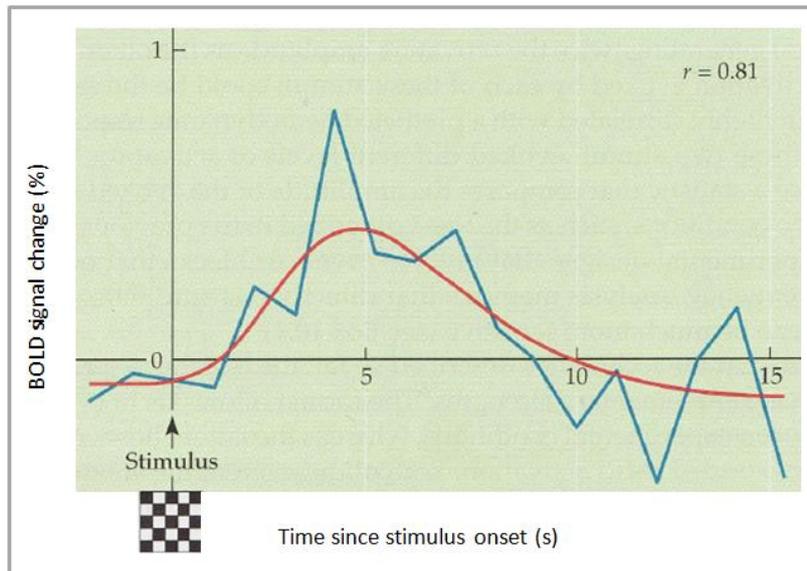


Abbildung 68: Vergleich eines geschätzten (rot) mit dem hypothetisch gemittelten erhobenen Signalverlauf (blau)⁶⁴⁰

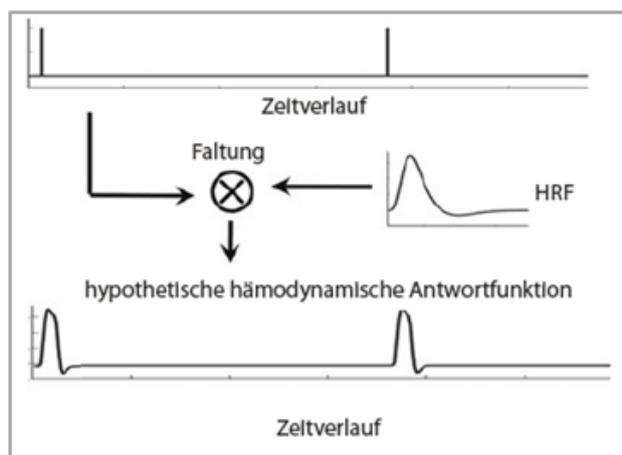
Beide bisher betrachteten Analysemöglichkeiten weisen Eigenschaften auf die für sich alleine genommen noch nicht zu dem hier angestrebten Ziel führen. Der t-Test erlaubt generell die Darstellung von Kontrasten, die Korrelationsanalyse ermöglicht hingegen die Modellierung des erwarteten Signalverlaufs. Ein Ansatz der beide Eigenschaften zielführend im Sinne der fMRT-Datenanalyse verbindet, berechnet zunächst ein *Allgemeines Lineares Modell (ALM)* und führt auf diesen Ergebnissen aufbauend z.B. einen t-Test bzw. t-Kontrast durch. „Kernstück des ALM ist die multiple Korrelationsanalyse, mit welcher der Zusammenhang einer Kriteriumsvariable (gemessene Voxelzeitreihe) mit beliebig vielen Prädiktorvariablen (Modellzeitreihen, welche die verschiedenen Bedingungen repräsentieren) erfasst werden kann.“⁶⁴¹ Dies ist insofern hilfreich, da es bei den meisten Experimenten mehr als zwei experimentelle Bedingungen bzw. Einflussgrößen gibt.⁶⁴² Das Vorgehen bei der Anwendung des ALM ist vergleichbar mit dem der beschriebenen Korrelationsanalyse. Der generelle Unterschied besteht in der Anzahl der Prädiktoren⁶⁴³. Gegeben im Sinne einer abhängigen Variable ist die gemessene BOLD-Signal-Zeitreihe für jeden Voxel. Gesucht sind diejenigen Prädiktoren bzw. diejenige Kombination an Prädiktoren, mit deren Hilfe die Variation in diesen Zeitreihen erklärt werden kann. Für die Erzeugung der Prädiktoren erfolgt, wie in Abbildung 69 dargestellt, eine *Konvolution*, also eine Faltung, in der die Kennwerte des experimentellen Designs (z.B. wann ist eine bestimmte Bedingung aktiv gewesen) mit der verwendeten Schätzfunktion verbunden werden, um die sog. Design-Matrix zu generieren.

⁶⁴⁰ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 339

⁶⁴¹ Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 38

⁶⁴² Der t-Test und auch die einfache Korrelationsanalyse bieten sich vor allem dann an, wenn es nur zwei Bedingungen miteinander zu vergleichen gilt.

⁶⁴³ Synonyme: Regressoren, unabhängige Variablen, erklärende Variablen

Abbildung 69: Konvolution⁶⁴⁴

In Abbildung 69 liegen zwei Ereignisse im Zeitverlauf vor. Die Schätzfunktion für das BOLD-Signal ist mit HRF bezeichnet. Kennt man das zeitliche Auftreten eines Ereignisses und hat man eine Vermutung über den Verlauf des Signals, so können beide Informationen verbunden bzw. gefaltet werden, um den Signalverlauf über die Zeit zu beschreiben. Der unterste Teil von Abbildung 69 stellt beispielhaft einen Prädiktor als Teil der Design-Matrix dar. Bei der Konstruktion der Prädiktoren ist von zentraler Bedeutung, dass die jeweils verwendete Schätzfunktion bzw. der modellierte Signalverlauf in der Lage ist, die tatsächliche Aktivierung, die in Folge der Bedingung auftreten würde, zu erfassen. Zur Veranschaulichung dieser zentralen Aussage kann man sich folgendes einfaches Experiment⁶⁴⁵ vorstellen. Eine Person sieht für jeweils 2 Sekunden Bilder, auf denen unterschiedliche Objekte dargestellt sind. Zwischen der Präsentation zweier Bilder liegt ein Interstimulus-Intervall (ISI) von 20-30 Sekunden. Die Person soll die Bilder betrachten und sich anschließend konkret an vergangene Erfahrungen mit diesen Objekten erinnern. Im Zuge der Datenanalyse können zwar erhöhte Aktivierungen im visuellen Cortex verzeichnet werden, in gedächtnisbezogenen Arealen allerdings nicht. Dieses unerwartete Ergebnis kann dadurch zustande kommen, dass der Prozess des Erinnerungsabrufs im Rahmen der Design-Matrix nicht adäquat modelliert wurde. Normalerweise dauert es je nach Komplexität mindestens 5-15 Sekunden, um sich an ein bestimmtes Ereignis zu erinnern. Dieser Prozess kann zudem auch eine längere neuronale Aktivierung mit sich bringen als eine einfache Reizung (bspw. länger als 20 Sekunden). Ist die neuronale Abbildung dieses Prozess von Interesse, so kann sich eine unzureichende Modellierung sehr negativ auf das Ergebnis einer fMRT-Untersuchung auswirken. Bei der Erstellung der Design-Matrix geht es folglich nicht nur um die Berücksichtigung der On- und Off-Taktungen der einzelnen experimentellen Bedingungen, sondern vor allem auch darum, die infolge eines Stimulus oder einer Aufgabenstellung erwartete Aktivierung realitätsnah über angemessene Schätzfunktionen zu modellieren. „*This example il-*

⁶⁴⁴ Sommer, T. (2011), S. 245

⁶⁴⁵ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 351

*illustrates the importance of thinking about the regressors in a design matrix as predictors of the BOLD time course, evoked by hypothesized neuronal activity.*⁶⁴⁶

Bei der Frage nach einer adäquaten Schätzfunktion geht es um die Frage der angemessenen Modellierung der hämodynamischen Antwort. Um das BOLD-Signal im Rahmen eines experimentellen Designs zu schätzen, wird generell eine sog. *kanonische (natürliche) hämodynamische Antwortfunktion (HRF)* verwendet. Dieser Verlauf bzw. diese Funktion zeigt die Reaktion von Nervenzellen auf kurze intensive Perioden neuronaler Stimulationen, die durch das BOLD-Signal widergespiegelt wird. Der typische Verlauf der kanonische HRF hat seinen Höhepunkt nach ca. 6 Sekunden und klingt dann in einer etwas längeren Abschwungphase wieder ab.⁶⁴⁷ Je nach den Eigenschaften eines fMRT-Experiments und dem untersuchten Prozess kann der erwartete Verlauf des BOLD-Signals variieren. Analyseprogramme bieten daher verschiedene Optionen für die Schätzfunktion an.⁶⁴⁸

In Hinblick auf die Auswahl *relevanter Regressoren* kann man zwischen interessanten, störenden und weiteren Regressoren unterscheiden.⁶⁴⁹ Interessant sind diejenigen Regressoren, die die hämodynamischen Veränderungen für die einzelnen experimentellen Bedingungen schätzen. Ein konkretes Beispiel für einen interessanten Regressor aus der eigenen Untersuchung stellt die Schätzung für den Verlauf des BOLD-Signals dar, der in Folge der Einblendung von Sonderangeboten (Bedingung *SA-Signal vorhanden*) erwartet wird. Neben diesen zentralen Regressoren können auch Stör-Regressoren generiert werden. Hierbei versucht man Störgrößen, die unabhängig vom experimentellen Design auftreten, zu berücksichtigen. Bspw. könnte man die Atmung, einen linearen Drift⁶⁵⁰ oder ähnliches versuchen zu modellieren. Fließen derartige Verzerrungen in die gemessenen Signale mit ein, so kann man sie über die Schätzung dieser Stör-Regressoren wieder heraus rechnen. Im Ergebnis wird die Schätzung der interessanten Regressoren besser, da die Verzerrung aufgefangen wird. Zusätzlich zu den genannten Regressoren besteht auch die Möglichkeit, kleine Verzögerungen der Antwortfunktion⁶⁵¹ oder leichte Veränderung die Verlaufsform der Antwortfunktion betreffend⁶⁵² im Rahmen eines Regressors zu modellieren. Je besser die Modellierung der Design-Matrix bzw. je besser die Berücksichtigung relevanter Regressoren gelingt, desto besser werden die Modellparameter geschätzt. Im Sinne einer multiple Regressionsgleichung i.V.m. dem ALM lässt sich das allgemeine Modell folgendermaßen berechnen:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n + \varepsilon \quad 653.$$

⁶⁴⁶ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 351

⁶⁴⁷ vgl. Abbildung 54: Typischer Verlauf eines BOLD-Signals (i.V.m. einem kurzen Stimulus)

⁶⁴⁸ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 352 f.

⁶⁴⁹ vgl. ebenda, S. 349 ff.

⁶⁵⁰ Einen Anstieg oder Abfall im MR-Signal über die Zeit.

⁶⁵¹ Das BOLD-Signal beginnt erst 2 Sekunden nach Präsentation eines Stimulus.

⁶⁵² Theoretisch kann auch der Verlauf der Antwortfunktion ausgedehnt werden.

⁶⁵³ angelehnt an Bühner, M.; Ziegler, M. (2009), S. 639

Die abhängige Variable (y) lässt sich als Linearkombination aus den Prädiktoren (x_i) mit ihren jeweiligen Regressionsgewichten (β_i) und dem Messfehler (ε) darstellen, wobei der Erwartungswert von ε gleich 0 ist. Hierbei indizieren die β -Parameter, wie viel von jedem Prädiktor in die Gleichung einfließen muss, damit y angemessen abgebildet werden kann. Anders ausgedrückt geben sie an, welchen Beitrag die einzelnen Prädiktoren zur Reproduktion von y leisten. Diesen Teil der rechten Gleichungsseite bezeichnet man auch als das eigentliche Modell, welches generell das Ziel verfolgt, die gesamte Variation in y zu erklären. In den beiden folgenden Gleichungen kommt diese Perspektive deutlicher zum Vorschein:

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_K x_K$$

$$\sum_{k=1}^K \varepsilon_k^2 = \sum_{k=1}^K [y - (\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \dots + \hat{\beta}_K x_K)]^2 \rightarrow \min$$

654

Da die vollständige Erklärung der abhängigen Variable sehr unwahrscheinlich ist, liegt das formale Ziel bei der Schätzung der Modellparameter ($\hat{\beta}_i$) in der Minimierung der Residuen bzw. Messfehler. Im Zuge des ALM werden daher die einzelnen $\hat{\beta}$ -Parameter so geschätzt, dass sie in ihrer Kombination eine minimale quadratische Abweichung zu y aufweisen. Das zentrale Anliegen des ALM besteht darin, herauszufiltern, welcher Prädiktor (x_i) zur Erklärung der abhängigen Variable (y) beiträgt. Da jedoch in Bezug auf die Erklärung der gemessenen BOLD-Signal-Zeitreihen (y_i) Prädiktoren in Form geschätzter Signalverläufe modelliert werden, ist die einfache Regressionsgleichung für den fMRT-Kontext durch das folgende Bündel an Matrizen zu ersetzen:

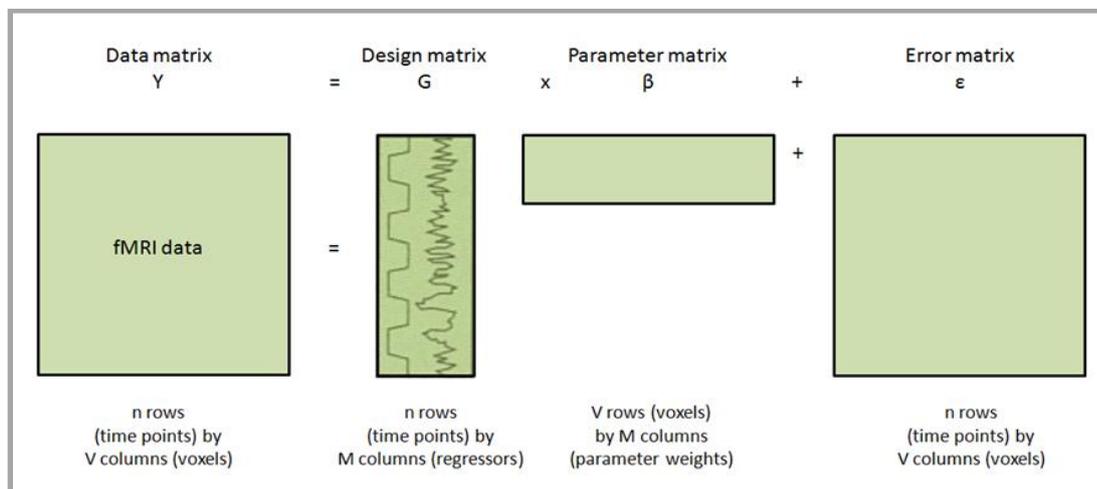


Abbildung 70: Matrixbezogene Darstellung der Modellgleichung im Falle einer fMRT-Datenanalyse⁶⁵⁵

Abbildung 70 zeigt die unterschiedlichen Komponenten der Modellgleichung. Die *Data-Matrix* repräsentiert die tatsächlich erfassten Signal-Zeitreihen, also die abhängige Variable, die es über die Prädiktoren zu schätzen bzw. erklären gilt. In den Zeilen stehen die einzelnen Messpunkte, in den Spalten die Voxel. Diese gegebene Infor-

⁶⁵⁴ angelehnt an Backhaus, K.; Erichson, B.; Plinke, W.; Weiber, R. (2011), S. 69

⁶⁵⁵ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 344

mation soll über den rechten Teil des Gleichungssystems reproduziert werden. Auf dieser Seite der Gleichung befinden sich die Design-Matrix, die Parameter-Matrix und die Fehler-Matrix. Grundlage für die Durchführung des ALM ist die Spezifikation der bereits angesprochenen *Design-Matrix*. Hier werden die Informationen aus dem experimentellen Design mit geschätzten Funktionsverläufen für die einzelnen Prädiktoren im Sinne einer Konvolution verbunden, um die entsprechenden β -Werte für die Prädiktoren zu schätzen. Die Design-Matrix (G) wird auch als Modell bezeichnet, da sie aus allen konstruierten Prädiktoren gebildet wird. Im besten Fall handelt es sich bei der erstellten Design-Matrix um das Modell, das die Variation in der abhängige Variable (y) erklären kann. In den Zeilen befinden sich ebenfalls die unterschiedlichen Messpunkte, in den Spalten sind die einzelnen Prädiktoren gelistet. Die *Parameter-Matrix*, die sich auf die zu schätzenden β -Werte bezieht, führt in den Zeilen die betrachteten Voxel und in den Spalten die zu den Prädiktoren gehörenden β -Parameter. Die letzte Matrix der rechten Gleichungsseite ist die *Fehler-Matrix*. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die einzelnen β -Parameter wie auch die Messfehler (ϵ) für jeden Voxel separat geschätzt werden. „Die Fehlerwerte sind die Abweichungen zwischen der vom Modell vorhergesagten und der tatsächlichen gemessenen Zeitreihe.“⁶⁵⁶

In Matrix-Schreibweise lässt sich das multivariate Allgemeine lineare Modell wie folgt ausdrücken:

$$Y = G\beta + \epsilon \quad 657$$

Das zur Schätzung verwendete Modell ist für alle Voxel gleich, allerdings können und sollen sich die geschätzten Parameter zwischen den Voxeln unterscheiden. Generell gilt, dass sich die Daten-Matrix in Folge einer fMRT-Messung ergibt, die Design-Matrix durch den Forscher modelliert wird und die Parameter- und Fehler-Matrix im Rahmen der Schätzung generiert werden.

Eine mathematischere Darstellung des ALM-Gleichungssystems aus der Perspektive eines einzelnen Voxel sieht wie folgt aus:

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_j \\ \vdots \\ Y_J \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{11} & \dots & X_{1l} & \dots & X_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{j1} & \dots & X_{jl} & \dots & X_{jL} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{J1} & \dots & X_{Jl} & \dots & X_{JL} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_l \\ \vdots \\ \beta_L \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_1 \\ \vdots \\ \epsilon_j \\ \vdots \\ \epsilon_J \end{pmatrix} \quad 658$$

Hierbei stellt Y die gemessene Zeitreihe innerhalb eines Voxels dar. Im Index von Y spiegeln sich die einzelnen Messpunkte wider. Bei der Design-Matrix (X) beschreibt der erste Index die unterschiedlichen Messpunkte (1 bis J) und der zweite Index die

⁶⁵⁶ Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 38

⁶⁵⁷ angelehnt an Friston, K. J. et al. (1994), S. 191

⁶⁵⁸ Kellermann, T. (2007), S. 22

definierten Prädiktoren. Der Spaltenvektor β ist an die entsprechenden Prädiktoren gekoppelt, der Spaltenvektor ϵ an die Messpunkte.

Über Abbildung 71 kann der Prozess, der im Rahmen der Schätzung abläuft, gut nachempfunden werden. Nachdem die einzelnen Prädiktoren über die Konvolution modelliert wurden, werden die zugehörigen Modellparameter geschätzt.

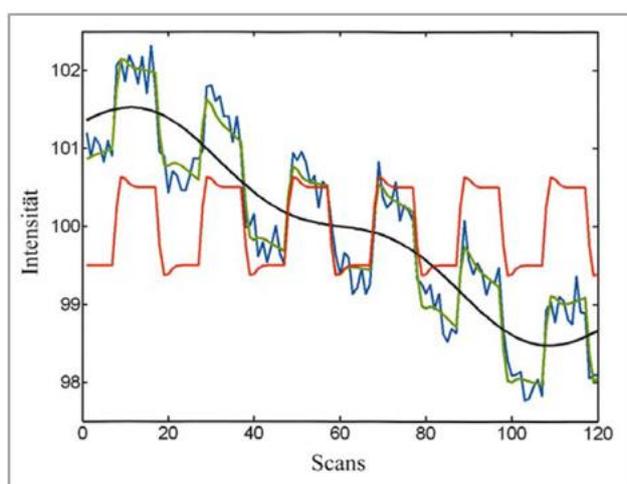


Abbildung 71: Grafische Veranschaulichung der Schätzung der Modellparameter⁶⁵⁹

In Abbildung 71 erfolgt die Erklärung der gemessenen BOLD-Signal-Zeitreihe (blau) über die Kombination eines interessanten Regressors in Bezug auf eine experimentelle Bedingung (rot) und eines zusätzlichen Regressors bspw. im Sinne langwelliger Drifts (schwarz). Kombiniert man beide Schätzfunktionen (grün), so beschreiben sie gemeinsam die Messdaten (blau) bis auf residuales Rauschen. Entsprechend ihrer Erklärkraft werden die Modellparameter geschätzt.

Generell kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass die Anwendung des *Allgemeinen linearen Modells* (ALM) den Kern fast jeder fMRT-Datenanalyse bildet. Die Schätzung des ALM ermöglicht zwar eine Aussage über die Erklärkraft der Prädiktoren, doch dies allein reicht noch nicht aus, um herauszustellen, welche Gehirnbereiche in einem bestimmten Kontext eine höhere Aktivierung bzw. Deaktivierung aufweisen. Die fMRT liefert im Ergebnis keine Information über die absolute Aktivierung im Sinne einer fixen Aktivierungsskala, sondern ist lediglich in der Lage, voxelweise die relative Signal- bzw. Aktivitätsveränderung über die Zeit abzubilden.⁶⁶⁰ Aus diesem Grund ist der Vergleich zwischen zwei Bedingungen bzw. Prädiktoren für die Erreichung des Analyseziels unabdingbar. Nur durch den *Kontrast* zweier unterschiedlicher Bedingungen lässt sich die Aktivierungsfrage sinnvoll klären. In der eigenen Untersuchung, die in Kapitel 6 und 7 noch genauer dargestellt wird, geht es bspw. um die Beantwortung der Frage, welches neuronale Aktivierungsmuster die Präsentation von Sonderangebotssignalen (SA-Signalen) im Rahmen von Kaufangeboten mit sich bringt. Die Untersuchung zielt folglich auf die neuronale Repräsentation von SA-Signalen ab. Um dies herauszustellen, wird für jeden Voxel untersucht, ob

⁶⁵⁹ Wohlschläger, A.; Kellermann, T., (2013), S. 161

⁶⁶⁰ vgl. Kapitel 5.3.1 Signal und Rauschen

die Bedingung A (SA-Signal vorhanden) zu einer stärkeren bzw. schwächeren Aktivierung führt als Bedingung B (kein SA-Signal vorhanden).

Doch welche Werte werden auf welche Weise miteinander verglichen? Die Antwort auf diese Frage liegt in der *Kombination des ALM mit einem t-Test bzw. t-Kontrast*. Abbildung 72 visualisiert die Verbindung, die es im Nachfolgenden noch zu erläutern gilt.

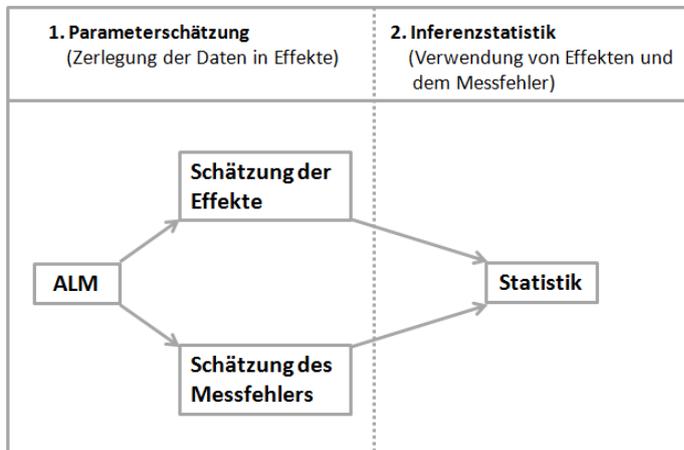


Abbildung 72: Kombination des ALM und des t-Test im Sinne der fMRT-Datenanalyse (eigene Darstellung)

Das Vorgehen beim ALM als Basis der Datenanalyse wurde bereits dargestellt. Der Kern des ALM besteht in der konstruierten Design-Matrix, die alle denkbaren Regressoren berücksichtigt und mit deren Hilfe herausgestellt werden soll, wie stark jeder einzelne Regressor zur Erklärung der gemessenen BOLD-Signal-Zeitreihen beiträgt. Im Ergebnis der Anwendung des ALM erhält man für jeden Voxel die entsprechenden $\hat{\beta}$ -Gewichte für alle definierten Regressoren und eine Auskunft über die jeweilige *residuale Varianz*. Regressoren, die in Bezug auf das gemessene BOLD-Signal eine hohe Erklärungskraft aufweisen, erhalten hohe $\hat{\beta}$ -Gewichte. Den Regressoren, die nur einen kleinen Beitrag zur Varianzerklärung leisten, werden entsprechend kleine $\hat{\beta}$ -Gewichte nahe Null zugeordnet. Genau diese $\hat{\beta}$ -Gewichte gilt es im Rahmen eines Kontrasts zu vergleichen. Für jeden Voxel wird z.B. $\hat{\beta}_{SA-Signal}$ mit $\hat{\beta}_{kein_SA-Signal}$ verglichen, um zu untersuchen, ob eine erhöhte bzw. verringerte Aktivität in einer der beiden Bedingungen vorliegt. Da der einfache Vergleich der beiden β -Gewichte nur eine geringe Aussagekraft besitzt, muss mit Hilfe geeigneter Analysen herausgestellt werden, ob ein statistisch signifikanter (Aktivierungs-)Unterschied vorliegt oder nicht. Einen Signifikanztest in diesem Sinne stellt der bereits angesprochene *t-Test* dar. Die Differenz (D) zwischen den beiden Bedingungen kann folgendermaßen formalisiert werden:

$$D = C_{SA-Signal} * \hat{\beta}_{SA-Signal} + (-C_{kein_SA-Signal}) * \hat{\beta}_{kein_SA-Signal} \quad 661$$

Hierbei repräsentieren die beiden $\hat{\beta}$ -Gewichte die geschätzten Betawerte für die zu vergleichenden Bedingungen *SA-Signal* und *kein SA-Signal* und $C_{SA-Signal}$ und $C_{kein_SA-Signal}$ die jeweiligen Kontrastgewichte. Beide Bedingungen erhalten absolut

⁶⁶¹ angelehnt an Plassmann, H. (2006), S. 136

gesehen das Kontrastgewicht 1. Die *Bedingung SA-Signal* erhält allerdings ein positives Gewicht (+1 bzw. C), die *Bedingung kein SA-Signal* hingegen ein negatives Gewicht (-1 bzw. -C). Da t-Kontraste gerichtet sind, untersucht der beschriebene Kontrast inhaltlich für jeden Voxel, ob eine erhöhte Aktivität im Zusammenhang mit SA-Signalen (verglichen mit der Bedingung kein SA-Signal) vorliegt. Die beiden Kontrastgewichte definieren den Kontrastvektor, der mit [+1 -1] angegeben werden kann. Über die Kontrastdefinition lassen sich generell drei unterschiedliche Hypothesen überprüfen⁶⁶². Allgemein besteht die Möglichkeit zu untersuchen, ob eine einzelne Bedingung eine signifikante Veränderung im BOLD-Signal bewirkt. In diesem Fall würde man alle anderen Regressoren vernachlässigen und nur einen speziellen Regressor in den Vordergrund rücken. Allerdings gilt hierbei Folgendes zu berücksichtigen: „*Note that these single-condition contrasts, often referred to as main effects of a condition, can lack experimental control. Significant increases in one condition could arise from any of a host of factors, from visual stimulation to arousal.*“⁶⁶³ Genau aus diesem Grund werden i.d.R. zwei Bedingungen miteinander verglichen. Durch dieses Vorgehen folgt man der *Subtraktionslogik*. Dieser Vergleich kann über den t-Test vorgenommen werden, weshalb auch von einem t-Kontrast gesprochen wird. Des Weiteren ist es ebenso möglich, mehrere Kontraste miteinander zu verbinden. Diese Perspektive kann über einen F-Test bzw. F-Kontrast analysiert werden.

Da im Rahmen der eigenen Untersuchung nur mit t-Kontrasten gearbeitet wird, ist der F-Kontrast an dieser Stelle zu vernachlässigen. Der Fokus liegt folglich auf dem *t-Kontrast*. „*Ziel der Anwendung des studentischen t-Tests in diesem Kontext ist die Untersuchung, ob signifikante Aktivierungsunterschiede in den beiden Bedingungen A und B vorliegen.*“⁶⁶⁴ Anders ausgedrückt, wird der Frage nachgegangen, ob die erfasste BOLD-Signal-Zeitreihe für einen bestimmten Voxel stärker durch die eine Bedingung erklärt wird als durch die andere. Um über die Signifikanz der Differenz der beteiligten $\hat{\beta}$ -Gewichte entscheiden zu können, muss die betrachtete Differenz nun in Relation zum Messfehler gesetzt werden, der ebenfalls im Zuge der Parameterschätzung berechnet wurde. Der t-Kontrast vergleicht folglich voxelweise zwei Bedingungen über die jeweiligen Regressionsgewichte relativiert an ihrer Standardabweichung. Im Ergebnis erhält man für jeden Voxel einen t-Wert, der anhand eines kritischen Wertes aus der entsprechenden t-Verteilung zu beurteilen ist:

$$t = \frac{\hat{\beta}_A - \hat{\beta}_B}{\sqrt{\hat{\sigma}_{\hat{\beta}_A - \hat{\beta}_B}^2}} \quad .$$

⁶⁶² vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 354 ff.

⁶⁶³ ebenda, S. 355

⁶⁶⁴ Plassmann, H. (2006), S. 136

⁶⁶⁵ ebenda, S. 137

In Matrixnotation kann der t-Wert folgendermaßen abgebildet werden:

$$t = \frac{c^T \hat{\beta}}{\sqrt{\text{Var}(\varepsilon) c^T (X^T X)^{-1} c}} \quad 666$$

Im Zähler befindet sich das Produkt aus Kontrast- und Beta-Vektor. Dies spiegelt die weiter oben besprochene Differenz der beiden beteiligten Bedingungen wider. Im Nenner ist faktisch der Standardfehler von $c^T \hat{\beta}$ definiert, der die Variation der betrachteten Größe beschreibt.⁶⁶⁷

Im Zuge dieses t-Tests können bspw. folgende Hypothesen aufgestellt werden:

$$H_0 : \hat{\beta}_A = \hat{\beta}_B$$

$$H_A : \hat{\beta}_A > \hat{\beta}_B \quad 668$$

Gilt H_0 , so deutet dies darauf hin, dass es keinen signifikanten Effekt gibt, d.h. die $\hat{\beta}$ -Werte für die zu vergleichenden Bedingungen unterscheiden sich nicht signifikant. Für den betrachteten Voxel liegt folglich keine signifikante Aktivierung im Fall von Bedingung A (verglichen mit Bedingung B) vor. Kann H_0 hingegen verworfen werden und gilt somit H_A , so kann für einen konkreten Voxel ein Aktivierungsunterschied herausgestellt werden.

Im *statistischen Test* kommt die Signifikanz i.d.R. als Wahrscheinlichkeit (p) zum Ausdruck, mit der das Ergebnis unter Gültigkeit der Null-Hypothese zustande kommen kann.⁶⁶⁹ Ist diese Wahrscheinlichkeit sehr klein, so kann H_0 verworfen werden und für das betreffende Voxel eine signifikante Aktivierung verzeichnet werden. Werden Gehirnbereiche farblich gekennzeichnet, bedeutet dies, dass die Nullhypothese an diesen Bereichen im Rahmen einer gewissen Irrtumswahrscheinlichkeit verworfen werden kann. Je heller und intensiver die Farben hierbei sind, desto niedriger die Wahrscheinlichkeit, dass die Nullhypothese gültig ist bzw. desto geringer die Irrtumswahrscheinlichkeit für den Fall der Ablehnung von H_0 . Unter der Irrtumswahrscheinlichkeit (α) versteht man generell die Wahrscheinlichkeit, im Rahmen der Entscheidungsfindung einen α -Fehler zu begehen. Der α -Fehler liegt vor, wenn die Alternativhypothese angenommen wird, obwohl in Wirklichkeit H_0 gültig ist.⁶⁷⁰ In Abbildung 73 sind die unterschiedlichen Situationen nachzuempfinden, die sich aus der Logik des statistischen Tests heraus ergeben.

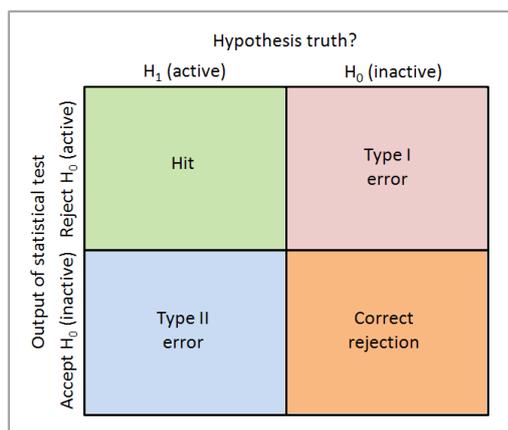
⁶⁶⁶ angelehnt an Goebel, R.; Kriegeskorte, N. (2005b), S. 40

⁶⁶⁷ vgl. ebenda, S. 40

⁶⁶⁸ Plassmann, H. (2006), S. 136

⁶⁶⁹ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 332; Brosius, F. (2011), S. 485 f.

⁶⁷⁰ vgl. Fahrmeir, L.; Künstler, R.; Pigeot, I.; Tutz, G. (2011), S. 416; Bühner, M.; Ziegler, M. (2009), S. 143 ff.; Bortz, J.; Schuster, C. (2010), S. 100

Abbildung 73: Entscheidungen im statistischen Test⁶⁷¹

Im Zusammenhang mit der fMRT-Datenanalyse kann der α -Fehler bzw. Type I error als eine *falsch positiv Aktivierung* bezeichnet werden. Eine signifikante Aktivierung wird in diesem Fall zwar angezeigt, aber in Wirklichkeit gilt dies für den betroffenen Voxel nicht. Kann für einen bestimmten Voxel eine relativ geringe Irrtumswahrscheinlichkeit festgestellt werden, so kann von einer signifikanten Aktivierung ausgegangen werden.⁶⁷² Die farbliche Markierung von Gehirnbereichen, im Sinne des grafischen Ergebnisses einer fMRT-Untersuchung, bedeutet, dass die Irrtumswahrscheinlichkeit in Bezug auf die jeweiligen Voxel unter einem vorher festgelegten Schwellenwert (i.V.m. der Whole-Brain-Analyse i.d.R. $\alpha = 0.001$ unkorrigiert⁶⁷³) liegt. „Die Gesamtheit aller signifikanten Bildpunkte ergibt die sog. „t-Karte“ und die Wahrscheinlichkeit der Aktivierung wird durch sog. Grauwertkodierung ausgedrückt. T-Karten setzen die Aktivierungsstärke in Relation zur Signalvariation.“⁶⁷⁴ Abbildung 74 zeigt im Sinne der grafischen Ergebnisdarstellung beispielhaft eine t-Karte aus der eigenen Untersuchung. Im Rahmen des betrachteten t-Kontrasts wurden zwei Bedingungen (*Mehrere Produkte vs. Einzelprodukt*) gegeneinander kontrastiert und die Voxel bzw. Voxel-Cluster⁶⁷⁵ farblich markiert, die einen, im eben beschriebenen Sinne, signifikanten Aktivierungsunterschied aufweisen. In Abbildung 74 sind die Aktivierungen sowohl im Sagittalschnitt (S), im Coronarschnitt (C) und auch im Horizontalschnitt (H) dargestellt.⁶⁷⁶

⁶⁷¹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 333

⁶⁷² H_0 kann in diesem Fall mit einer geringen Irrtumswahrscheinlichkeit verworfen werden.

⁶⁷³ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 333

⁶⁷⁴ Plassmann, H. (2006), S. 137

⁶⁷⁵ Ein *Voxel-Cluster* stellt eine Ansammlung von aneinander liegenden aktivierten Voxeln dar.

⁶⁷⁶ vgl. Kapitel 3.1.1 Allgemeines zur Gehirnanatomie

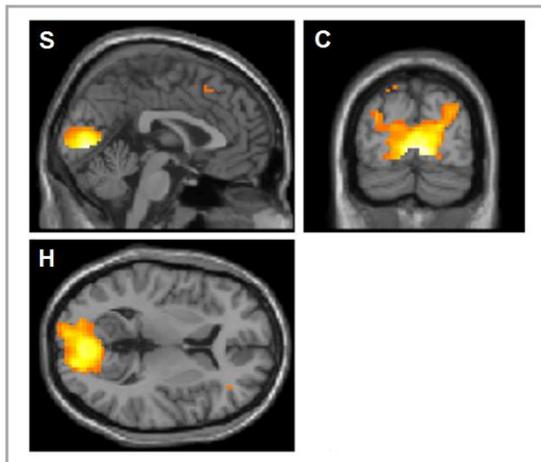


Abbildung 74: Beispielhafte t-Karte aus der eigenen Untersuchung⁶⁷⁷

In Bezug auf den Coronschnitt (C) ist noch die Frage zu klären, welche Konvention hinsichtlich der Darstellung der linken und rechten Hemisphäre verwendet wird. Ohne Kenntnis der verwendeten Konvention kann nicht festgestellt werden, welches die linke und welches die rechte Hemisphäre darstellt. Im Rahmen der eigenen Untersuchung wurde die *neurologische Konvention* gewählt, da sie eine intuitivere Interpretation ermöglicht.⁶⁷⁸

Tabelle 2 stellt beispielhaft eine statistische Tabelle auf Peak-Level⁶⁷⁹ dar, die neben der t-Karte im Rahmen der Ergebnisdarstellung erzeugt werden kann. An dieser Stelle ist eine detaillierte Betrachtung jedoch nicht von Interesse, da die statistische Tabelle im Zusammenhang mit der Whole-Brain-Analyse lediglich die grafische t-Karte in Form von Zahlen und Koordinaten widerspiegelt. Tabelle 2 berichtet die *MNI-Koordinaten*, da im Rahmen der eigenen Untersuchung mit dem Programm *SPM8*⁶⁸⁰ gearbeitet wurde und hier im Zuge der Normalisierung mit MNI-Standardgehirnen⁶⁸¹ gearbeitet wird.

peak-level			MNI coordinates		
<i>T</i>	<i>Z</i>	<i>p_{uncorr}</i>	<i>x</i>	<i>y</i>	<i>Z</i>
8.49	6.50	0.000	3	-78	-3
7.78	6.14	0.000	-6	-81	-3
6.55	5.45	0.000	15	-87	3
...
...

Tabelle 2: Nachbildung einer statistischen Tabelle

⁶⁷⁷ Die Abbildung stammt aus der Ergebnisdarstellung der Gruppenanalyse und soll an dieser Stelle nur als Veranschaulichung für die t-Karte dienen.

⁶⁷⁸ vgl. Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁶⁷⁹ Das *Peak-Level* berichtet die signifikanten Aktivierungen für einzelne Voxel. Des Weiteren werden auch das *Cluster-* und das *Set-Level* angezeigt, welche größere Ausdehnungen von Aktivierungen melden. In Tabelle 2 geht es um die generelle Darstellung der statistischen Tabelle, daher wurden das Cluster- und Set-Level hier nicht angegeben.

⁶⁸⁰ Wellcome Trust Centre for Neuroimaging: Statistical Parametric Mapping 8 (SPM8), London, UK, <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>

⁶⁸¹ vgl. <http://imaging.mrc-cbu.cam.ac.uk/imaging/Templates> (abgerufen am 16.03.2014)

5.4.2 Gruppenanalyse

Wie bereits angesprochen, besteht das primäre Interesse der Datenanalyse in verallgemeinerbaren Aussagen über Gehirnaktivierungen. Nachdem die fundamentalen Analyseschritte im Rahmen der Einzelanalyse aufgearbeitet wurden, geht es nun darum, diese Grundlage auf die Gruppenanalyse auszuweiten. Bevor es jedoch um die Auseinandersetzung mit der konkreten Analyse geht, sei an dieser Stelle noch einmal kurz an die unabdingbare Voraussetzung hinsichtlich der Gruppenanalyse erinnert. Diese Voraussetzung besteht in der *Normalisierung der Daten*, auf die im Zuge der Vorverarbeitung⁶⁸² bereits eingegangen wurde. Über die Normalisierung der Daten wird gewährleistet, dass sich die Daten der einzelnen Personen auf denselben Ergebnisraum beziehen und daher vergleichbar sind. Nur in diesem Fall ist eine sinnvolle Bündelung der einzelnen Personen in Form einer Gruppenanalyse möglich. „*Even if one is confident that the same brain region is identified in all subjects, ..., a theoretical problem remains: that of how to combine data from that region in multiple subjects, into a single statistical test.*“⁶⁸³ Um die Informationen mehrerer Personen aus der Einzelanalyse zu verknüpfen und hinsichtlich eines Gruppeneffektes zu untersuchen, bieten sich generell zwei Varianten an. Bei diesen Möglichkeiten handelt es sich zum einen um die *Fixed-Effects-Analyse* und zum anderen um die *Random-Effects-Analyse*.

Bevor es um die Details geht, soll zunächst ein einfaches Beispiel⁶⁸⁴ dargestellt werden, um den zentralen Unterschied beider Vorgehensweisen herauszustellen. In einer fMRT-Untersuchung werden acht Testpersonen zwei Stimuli-Blöcke präsentiert. Der erste Block stellt die Kontrollbedingung dar, der zweite Block die Experimentalbedingung. Im Zuge der Messung werden für jede Person pro Block 10 Datenpunkte erfasst. Im Ergebnis wird jede Person durch insgesamt 20 Datenpunkte abgebildet. Auf acht Testpersonen hochgerechnet, ergibt dies insgesamt 80 Datenpunkte für die Kontrollbedingung und ebenfalls 80 Datenpunkte für die Experimentalbedingung.

Im Rahmen der ersten Variante, der sog. *Fixed-Effects-Analyse*, werden die Datenpunkte aller Personen in einer Analyse gebündelt. Über einen t-Test können hierbei bspw. die 80 Datenpunkte i.V.m. der Kontrollbedingung den 80 Datenpunkten gegenüber gestellt werden, die stellvertretend für die Experimentalbedingung stehen. „*These approaches are known as fixed-effects analyses (...), because they assume that the experimental effect is fixed, or constant across subjects, apart from the influence of random noise.*“⁶⁸⁵ Bezogen auf fMRT-Daten wird in dieser Variante davon ausgegangen, dass die Experimentalbedingung in jeder Person den gleichen Einfluss auf dessen BOLD-Signal ausübt. Anders ausgedrückt bedeutet dies, dass der Effekt einer bestimmten Bedingung über alle Personen vergleichbar ist. Der Effekt zeigt sich bei jeder Person in der gleichen Intensität. Es gibt folglich keine nennenswerten Unterschiede bzw. Abweichungen zwischen den einzelnen Personen. Wie in Abbildung 75 veranschaulicht, werden die Daten (Zeitreihen) der einzelnen Perso-

⁶⁸² vgl. Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁶⁸³ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 365

⁶⁸⁴ vgl. ebenda, S. 365 f.

⁶⁸⁵ ebenda, S. 365

nen, aufgrund der Annahme konstanter Effekte, zunächst gemittelt. Anschließend wird für diesen gemittelten Datensatz ein Signifikanztest, z.B. ein t-Test, berechnet. Im Ergebnis werden diejenigen Gehirnbereiche farblich markiert, die eine signifikante Aktivierung aufweisen.

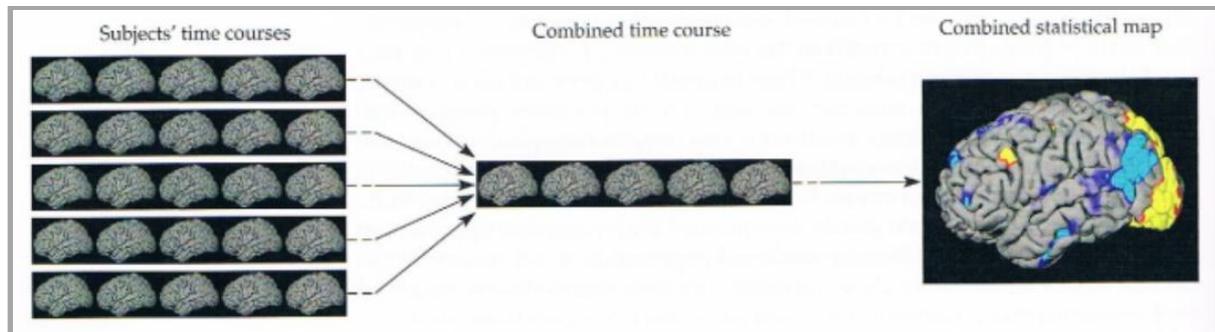


Abbildung 75: Grafische Veranschaulichung des Ablaufs im Zusammenhang mit einer Fixed-Effects-Analyse⁶⁸⁶

In den ersten fMRT-Studien wurde häufig auf die Fixed-Effects-Analyse zurückgegriffen. Mittlerweile hat sich dies geändert, da sie einen zentralen Nachteil aufweist. Die Aussagekraft der Statistik, die im Zuge der Fixed-Effects-Analyse erzeugt wird, ist auf die betrachtete Stichprobe begrenzt und kann in diesem Sinne nicht auf die Grundgesamtheit bzw. Population verallgemeinert werden. Im Bezug auf das anfänglich dargestellte Beispiel könnte man sich vorstellen, dass zwei Testpersonen sehr hohe Werte bei der experimentellen Bedingung aufweisen, für die restlichen sechs Probanden hingegen nur kleine Werte gemessen werden konnten. Nach Durchschnittsbildung über alle Daten erhält man für den t-Test einen signifikanten Aktivierungsunterschied für die experimentelle Bedingung im Vergleich zur Kontrollbedingung. Es ist leicht ersichtlich, dass sich das Ergebnis des t-Tests auf Gruppenebene nicht mit den Daten der einzelnen Personen deckt. Werden die acht Personen einzeln betrachtet, so liegt für 75% der Stichprobe tatsächlich keine nennenswerte Aktivierung vor, da sechs der acht Personen im dargestellten Fall nur kleine Werte aufweisen. *„This contradiction results from the sensitivity of fixed-effects models to extreme results from individual subjects. Under the assumption that the experimental manipulation affects all subjects similarly, the best estimate for its true effect is the mean of the data from all subjects. But, if the manipulation does not affect all subjects similarly, then the mean value might be misleading.“*⁶⁸⁷

Die zweite Variante hinsichtlich der Gruppenanalyse besteht in der sog. *Random-Effects-Analyse*. Im Gegensatz zur Fixed-Effects-Analyse stellt sie einen Ansatz dar, mit dessen Hilfe es möglich ist, Rückschlüsse auf die zugrunde liegende Population zu ziehen. Der zentrale inhaltliche Unterschied besteht darin, dass hier auch die Variation des Effektes zwischen den Personen Berücksichtigung findet. *„Each subject can be considered as one of many possible subjects who could have participated in the experiment. The experimental manipulation could have a different effect on each of these potential subjects; that is, some could have a large BOLD response, while*

⁶⁸⁶ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 366

⁶⁸⁷ ebenda, S. 366

*others could have a small BOLD response.*⁶⁸⁸ Aufgrund der Annahme, dass der Effekt zwischen den einzelnen Personen variiert, gestaltet sich das Vorgehen im Zuge der Analyse anders als bei der Fixed-Effects-Analyse. Im Fall der Random-Effects-Analyse wird in einem ersten Schritt für jede Person eine separate statistische Abbildung erzeugt. Im Ergebnis eines t-Kontrastes wird bspw. für jede Person eine t-Karte erstellt, die über ihre farblichen Markierungen anzeigt, welche Gehirnregionen bei der betrachteten Person signifikante Aktivierungen aufweisen. Diese t-Werte werden in sog. Kontrast-Bildern⁶⁸⁹ gespeichert, die letztlich die Ergebnisse der Einzelanalyse zum Ausdruck bringen. Diese Kontrast-Bilder stellen die Datengrundlage für die Gruppenanalyse dar. Über dieses, in Abbildung 76 dargestellte, Vorgehen kann neben der Varianz innerhalb einer Person auch die Varianz zwischen den Personen mit in die Analyse des Gruppeneffektes einfließen.

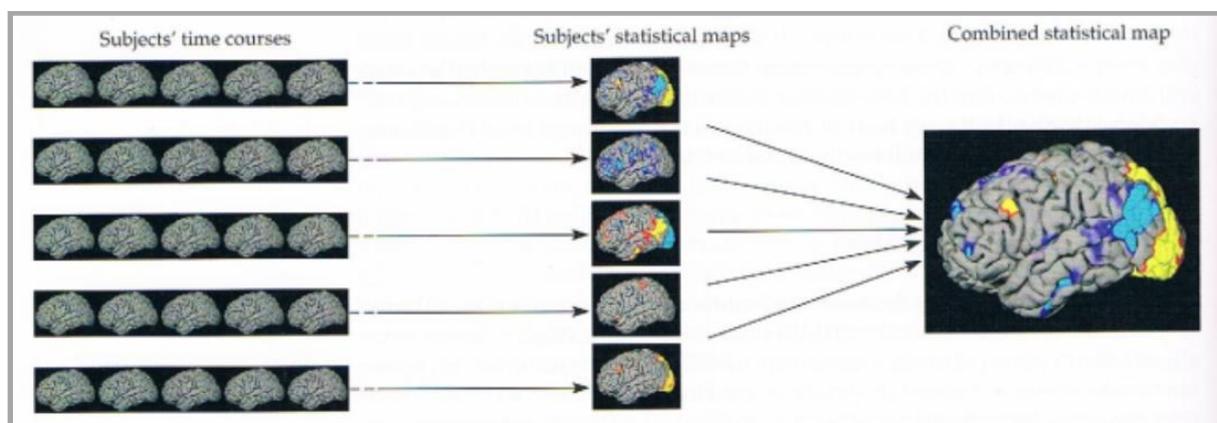


Abbildung 76: Grafische Veranschaulichung der Random-Effects-Analyse⁶⁹⁰

In Abbildung 77 zeigt sich die Konsequenz, die sich aus der Verwendung der Fixed-Effects-Analyse im Vergleich zur Random-Effects-Analyse ergibt. In (a) sind die Ergebnisse der Einzelanalyse von fünf Personen abgebildet. Man kann erkennen, dass die Aktivierungen keinesfalls identisch, teilweise sogar sehr unterschiedlich sind. Im Rahmen der Fixed-Effects-Analyse werden die Ergebnisse der Einzelanalyse gemittelt und anschließend auf Signifikanz untersucht. Dieses Vorgehen hat den Nachteil, dass Personen mit hohen Aktivierungswerten stärker in die Analyse einfließen und somit tendenziell mehrere signifikante Aktivierungen auf Gruppenebene gemeldet werden (b). Wählt man hingegen die Random-Effects-Analyse so ergibt sich im Vergleich eine konservativere, aber in diesem Fall realistischere Gruppenstatistik (c).

⁶⁸⁸ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 366

⁶⁸⁹ Kontrast-Bilder beinhalten die Signalunterschiede zwischen zwei oder mehreren Bedingungen.

⁶⁹⁰ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 366

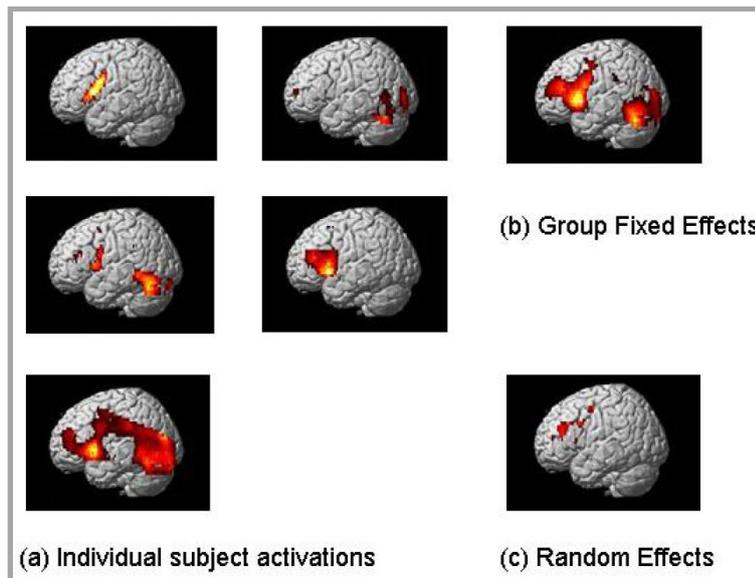


Abbildung 77: Fixed-Effects-Analyse vs. Random-Effects-Analyse⁶⁹¹

Um den Unterschied zwischen Fixed-Effects- und Random-Effects-Analyse auf eine andere Art herauszustellen, empfiehlt es sich, die in den einzelnen Analysen berücksichtigten Varianzkomponenten genauer zu betrachten.⁶⁹² Der Unterschied beider Varianten besteht in der Antwort auf die Frage, welche Komponenten in die Effektbeurteilung auf Gruppenebene mit einfließen. Da für jede Person mehrere Messungen vorliegen, setzt sich der Effekt d_{ij} (Effekt von Person i für den j -ten betrachteten Effekt) im Falle der *Fixed-Effects-Analyse* aus dem mittleren Effekt von Person i (d_i) und der Varianz innerhalb von Person i ⁶⁹³ zusammen:

$$d_{ij} = d_i + e_{ij} \quad 694.$$

Da im Rahmen der Fixed-Effects-Analyse davon ausgegangen wird, dass sich ein Effekt bei jeder Person auf dieselbe Weise zeigt und dieser folglich nicht über die Personen variiert, wird die Varianz zwischen den Personen bei der Effektschätzung nicht berücksichtigt. Im Gegensatz dazu wird d_{ij} im Zuge der *Random-Effects-Analyse* über zwei Ebenen beschrieben. Die erste Ebene ist identisch mit der Sichtweise der Fixed-Effects-Analyse. Auch hier wird d_{ij} als Summe des mittleren Effektes von Person i (d_i) und der Varianz innerhalb von Person i (e_{ij}) verstanden. Der definitive Unterschied in Bezug auf d_{ij} zeigt sich erst auf der zweiten Ebene. Diese Ebene bezieht die Varianz zwischen den Personen mit in die Betrachtung ein:

$$d_{ij} = d_i + e_{ij}$$

$$d_i = d_{\text{pop}} + z_i \quad 695.$$

Die Erweiterung im Vergleich zur Perspektive der Fixed-Effects-Analyse besteht darin, dass der mittlere Effekt einer Person (d_i) im Vergleich zur Gruppe nicht als fix

⁶⁹¹ Penny, W. D.; Holmes, A. J. (2004), S. 845

⁶⁹² vgl. ebenda, S. 846 ff.

⁶⁹³ auch Scanvarianz bzw. Between-Scan-Varianz genannt

⁶⁹⁴ Penny, W. D.; Holmes, A. J. (2004), S. 847

⁶⁹⁵ ebenda, S. 848

verstanden wird, sondern vielmehr davon ausgegangen wird, dass ein Effekt bei verschiedenen Personen unterschiedlich stark zum Ausdruck kommen kann. Der mittlere Effekt einer Person (d_{ij}) besteht hierbei aus einem mittleren Populationseffekt (d_{pop}) und der zusätzlichen Variation dieses Effektes über die Personen (z_i). Konsequenterweise fließt der wahre mittlere Effekt von Person i (\bar{d}_i) folgendermaßen in die Gruppenanalyse ein:

$$\bar{d}_i = d_{pop} + z_i + e_i \quad 696.$$

Im Ergebnis der Random-Effects-Analyse beinhaltet der mittlere Populationseffekt folglich sowohl die Varianz innerhalb einer Person⁶⁹⁷ als auch die Varianz zwischen den Personen⁶⁹⁸.

Zusammenfassend kann in Bezug auf die Gruppenanalyse festgehalten werden, dass im Rahmen der Fixed-Effects-Analyse lediglich Rückschlüsse auf die betrachtete Stichprobe gezogen werden können. Über die Stichprobe hinaus, kann keine Aussage getroffen werden. Dies ist in Form einer Random-Effects-Analyse möglich. Allerdings ist zu beachten, „... *that the subject population for many fMRI studies may itself be unrepresentative, in that the subjects tend to be college-age, intelligent, physically healthy, and neurologically normal. The use of random-effects analyses does not allow extension of results to those individuals who are not within the subject population (e.g., the elderly, children, or patient groups).*“⁶⁹⁹ Dennoch sollte aus den Ausführungen deutlich geworden sein, dass in Bezug auf die Gruppenanalyse eine Random-Effects-Analyse wärmstens zu empfehlen ist, wenn verallgemeinerbare Aussagen angestrebt werden.

Aus den genannten Gründen erfolgt im Rahmen der fMRT-Datenanalyse auch im Zuge der eigenen Untersuchung⁷⁰⁰ zunächst eine Einzelanalyse, woran sich in einem zweiten Schritt eine Gruppenanalyse im Sinne einer Random-Effects-Analyse anschließt. Es bleibt noch zu erwähnen, dass sich die Ergebnisdarstellung der Gruppenanalyse nicht von der bereits erläuterten Darstellung im Zuge der Einzelanalyse unterscheidet⁷⁰¹ und daher an dieser Stelle nicht explizit dargestellt wird.

5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

Nachdem im Rahmen von Kapitel 5.4.1 und 5.4.2 die grundlegenden analysetechnischen Sachverhalte aufgearbeitet wurden, geht es an dieser Stelle darum, spezielle Herausforderungen der fMRT-Datenanalyse zu thematisieren. Im Anschluss an die Erläuterung der einzelnen Aspekte erfolgt die Beschreibung der Vorgehensweise hinsichtlich der Datenanalyse der eigenen fMRT-Untersuchung. Gerade aufgrund der

⁶⁹⁶ Penny, W. D.; Holmes, A. J. (2004), S. 848

⁶⁹⁷ Die Varianz innerhalb einer Person wird im Rahmen der Einzelanalyse generiert.

⁶⁹⁸ Die Varianz zwischen den Personen wird im Zuge der Gruppenanalyse erschlossen.

⁶⁹⁹ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 367

⁷⁰⁰ vgl. Kapitel 6.4 Anmerkungen zur Erhebung, Vorverarbeitung und Analyse der Daten

⁷⁰¹ vgl. Kapitel 5.4.1 Einzelanalyse

Berücksichtigung der speziellen Sachverhalte ergibt sich die eigene Vorgehensweise, die einen seriösen Umgang mit den vorhandenen Herausforderungen darstellt.

Wie bereits im Rahmen von Kapitel 5.4.1 erläutert, wird bei fMRT-Datenanalysen mit einer voxelweisen Statistik gearbeitet. Für jeden einzelnen Voxel wird folglich eine Statistik berechnet bzw. ein statistischer Test durchgeführt, der im Ergebnis aussagt, ob in dem betrachteten Voxel eine signifikante Aktivierung vorliegt oder nicht. Bei dieser Entscheidung gibt es vier generelle Szenarien⁷⁰². Das Ziel besteht in einer korrekten Entscheidung. Entweder soll eine Aktivierung gemeldet werden, wenn eine Aktivierung tatsächlich vorliegt oder im Falle einer Nicht-Aktivierung keine Aktivierung angezeigt werden. Neben diesen beiden korrekten Entscheidungen können auch zwei Fehlentscheidungen getroffen werden. Der Fehler 1. Art oder α -Fehler⁷⁰³ bezieht sich auf den Fehler, eine Aktivierung zu melden, obwohl in Wirklichkeit keine Aktivierung vorliegt. Der Fehler 2. Art oder β -Fehler⁷⁰⁴ beschreibt die Situation, in der zwar keine Aktivierung detektiert wird, tatsächlich aber eine Aktivierung vorhanden ist. Diese Fehlentscheidungen spielen bei der fMRT-Datenanalyse eine wichtige Rolle, da im Zuge der Analyse oftmals mehrere tausend bis zu hunderttausend Tests durchgeführt werden. Diese Herausforderung ist als *Problem des multiplen Testens* bekannt. Kurz angemerkt sei an dieser Stelle, dass es sich hierbei nicht um ein spezielles Problem der fMRT-Datenanalyse handelt, sondern um ein generelles Problem statistischer Analysen. Es erhält allerdings im Rahmen der fMRT-Datenanalyse eine besondere Relevanz, da hier durch die große Anzahl an Tests die Konsequenzen dieser Problematik schwerwiegender sind als bei einer vergleichsweise geringen Anzahl durchzuführender Tests.

In Bezug auf den α -Fehler kann die Konsequenz des multiplen Testens aus zwei Perspektiven betrachtet werden. Wählt man die Perspektive der einzelnen Tests, und geht von einem Signifikanzniveau in Höhe von 5% aus⁷⁰⁵, so nimmt man damit bei 100.000 durchzuführenden Tests in Kauf, 5.000 falsch positiv Aktivierungen zu berichten. Im Vergleich dazu beträgt die Anzahl der erwarteten falsch positiv Aktivierungen bei 20.000 Tests *nur* 1.000. Geht man andererseits davon aus, dass für die einzelnen Tests eine Irrtumswahrscheinlichkeit (α) von 5% gilt und dies somit auch auf die Irrtumswahrscheinlichkeit in Bezug auf die Gesamtheit aller Tests übertragbar ist, täuscht man sich. Durch das multiple Testen in derselben Stichprobe kumuliert sich das Risiko einer Fehlentscheidung, was zu einer *Inflation des α -Fehlers* führt. Die Wahrscheinlichkeit liegt in diesem Fall nicht mehr bei 5%, sondern ist je nach Anzahl der durchgeführten Tests höher. Die tatsächliche Gesamtfehlerrate (α_{gesamt}) lässt sich mit folgender Formel berechnen:

$$\alpha_{\text{ges}} = 1 - (1 - \alpha)^k \quad 706.$$

⁷⁰² vgl. Abbildung 73: Entscheidungen im statistischen Test

⁷⁰³ Type I error

⁷⁰⁴ Type II error

⁷⁰⁵ Irrtumswahrscheinlichkeit (α) = 5%: Die Wahrscheinlichkeit einen α -Fehler zu begehen, liegt bei 5%.

⁷⁰⁶ angelehnt an Bühner, M.; Ziegler, M. (2009), S. 329

Das α im Klammersausdruck steht für die Irrtumswahrscheinlichkeit der Einzeltests, k steht für die Anzahl der Tests. Legt man für das individuelle α 5% fest und rechnet bspw. drei Tests, so liegt die Gesamtfehlerrate nicht mehr bei 5%, sondern bei etwas mehr als 14%. Die Wahrscheinlichkeit, eine falsch positiv Aktivierung zu melden, erhöht sich folglich durch das multiple Testen. Werden nicht drei sondern 100 Tests durchgeführt, so steigt die Gesamtfehlerrate sogar auf 99%. Eine falsche Entscheidung im Sinne des α -Fehlers ist in diesem Fall so gut wie unausweichlich. Die Inflation des α -Fehlers fällt folglich mit steigender Testanzahl immer drastischer aus.⁷⁰⁷ Unabhängig davon welche der beiden Perspektiven man in den Vordergrund rückt, steigt das Risiko von falsch positiv Aktivierungen durch multiples Testen, wobei kein Hinweis darauf gegeben werden kann, welche der letztlich detektierten Aktivierungen falsch positiv Aktivierungen darstellen. Aus diesen einleitenden Ausführungen kann bereits die Relevanz dieses Sachverhaltes hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse abgeleitet werden.

Um die Konsequenz einer Nichtberücksichtigung dieses Problems anhand einer konkreten fMRT-Studie deutlich herauszustellen, soll kurz auf die Untersuchung von *Bennett et al.*⁷⁰⁸ eingegangen werden. Im Rahmen dieses Experiments wurden den Probanden Fotos von Menschen in unterschiedlichen sozialen Situationen gezeigt. Jedes Foto wurde für 2,5 Sekunden präsentiert. Vier Fotos wurden nacheinander in Form eines Blocks gezeigt, der folglich 10 Sekunden andauerte. Nach einem Foto-Block folgte für 12 Sekunden eine Ruhephase. Anschließend wurde ein weiterer Foto-Block dargeboten, dem wiederum eine Ruhephase folgte. Insgesamt wurden den Probanden 12 Foto-Blöcke präsentiert. Die Aufgabe bestand darin, die Emotionen zu benennen, die die abgebildeten Personen jeweils empfanden. Im Zuge der fMRT-Datenanalyse wurde der Kontrast Fotos vs. Ruhephase analysiert. Im Ergebnis konnten die Gehirnbereiche abgebildet werden, die i.V.m der Bedingung Fotos im Vergleich zur Ruhebedingung stärker aktiviert waren. Das Besondere an dieser Untersuchung war der Proband. Es handelte sich um einen toten Atlantischen Lachs, der anscheinend menschliche Emotionen erkannt hatte, wie Abbildung 78 durch die Aktivierungen zum Ausdruck bringt.

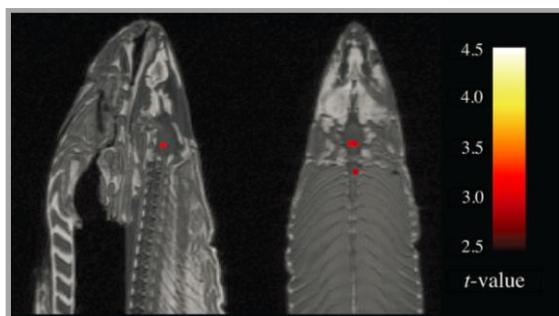


Abbildung 78: t-Karte aus der Studie von Bennett et al. (2010)⁷⁰⁹

⁷⁰⁷ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 357; Bühner, M.; Ziegler, M. (2009), S. 329

⁷⁰⁸ vgl. Bennett, C. M.; Baird, A. A.; Miller, M. B.; Wolford, G. L. (2010)

⁷⁰⁹ ebenda, S. 4

Mit diesem Beispiel machten die Forscher zum einen auf die Bedeutung des Problems des multiplen Testens aufmerksam. Zum anderen kritisierten sie gleichzeitig diejenigen Forscher, die dieses Problem dadurch zu beheben glauben, dass sie das Signifikanzniveau standardmäßig auf $p < 0.001$ anheben. Die t-Karte in Abbildung 78 entstand auf Basis einer Whole-Brain-Analyse mit einem unkorrigierten Signifikanzniveau von $p < 0.001$. In der Folge dieser naiven Vorgehensweise werden Gehirnaktivierungen für einen toten Lachs berichtet. Genau derartige Fehlinterpretationen gilt es zu vermeiden. Nach diesem widersprüchlichen Ergebnis wurden die Daten erneut analysiert, nur dieses Mal unter Verwendung von Korrekturverfahren bezüglich des multiplen Testens⁷¹⁰. Im Ergebnis konnten dieses Mal für den toten Lachs keine signifikanten Aktivierungen gemeldet werden. *Bennett et al.* forderten zu Recht, dass im Rahmen der fMRT-Datenanalyse mit adäquaten Korrekturverfahren gearbeitet werden muss, um der Problematik des multiplen Testens angemessen Rechnung zu tragen. „*What we can conclude is that random noise in the EPI timeseries may yield spurious results if multiple testing is not controlled for.*“⁷¹¹

Gegenwärtig bestehen einige Korrekturverfahren, die dieses Problem auf unterschiedliche Weise berücksichtigen. Häufig eingesetzt wird hierbei eine Korrektur in Bezug auf die bereits angesprochene Gesamtfehlerrate (α_{gesamt}). Bei der Variante, die im englischsprachigen Raum auch mit *family wise error rate (FWER)* bezeichnet wird, geht es im Kern darum, die generelle Wahrscheinlichkeit für einen oder mehrere α -Fehler zu minimieren. „*Using the family-wise error rate of FWER = 0.05 would mean that there is a 5% chance of one or more false positives across the entire set of hypothesis tests.*“⁷¹²

Eine sehr bekannte Umsetzung der FWER-Korrektur besteht in der *Bonferroni-Korrektur*. Die Formel für die Bonferroni-Korrektur ist relativ simpel:

$$\alpha_{\text{individuell}} = \frac{\alpha_{\text{gesamt}}}{n} \quad 713.$$

Damit eine Gesamtfehlerrate von α_{gesamt} (generell 0.05) gilt, muss diese für alle Tests in Bezug auf die Anzahl der durchzuführenden Tests (n) korrigiert werden. Auf diese Weise kann $\alpha_{\text{individuell}}$ für jeden Test berechnet werden. Müssen bspw. im Zuge einer fMRT-Untersuchung 100.000 Test gerechnet werden, für die eine Gesamtfehlerrate von 0.05 gelten soll, so ergibt sich als Signifikanzniveau für jeden einzelnen Test $\alpha_{\text{individuell}} = 0.0000005$. Wie leicht ersichtlich ist, stellt die Bonferroni-Korrektur eine sehr konservative Variante dar. Auf der einen Seite wird dadurch zwar der Fehler 1. Art minimiert, d.h. die Wahrscheinlichkeit einer falsch positiv Aktivierung ist sehr gering. Auf der anderen Seite erhöht sich gleichzeitig die Gefahr, einen Fehler 2. Art zu begehen. Durch die konservative Korrektur ($\alpha_{\text{individuell}} = 0.0000005$) steigt die Wahr-

⁷¹⁰ Sie verwendeten sowohl eine FWER-Korrektur wie auch eine FDR-Korrektur (auf beide wird nachfolgend noch eingegangen). In beiden Fällen konnte korrekterweise keine Aktivierung mehr festgestellt werden.

⁷¹¹ Bennett, C. M. et al. (2010), S. 3

⁷¹² ebenda, S. 1

⁷¹³ angelehnt an Bühner, M.; Ziegler, M. (2009), S. 330

scheinlichkeit, eine schwächere aber in Wirklichkeit vorhandene Aktivierung nicht zu erkennen.⁷¹⁴ „For many research questions, especially those that are exploratory or have clinical relevance, an increased rate of Type II error may be unacceptable.“⁷¹⁵

Es bleibt festzuhalten, dass die Bonferroni-Korrektur für fMRT-Daten eine zu konservative Variante darstellt⁷¹⁶ und in diesem Sinne ungeeignet für die Kontrolle des multiplen Testens ist. Erklären lässt sich dies dadurch, dass die im Zusammenhang mit der Bonferroni-Korrektur vorausgesetzte Unabhängigkeit der statistischen Tests in Bezug auf fMRT-Daten nicht gegeben ist. „Grund hierfür ist, dass die mit der neuronalen Aktivität assoziierte Blutflussreaktion sich nicht auf einen Bildpunkt beschränkt und somit benachbarte Voxel stark miteinander korreliert sind.“⁷¹⁷ Eine weitere Erklärung für die Abhängigkeit der statistischen Tests resultiert aus der Vorverarbeitung der Daten. „Wegen der räumlichen Korrelation der Voxel, die durch Verarbeitungsschritte wie insbesondere die Glättung noch verstärkt wird, ist die Anzahl unabhängiger Beobachtungen viel kleiner als die Anzahl an Voxeln.“⁷¹⁸

Ein für fMRT-Daten passenderes Korrekturverfahren, das ebenfalls zur Klasse der FWER-Korrekturen zählt, beruht auf der Anwendung der *Theorie der Gaußfelder* bzw. *Gaussian Random Field Theory (GRFT)*. Diese berücksichtigt im Vergleich zur Bonferroni-Korrektur die bereits beschriebene Abhängigkeit der Voxel und ist daher im Ergebnis sensitiver für tatsächliche Aktivierungen. Um die GRFT anzuwenden, müssen zunächst die sog. *Resels* bzw. *resolution elements*⁷¹⁹ berechnet werden. Hierzu benötigt man die Information über die räumliche Korrelation der Voxel und die Anzahl der vorhandenen Voxel. In Bezug auf die Information über die räumliche Korrelation sind zwei Situationen zu unterscheiden. Entweder wurde im Vorfeld der Analyse der Vorverarbeitungsschritt des Glättens bzw. Smoothing durchgeführt⁷²⁰, der über die Verwendung eines Gaußfilters (gaussian kernel) die Voxel innerhalb der fMRT-Bilder in Bezug zu ihren Nachbar-Voxeln glättet. In diesem Fall kennt man die Eigenschaften des verwendeten Gaußfilters und hat somit die Information über die räumliche Korrelation der Voxel. Oder es erfolgte keine Glättung und es liegt noch keine konkrete Information über die räumliche Korrelation vor. Hierbei gilt: „If we do not know the smoothness, it can be calculated using the observed spatial correlation.“⁷²¹ Ist die Form des Gehirns und die Anzahl an Resel bekannt, kann auf Basis dieser Informationen anschließend die sog. *Euler-Charakteristik (EC)* aufgestellt werden. „Die Euler-Charakteristik liefert den korrigierten Schwellenwert eines Voxels für eine gewählte Irrtumswahrscheinlichkeit.“⁷²² „... the average or expected EC written $E [EC]$, corresponds (approximately) to the probability of finding an above threshold

⁷¹⁴ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 358; Plassmann, H. (2006), S. 139; Bennett, C. M. et al. (2010), S. 4

⁷¹⁵ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 358

⁷¹⁶ vgl. Logan, B. R.; Geliakzova, M. P.; Rowe, D. B. (2008), S. 1383 ff.

⁷¹⁷ Plassmann, H. (2006), S. 139

⁷¹⁸ Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 162

⁷¹⁹ Auflösungseinheiten

⁷²⁰ vgl. Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁷²¹ Brett, M.; Penny, W. D.; Kiebel, S. (2004), S. 872

⁷²² Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 162

blob in our statistic image. That is, the probability of a family wise error is approximately equivalent to the expected Euler Characteristic, $P^{FWE} \approx E[EC]$.⁷²³ „From the number of resels (...), one can estimate how many clusters of activation should be found by chance at a given statistical threshold. The number of such clusters is known as the expected Euler characteristic.“⁷²⁴ Für Daten, die im Rahmen der Vorverarbeitung geglättet wurden, ist dieser Schwellenwert im Vergleich zur Bonferroni-Korrektur deutlich liberaler. Im Ergebnis führt dies auf der einen Seite zu einer geringeren Wahrscheinlichkeit in Hinblick auf den Fehler 2. Art und auf der anderen Seite nur zu einer minimalen Erhöhung der Gefahr von zusätzlichen falsch positiv Aktivierungen.⁷²⁵ Fast alle fMRT-Untersuchungen verwenden eine Variante der Theorie der Gaußfelder um die Auswirkungen des multiplen Testens zu korrigieren. Neben der *family wise error rate (FWER)*-Korrektur besteht auch die Möglichkeit, das Problem des multiplen Testens durch eine *false discovery rate (FDR)*-Korrektur⁷²⁶ zu kontrollieren. Hierbei wird das Problem auf eine andere Weise angegangen. Die FDR-Korrektur lässt sich durch folgendes Verhältnis beschreiben:

$$FDR = \frac{V_{ia}}{V_{ia} + V_{aa}} = \frac{V_{ia}}{D_a} \quad 727$$

In der Formel steht V_{ia} für die Anzahl der falsch positiv Aktivierungen, V_{aa} für die Anzahl der tatsächlich positiv Aktivierungen und D_a für die Anzahl der gemeldeten/ positiv Aktivierungen. Die FDR kann folglich beschrieben werden als: „... *the proportion of declared-active voxels which are false positives*.“⁷²⁸ Im Rahmen dieses Korrekturverfahrens werden falsch positive Aktivierungen geduldet bzw. einkalkuliert. Genauer gesagt wird im Gegensatz zur FWER-Korrektur das Ausmaß der falsch positiv Aktivierungen kontrolliert. Liegen bspw. im Rahmen eine fMRT-Untersuchung 100 signifikant aktivierte Voxel bei einer FDR von 0.05 vor, so kann davon ausgegangen werden, dass fünf dieser Voxel falsch positiv Aktivierungen repräsentieren. Diese Korrektur sorgt dafür, dass die Anzahl der falsch positiv Aktivierungen im Verhältnis zu den tatsächlichen Aktivierungen klein bleibt.

Der Einsatz der FWER- wie auch der FDR-Korrektur bringt Vor- wie Nachteile mit sich. Generell kann festgehalten werden: „*Controlling the FWER does the best job of limiting false positives, but also comes at the greatest cost of statistical power. [...] FDR is a less conservative approach relative to FWER methods, but it may represent a more ideal balance between statistical power and multiple comparisons control*.“⁷²⁹ Unabhängig von der konkreten Auswahl eines Korrekturverfahrens ist es unabdingbar das Problem des multiplen Testens zu berücksichtigen. Es spielt im Rahmen der fMRT-Datenanalyse eine entscheidende Rolle. Erfolgt keine explizite Korrektur führt

⁷²³ Brett, M.; Penny, W. D.; Kiebel, S. (2004), S. 873

⁷²⁴ Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 362

⁷²⁵ vgl. ebenda, S. 362

⁷²⁶ vgl. Genovese, C. R.; Lazar, N. A.; Nichols, T. (2002)

⁷²⁷ ebenda, S. 871

⁷²⁸ ebenda, S. 872

⁷²⁹ Bennett, C. M. et al. (2010), S. 2

dies mit einer sehr großen Wahrscheinlichkeit zu stark verfälschten Ergebnissen. Wurden die fMRT-Daten im Zuge der Vorverarbeitung mit Hilfe eines Gaußfilters räumlich geglättet, so ist eine Korrektur über die Anwendung der *Random Field Theory (RFT)* zu empfehlen.⁷³⁰ Wurden die Daten nicht geglättet, so kann die Kontrolle der *false discovery rate (FDR)* sehr hilfreich sein.⁷³¹

Nachdem die Problematik des multiplen Testens ausführlich dargelegt wurde, kann die nächste Herausforderung auch dazu in Bezug gesetzt werden. Es geht um die Frage nach dem Ausmaß der statistischen Analyse. In Bezug auf das Ausmaß kann zwischen der *Analyse des gesamten Gehirns* bzw. *Whole-Brain-Analyse*⁷³² und der *Analyse kleinerer, im Vorfeld der Analyse definierter, Gehirnbereiche* bzw. *Region-of-Interest (ROI)-Analyse* unterschieden werden.

Ein zentraler Unterschied zwischen den beiden Analysen besteht im Ausmaß der Analyse bzw. der Anzahl durchzuführender Tests. Im Rahmen einer *Whole-Brain-Analyse* wird das gesamte Gehirn auf Aktivierungen untersucht. Diese Analyse umfasst daher, je nach Einstellung der Voxelgröße, mehrere zehntausend bis zu hunderttausend Voxel. Dieser explorative Ansatz hat den Vorteil, dass die Daten auch ohne detaillierte Hypothesen über aktivierte Gehirnbereiche untersucht werden können. Aufgrund der großen Anzahl an Tests besitzt die angesprochene Problematik des multiplen Testens im Rahmen dieser Analyse eine hohe Relevanz. Im Gegensatz dazu stellt die sog. *Region-of-Interest (ROI)-Analyse* einen systematischeren Ansatz dar. Das Ziel der Analyse besteht nicht mehr darin, das gesamte Gehirn nach Aktivierungen abzusuchen. Hier erfolgt vielmehr die Fokussierung auf deutlich kleinere Gehirnbereiche. Im Zuge der Analyse werden nun eher hunderte bis tausend Voxel getestet. Liegen im Zusammenhang mit einer experimentellen Fragestellung Vermutungen über eine Aktivierung in konkreten Gehirnregionen vor, so werden diese interessanten Bereiche zunächst definiert und dann entsprechend erhoben und analysiert. Bei der Definition der Regions of Interest (ROIs) bestehen zwei grundlegende Möglichkeiten. Häufig wird mit ROIs gearbeitet, die als Ergebnis funktioneller Untersuchungen berichtet wurden. Wird bspw. in Experiment A im Zusammenhang mit Angst bzw. Furcht eine Aktivierung der Amygdala herausgestellt, so könnte dieses funktionale Aktivierungsmuster im Rahmen von Experiment B, das in Bezug auf seine Fragestellung eine Aktivierung der Amygdala vermutet, als Vorlage für die ROI-Analyse dienen. Neben dieser funktionalen Vorlage kann man sich auch an einem Gehirnatlanten orientieren. Die interessierende Gehirnregion (z.B. die Amygdala) wird dann auf dieser anatomischen Grundlage definiert. Im Ergebnis liegt ebenfalls vor Durchführung der Messung eine definierte Analyseregion vor, die nach der Erhebung ausgewertet werden kann. Hinsichtlich der anatomischen Variante bestehen

⁷³⁰ vgl. Genovese, C. R.; Lazar, N. A.; Nichols, T. (2002), S. 871, S. 877; Bennett, C. M. et al. (2010), S. 3; Plassmann, H. (2006), S. 139; Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 362; Nichols, T.; Hayasaka, S. (2003), S. 427

⁷³¹ vgl. Genovese, C. R.; Lazar, N. A.; Nichols, T. (2002), S. 877

⁷³² In einigen Fällen wird die Whole-Brain-Analyse auch als „*voxelwise approach*“ bezeichnet.

allerdings unterschiedliche Bedenken.⁷³³ Die ROI-Analyse kann im Gegensatz zur Whole-Brain-Analyse als ein confirmatorischer Ansatz verstanden werden. Über diese Vorgehensweise können konkret formulierte Aktivierungshypothesen überprüft werden. Zudem verringert sich aufgrund der deutlich geringeren Anzahl an Tests das Risiko einer Fehlentscheidung durch das multiple Testen.

I.d.R. entscheiden sich Forscher für eine der beiden beschriebenen Analysen. Im besten Fall passt die jeweilige Entscheidung zum Untersuchungsziel. Verantwortlich für die Entscheidung sind allerdings nicht immer gut durchdachte Argumente.⁷³⁴ Vielmehr konnte bspw. festgehalten werden, dass der wissenschaftliche Hintergrund eines Forschers⁷³⁵, der geographische Standort⁷³⁶ und auch die zur Verfügung stehende statistische Software eine Rolle bei dieser Entscheidung spielen.

Der Vorteil der Whole-Brain-Analyse kommt vor allem in explorativen Untersuchungen zum Tragen, in denen noch kein bzw. geringes Wissen über die zugrunde liegenden neuronalen Prozesse existiert.⁷³⁷ Ebenfalls sinnvoll ist dieser Ansatz, wenn im Zusammenhang mit einer experimentellen Bedingung kein inhaltlich eindeutiger Kontrast verbunden ist. In solchen Fällen ist die Situation unklarer und es lassen sich daher schwer konkrete Hypothesen aufstellen, ohne evtl. relevante Gehirnbereiche außer Acht zu lassen.

Aufgrund der viel geringeren Anzahl an durchzuführenden Tests sind die Ergebnisse von ROI-Analysen aussagekräftiger als diejenigen, die im Zuge von Whole-Brain-Analysen gewonnen werden. ROI-Analysen stellen auf der einen Seite einen viel systematischeren Ansatz dar, da man gezwungen ist, konkrete theoriebezogene Hypothesen über relevante Gehirnregionen abzuleiten. Dieses Vorgehen birgt aber gleichzeitig die Gefahr wichtige, aber bisher nicht berücksichtigte, Gehirnregionen durch diese stark begrenzte Sicht auszublenden.⁷³⁸

Die generelle Herausforderung besteht darin, kein zu weites aber auch kein zu enges Vorgehen zu wählen. Es geht darum dasjenige Vorgehen zu wählen, welches am adäquatesten bei der Beantwortung der forschungsleitenden Fragestellung unterstützt.⁷³⁹

Im Rahmen der fMRT-Datenanalyse gibt es verschiedene Möglichkeiten, die zugrunde liegenden Daten auszuwerten. Unabhängig davon wie das konkrete Analyseziel aussieht, ist die bereits dargestellte Anwendung des ALM Grundlage fast jeder fMRT-Datenanalyse. Im Rahmen der eigenen Untersuchung geht es bspw. primär darum zu untersuchen, ob und wenn ja, welche Gehirnregionen im Zusammenhang mit ver-

⁷³³ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 364; Poldrack, R. A.; Mumford, J. A. (2009), S. 209 f.

⁷³⁴ vgl. Culham, J. C. (2006), S. 63 f.

⁷³⁵ Besitzen die Forscher auch PET-Erfahrung, so verwenden sie i.d.R. eher eine Whole-Brain-Analyse. Haben sich die Forscher bisher nur mit der fMRT beschäftigt, so tendieren sie zur ROI-Analyse.

⁷³⁶ Forscher aus Europa setzten meistens auf Whole-Brain-Analysen, Forscher aus Nordamerika verwenden meistens ROI-Analyse.

⁷³⁷ vgl. Culham, J. C. (2006), S. 64

⁷³⁸ vgl. ebenda, S. 64

⁷³⁹ vgl. Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 362 f.

schiedenen experimentellen Bedingungen signifikant aktiviert sind. Eine darüber hinausgehende Möglichkeit der Analyse besteht darin, Korrelationen zwischen Gehirnaktivierungen und bspw. Persönlichkeitsskalen (*personality measures* bzw. *behavioral measures*) zu untersuchen. Im Zusammenhang mit diesem Analysebereich thematisieren Vul et al.⁷⁴⁰ das *Abhängigkeitsproblem* bzw. den *nonindependence error*. Im Sinne einer Meta-Analyse untersuchten sie 55 fMRT-Studien, die signifikante Korrelationen zwischen Gehirnaktivierungen (A) und Persönlichkeitsskalen (B) berichten. Der Aufhänger dieser Meta-Analyse lag in rätselhaft hohen Korrelationen oberhalb von $r = 0.8$. Generelle Überlegungen bezüglich zu erwartender Korrelationen, die die Reliabilitäten der betreffenden Messungen im Sinne einer Obergrenze berücksichtigen, münden in folgende Formel:

$$r_{\text{ObservedA,ObservedB}} = r_{A,B} * \sqrt{\text{reliability}_A * \text{reliability}_B} \quad 741 .$$

Die Autoren argumentieren eine maximale Reliabilität für Messungen von Gehirnaktivität (A) von 0.7⁷⁴² und für Persönlichkeitsskalen (B) von 0.8.⁷⁴³ Setzt man diese Werte in die Formel ein und geht dabei von einer tatsächlichen Korrelation zwischen A und B ($r_{A,B}$) von 1.0 aus, so sollte maximal eine Korrelation von $r = 0.74$ beobachtet werden können. Im Rahmen der Meta-Analyse stellte sich heraus, dass viele der betrachteten Studien Korrelationen berichten, die über 0.74 liegen. Im Zusammenhang mit der genaueren Erforschung der einzelnen Studien hinsichtlich der Vorgehensweisen konnte Folgendes festgehalten werden: „*It is important to note that all of these studies also reported using the same data to compute the correlation that they initially used to select the subset of voxels.*“⁷⁴⁴ Das Vorgehen, um an die Korrelation zwischen einer Persönlichkeitsskala und der entsprechenden Gehirnaktivierung zu gelangen, kann folgendermaßen beschrieben werden.⁷⁴⁵ Zunächst werden Korrelationen zwischen der Persönlichkeitsskala und allen Voxeln erstellt. Von dieser Gesamtmenge werden diejenigen voxelbezogenen Korrelationen ausgewählt, die aufgrund ihrer Höhe einen Test zu einem festgelegten Signifikanzniveau überstehen. Nur aus den Voxeln mit den hohen Korrelationen wird der Mittelwert berechnet, der am Ende eine Korrelation von über 0.74 aufweist. Die hohen Korrelationen stellen verzerrte Messungen dar, da für die Selektion der entsprechenden Voxel und die Analyse des Effektes dieselben Daten verwendet werden. Die verwendeten Daten sind nicht unabhängig voneinander, was fälschlicherweise zur Annahme bedeutsamer Korrelationen verleitet. „*This approach amounts to selecting one or more voxels based on a functional analysis and then reporting the results of the same analysis*

⁷⁴⁰ vgl. Vul, E. et al. (2009)

⁷⁴¹ ebenda, S. 275

⁷⁴² Auch andere Autoren sind der Auffassung, dass die Reliabilität von fMRT-Messungen begrenzt ist und in diesem Sinne ein wichtiges Forschungsinteresse in der Verbesserung der Reliabilität von fMRT-Messungen liegen sollte. Vergleiche dazu bspw. die Untersuchung von *Fließbach, K.; Rohe, T.; Linder, N. S.; Trautner, P.; Elger, C. E.; Weber, B. (2010)*.

⁷⁴³ vgl. Vul, E. et al. (2009), S. 275 f.

⁷⁴⁴ ebenda, S. 278

⁷⁴⁵ vgl. ebenda, S. 278 f.

and functional data from just the selected voxels.“⁷⁴⁶ „In the case discussed in this article, correlations are both the selection criterion and the secondary statistics.“⁷⁴⁷ Poldrack & Mumford⁷⁴⁸ kommentieren den Artikel von Vul et al. im Sinne einer Gendarstellung. Sie teilen zwar nicht die Ansicht, dass Korrelationen in einem Bereich über 0.74 bereits unmöglich hoch sind, doch auch sie kommen zu folgendem Schluss: „Our analyses show that Vul et al. were correct that non-independent ROI analyses result in bias, ...“⁷⁴⁹.

Die dargestellte Vorgehensweise beschreibt das *Abhängigkeitsproblem* und seine Konsequenzen. Vul et al. unterstreichen, dass es sich beim beschriebenen Problem nicht um ein spezielles Problem der fMRT-Datenanalyse handelt und skizzieren diesbezüglich ein anschauliches Beispiel⁷⁵⁰ außerhalb des Neuroimaging. Im Zuge des Beispiels beschreiben sie ein Vorgehen, durch das im Ergebnis der Eindruck erweckt wird, dass die tägliche Temperaturmessung einer Wetterstation in der Lage ist, den sich verändernden Kurs von Aktien vorherzusagen ($r = -0,87$). Diese Abhängigkeitsproblematik besteht nicht nur, wenn es um Korrelationen zwischen Befragungsdaten und Gehirnaktivierungen geht, sondern auch im Zusammenhang mit anderen fMRT-Analysebereichen. Auch im Rahmen der ROI-Analyse gilt es bspw. diese Problematik durch eine entsprechend unabhängige Auswahl von ROI-Masken zu berücksichtigen.

Ein letzter spezieller Aspekt hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse betrifft im Sinne der Entscheidungsfindung die Fokussierung auf *clusterbezogene Aktivierungen*. Im Rahmen der Datenauswertung können die Ergebnisse, z.B. in Form signifikant aktivierter Voxel, auf Peak-Level, Cluster-Level und Set-Level angegeben werden. Hierbei bezieht sich das *Peak-Level* auf die Ebene der einzelnen Voxel. Auf *Cluster-Level* werden nur noch die Aktivierungen gemeldet, die sich über eine Ansammlung aneinander liegender Voxel erstrecken und insofern eine Ausdehnung der Aktivierung darstellen. Im Ergebnis wird der am stärksten aktivierte Voxel mit seinen Koordinaten und der entsprechenden Clustergröße berichtet. Das *Set-Level* bündelt wiederum mehrere Cluster und kann im Sinne eines Omnibus-Tests verstanden werden. Angestrebt werden sollten signifikante Ergebnisse auf Cluster-Level, da bekannt ist „...“, dass »echte« Aktivierungen normalerweise nicht nur einzelne Voxel, sondern benachbarte Voxel (sog. Cluster) aktivieren.“⁷⁵¹ „If only a single isolated voxel passed a significance threshold, then that voxel’s activation may result from mere chance. It is less likely, however, that a group of contiguous voxels will all be active by chance.“⁷⁵² „In summary, the likelihood of a false-positive result decreases with increasing cluster size.“⁷⁵³

⁷⁴⁶ Vul, E. et al. (2009), S. 279

⁷⁴⁷ ebenda, S. 282

⁷⁴⁸ vgl. Poldrack, R. A.; Mumford, J. A. (2009)

⁷⁴⁹ ebenda, S. 212

⁷⁵⁰ vgl. Vul, E. et al. (2009), S. 279 f.

⁷⁵¹ Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013), S. 162

⁷⁵² Huettel, S. A.; Song, A. W.; McCarthy, G. (2009), S. 360

⁷⁵³ ebenda, S. 361

Wohlschläger & Kellermann⁷⁵⁴ formulieren diesbezüglich einen interessanten Vorschlag, der anschließend im Rahmen der Darstellung der eigenen Vorgehensweise aufgegriffen wird. In einem ersten Schritt soll mit einem unkorrigierten Schwellenwert, z.B. $p < 0.001$, gearbeitet werden. In einem weiteren Schritt wird über die Anwendung der GRFT eine Korrektur vorgenommen und nur die Clusterebene berücksichtigt. „Je größer ein Cluster, desto weniger wahrscheinlicher ist es, dass es allein durch Zufall die unkorrigierte Schwelle »überlebt« hat. Solche auf der Clusterebene korrigierten Irrtumswahrscheinlichkeiten werden für jedes Cluster ausgegeben, und entsprechend werden nur solche Cluster als aktiviert deklariert, die einen korrigierten Schwellenwert auf Clusterebene von weniger 0.05 aufweisen.“⁷⁵⁵

Im Fazit der Auseinandersetzung mit den beschriebenen Herausforderungen soll abschließend über die *Vorstellung der eigenen Vorgehensweise* die Berücksichtigung der jeweiligen Erkenntnisse beschrieben werden.

Die eigene Analyse-Systematik lässt sich als zweistufiges Vorgehen beschreiben. Auf der *ersten Stufe* findet eine unkorrigierte Whole-Brain-Analyse mit einem $p < 0.001$ statt. Nachdem auf diesem liberalen Signifikanzniveau potenziell aktivierte Gehirnregionen ausgemacht und benannt werden können, gilt es diese Vermutungen auf der *zweiten Stufe* mit Hilfe unabhängig von den tatsächlichen Daten erzeugten ROI-Masken zu überprüfen. Auf dieser Stufe wird im Sinne eines konservativeren Vorgehens für die verwendeten ROIs eine *Small Volume Correction (SVC)* vorgenommen, die auf die Theorie der Gaußfelder zurückgreift. Im Ergebnis werden nur die Aktivierungen berichtet, die auf dem Cluster-Level nach FWER-Korrektur signifikante Aktivierungen indizieren.

Um zu dieser Systematik zu gelangen, musste als erstes eine Entscheidung zwischen der Whole-Brain-Analyse und der ROI-Analyse getroffen werden. Im Bewusstsein der Vor- und Nachteile beider Analysemöglichkeiten stellt das eigene Vorgehen einen Kompromiss dar. Zunächst wird auf der *ersten Stufe* eine *Whole-Brain-Analyse* mit einem unkorrigierten p-Wert ($p < 0.001$) durchgeführt. Das vordergründige Ziel an dieser Stelle besteht darin, keine potenziellen Aktivierungen aufgrund eines zu konservativen Vorgehens zu verpassen. Folglich wird der Fehler 2. Art hier zu Lasten eines höheren Fehlers 1. Art minimiert. Aus diesem Grund wurde die Entscheidung gegen eine ROI-Analyse und für ein liberales Signifikanzniveau getroffen. Im Ergebnis werden verschiedene Aktivierungen berichtet, wobei auch mit falsch positiv Aktivierungen zu rechnen ist. Auf dieser ersten Betrachtung aufbauend, werden die einzelnen Aktivierungen inhaltlich benannt. Dies kann auf verschiedene Weisen erfolgen. Es kann sowohl mit einem anatomischen Atlas gearbeitet werden als auch auf die Einschätzung von Experten⁷⁵⁶ zurückgegriffen werden. Da die eigene Untersu-

⁷⁵⁴ vgl. Wohlschläger, A.; Kellermann, T. (2013)

⁷⁵⁵ ebenda, S. 162

⁷⁵⁶ Forscher aus dem neurowissenschaftlichen Bereich (die im besten Fall auch eine zusätzliche medizinische Ausbildung genossen haben) besitzen aufgrund ihrer Expertise ein sehr gutes Gespür dafür, welche Regionen sich hinter unterschiedlichen Aktivierungsmustern verbergen. Sie können relativ schnell potenzielle Regionen differenzieren und benennen. Dies ist für einen Laien nicht möglich, da ihm das grundlegende anatomische und funktionale Wissen über das Gehirn und seine viele Strukturen i.d.R. fehlt.

chung in Kooperation mit der Life & Brain GmbH der Universitätsklinik Bonn durchgeführt wurde, konnte in diesem Zusammenhang auf Expertenwissen zurückgegriffen werden. Folglich wurden die *potenziell aktivierten Regionen* mit Hilfe eines Experten benannt. Im Endeffekt werden in dieser ersten Phase aufgrund des liberalen Signifikanzniveaus, und somit basierend auf der Whole-Brain-Analyse ohne Korrektur, lediglich Vermutungen aufgestellt, welche Regionen i.V.m. einer konkreten experimentellen Bedingung aktiviert sind. Um diese Vermutungen im Rahmen einer *zweiten Analysestufe* zu überprüfen, wird eine *Region-of-Interest (ROI)-Analyse (im weiteren Sinne)* angewendet. Im Vergleich zur Whole-Brain-Analyse werden nun nicht mehr zehntausende bzw. hunderttausend Voxel betrachtet, sondern je nach Größe nur noch jeweils mehrere hundert bzw. tausend Voxel auf signifikante Aktivierungen getestet. Die Anzahl der multiplen Tests verringert sich folglich durch die Anwendung einer ROI-Analyse, was an dieser Stelle der Kontrolle der falsch positiv Aktivierungen entgegen kommt. In Bezug auf die ROI-Analyse kann zwischen einer ROI-Analyse im engeren und im weiteren Sinne differenziert werden. Die *engere Sicht* kann hierbei als die traditionelle bzw. konservative Sicht verstanden werden. Bei der ursprünglichen Variante der ROI-Analyse wird von Anfang an nur mit vorgegebenen ROIs gearbeitet. In diesem Fall hat man eine konkrete Vermutung bezüglich aktivierter Regionen und testet alleine diese Regionen auf signifikante Unterschiede. Es findet keine Whole-Brain-Analyse im Vorfeld statt. Man schätzt die Parameter nur aufgrund der ROIs und untersucht anschließend auch nur für diese a-priori definierten ROIs, ob Aktivierungsunterschiede vorliegen oder nicht. Die *ROI-Analyse im weiteren Sinne* basiert hingegen auf einer Whole-Brain-Analyse. Im Rahmen der Whole-Brain-Analyse werden zunächst die entsprechenden Parameter geschätzt und dann signifikante Aktivierungsunterschiede auf einem liberalen Signifikanzniveau herausgestellt und benannt. Darauf aufbauend wird innerhalb von definierten ROIs im Sinne von *small volumes*, auf signifikante Aktivierungsunterschiede zwischen zwei experimentellen Bedingungen getestet. Aufgrund der Nachteile der engeren Perspektive hinsichtlich der eigenen Untersuchung⁷⁵⁷ fand beim eigenen Vorgehen die ROI-Analyse im weiteren Sinne Anwendung.

Nachdem im Zuge der ersten Analysestufe der eigenen Untersuchung die Benennung der potenziell aktivierten Gehirnregionen durch Experten erfolgte⁷⁵⁸, galt es als nächstes ROI-Masken zu erstellen, die die genauer zu untersuchenden kleineren Volumen räumlich definieren. Damit die Generation bzw. Selektion der ROI-Masken die Abhängigkeitsproblematik berücksichtigt, müssen die ROI-Masken ohne Verwendung der eigenen fMRT-Daten gebildet werden. Unabhängig von den eigenen fMRT-Daten gilt es, Ergebnisse anderer Studien als Referenz für die Erstellung der ROIs zu verwenden. Dazu mussten Studien recherchiert werden, die bereits Aktivierungen im Zusammenhang mit den betreffenden Strukturen berichtet haben. Im Zuge der Er-

⁷⁵⁷ Zum einen stellt die ROI-Analyse im engeren Sinne generell ein konservatives Vorgehen dar, zum anderen lag in Bezug auf den zentralen Kontrast innerhalb der eigenen Untersuchung (SA-Signal vs. kein SA-Signal), aus den in Kapitel 6 und 7 noch näher zu erläuternden Gründen, ein *ungerichteter Kontrastinhalt* vor, der gegen die Anwendung der erst genannten Variante spricht.

⁷⁵⁸ Die Benennung erfolgt nicht aufgrund von Gehirnatlantanten, die die konkret aktivierten Voxel bzw. Voxel-Cluster zur Bestimmung der ROIs verwenden.

gebnisdarstellung werden die Aktivierungen über die Koordinatenwerte des am stärksten aktivierten Voxels eines Clusters angegeben. Zu beachten ist hierbei, dass die Koordinaten entweder als MNI-Koordinaten vorliegen können oder aber als Talairach-Koordinaten⁷⁵⁹ berichtet werden. Da im Zuge der eigenen Untersuchung mit dem MNI-Atlas gearbeitet wird, konnten die MNI-Koordinaten Eins-zu-Eins übernommen werden, die Talairach-Koordinaten hingegen mussten in MNI-Koordinaten umgewandelt werden⁷⁶⁰, um sie anschließend für die ROI-Definition zu verwenden. Basierend auf diesen, von den eigenen fMRT-Daten, unabhängigen Koordinatenwerten ist es möglich, ein Volumen mit einem frei wählbaren Radius zu definieren, innerhalb dessen die Voxel getestet werden können. In diesem Sinne wird auch von einem *small volume* gesprochen. Im Rahmen der eigenen Untersuchung wurde der Radius eines *small volume* auf 10mm festgelegt⁷⁶¹ und konsequent für alle ROI-Definitionen beibehalten. Um die Aussagekraft weiter zu steigern, sollte die Analyse dieser kleineren Volumen des Weiteren dem Problem des multiplen Testens über die Anwendung einer entsprechenden Korrektur Rechnung tragen. Die im Zuge der zweiten Analysestufe eingesetzte *Small Volume Correction (SVC)* verwendet daher eine FWER-Korrektur basierend auf der Theorie der Gaußfelder.⁷⁶² Das Hauptanliegen in Bezug auf die zweite Stufe besteht darin, die zunächst als potentiell eingeschätzten Regionen konservativ auf Aktivierungsunterschiede zu untersuchen. An dieser Stelle geht es auch darum das Problem des multiplen Testens adäquat zu berücksichtigen, um so den Fehler 1. Art stärker zu kontrollieren. Eine weitere Überlegung, die auch dazu beiträgt, dass der Fehler 1. Art besser kontrolliert werden kann, beschäftigt sich mit der Anzahl aktivierter Voxel. I.d.R. sollte eine tatsächliche Aktivierung mehrere anliegende Voxel betreffen, also eine gewisse Ausdehnung zum Ausdruck bringen. Da Aktivierungen einzelner Voxel aus logischen Überlegungen heraus sehr unwahrscheinlich sind, sollten auch nur diejenigen Aktivierungen berichtet werden, die auf dem Cluster-Level signifikante Aktivierungen aufweisen. Die beschriebene Vorgehensweise stellt einen Kompromiss zwischen der Whole-Brain-Analyse und der ROI-Analyse dar und berücksichtigt dabei auch das Abhängigkeitsproblem und das Problem des multiplen Testens. In diesem Sinne kann das analytische Vorgehen im Zuge der eigenen Untersuchung als Beispiel für einen seriösen Umgang mit den beschriebenen Herausforderungen angesehen werden.

⁷⁵⁹ Die Koordinatenwerte beziehen sich auf den Atlas von Talairach & Tournoux (1988).

⁷⁶⁰ Es gibt verschiedene Möglichkeiten und Programme, die Koordinaten zu transformieren. Hier wurde eine pragmatische Lösung innerhalb der Software SPM angewendet, indem das *WFU Pick Atlas Tool Version 2.4* zurückgegriffen wurde.

⁷⁶¹ vgl. Bartels, A.; Zeki, S. (2004), S. 1158

⁷⁶² Da die fMRT-Daten der eigenen Untersuchung im Rahmen der Datenvorverarbeitung *gesmoothed* wurden, stellt die Verwendung der FWER-Korrektur in Form der Theorie der Gaußfelder das adäquate Korrekturverfahren dar.

6 Eine fMRT-Studie zur Wirkung von Sonderangebotssignalen bei Kaufentscheidungen

Nach einer einleitenden Einbettung der fMRT in den speziellen Anwendungsbereich dieser Arbeit, das Neuromarketing im engeren Sinne (Kapitel 2), wurden in den darauf folgenden Kapiteln die allgemeinen biologischen (Kapitel 3) und physikalischen bzw. messtechnischen Zusammenhänge (Kapitel 4) hinsichtlich der generellen Erhebungsmethode herausgearbeitet. Anschließend wurde ausführlich auf die speziellen Aspekte der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) eingegangen (Kapitel 5), um Transparenz i.V.m. der Erhebung und der Analyse dieses komplexen Verfahrens zu schaffen. Die ausführliche Darstellung der fMRT-Studie im Rahmen dieses Kapitels zielt auf verschiedene Sachverhalte ab. Generell soll die aufgearbeitete Theorie in Form eines Anwendungsbeispiels praktisch umgesetzt werden. Nachdem bereits auf einzelne Aspekte theoretisch eingegangen wurde, soll auf diese Weise der Prozess einer fMRT-Untersuchung mit seinen unterschiedlichen Entscheidungen so ganzheitlich wie, im Rahmen dieser Arbeit, möglich dargelegt werden. Des Weiteren dient dieses Anwendungsbeispiel auch dazu, verschiedene Konflikte bzw. Schwierigkeiten im Zusammenhang mit fMRT-Untersuchungen zu verdeutlichen. Zum einen werden die einzelnen, bereits in Kapitel 5.4.3⁷⁶³ adressierten, analysebezogenen Herausforderungen über das eigene Vorgehen berücksichtigt. In diesem Sinne kann die eigene Untersuchung als Beispiel für eine seriöse Vorgehensweise angesehen werden. Zum anderen werden auch die Herausforderungen der oft als relativ einfach erscheinenden bzw. von einigen Forschern als eindeutig suggerierten Interpretation von fMRT-Scans aufgezeigt. Hierbei liegt der Fokus zunächst nur auf der *neuronalen Interpretation*. Die Mikroebene der Interpretation geht der Frage nach, was die Aktivierung einer bestimmten Gehirnregion bzw. mehrerer Regionen letztlich im Rahmen einer konkreten Untersuchung bedeutet.

Dieses Anwendungsbeispiel entstand in Kooperation mit der NeuroImaging-Abteilung der Life & Brain GmbH der Universitätsklinik Bonn unter der Leitung von Prof. Dr. Bernd Weber. Der inhaltliche Schwerpunkt dieser fMRT-Studie fokussiert die *Wirkung von Sonderangebotssignalen*. Die nachfolgend dargestellte Untersuchung setzt sich daher mit der Frage auseinander, welche hirnelementaren Korrelate dem Einfluss von Sonderangebotssignalen im Rahmen von Kaufentscheidungen zu Grunde liegen. Um dieser Fragestellung genauer nachzugehen, bietet das erste Unterkapitel zunächst einen groben Überblick über verschiedene theoretische Aspekte im Zusammenhang mit der Funktion und Wirkung von Sonderangeboten. In einem weiteren Schritt werden einige Untersuchungsergebnisse zu diesem und verwandten Themen auf neuronaler Ebene zusammengetragen, die in Hinblick auf den Untersuchungsgegenstand als Hintergrundwissen dienen sollen und auf diese Weise die Hypothesenerstellung unterstützen. Im dritten Unterkapitel geht es um die Übersetzung der forschungsleitenden Frage in ein experimentelles Design. Hierzu werden

⁷⁶³ Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

der allgemeine Versuchsaufbau mit den einzelnen Designkomponenten und die Umsetzung über die konkreten Stimuli, den speziellen Versuchsablauf, aber auch die Probanden und die technischen Rahmenbedingungen abgebildet. Auf die unabdingbare Vorverarbeitung der Daten und die anschließende statistische Datenauswertung wird im vierten Unterkapitel nur kurz eingegangen, da sie bereits im Zuge von Kapitel 5⁷⁶⁴ ausführlich angesprochen wurden. Anschließend werden die Ergebnisse zuerst dargestellt, um dann in einem ersten Versuch auf neuronaler Ebene interpretiert zu werden. Dieser erste Interpretationsversuch bzw. diese erste Konfrontation mit Schwierigkeiten bei der Interpretation bilden das Ende dieses Kapitels. Im Rahmen von Kapitel 7⁷⁶⁵ werden diese Schwierigkeiten dann sowohl allgemein wie auch speziell aufgegriffen und ein Lösungsansatz präsentiert. Dies gilt für die neuronale Interpretation wie auch für die *handlungstheoretische Interpretation*. Die handlungstheoretische Interpretation stellt eine Makroebene der Interpretation dar, bei der es um die Übertragung der konkreten Untersuchungsergebnisse auf den Bereich der Handlungs- bzw. Entscheidungstheorien geht.

6.1 Theoretischer Hintergrund

Sonderangebotssignale gehören zu den verkaufsfördernden Maßnahmen im Bereich der Preispolitik und zählen zu sog. Preis-Promotions⁷⁶⁶. Sie werden eingesetzt, um Einfluss auf die Preiswahrnehmung eines Produktes zu nehmen. *„Unter Preiswahrnehmung ist dabei ganz allgemein die sensorische Aufnahme von Preisinformationen zu verstehen, bei der objektive Preise oder andere Preissignale in subjektive Preiseindrücke „enkodiert“, d.h. in ein subjektives Kategoriensystem des Beurteilers eingeordnet werden (...). Ergebnis einer solchen Enkodierung sind (im Unterschied zu Preisurteilen) „Preisempfindungen“.“*⁷⁶⁷ Diese sind subjektiv, was bedeutet, dass faktisch identische Preis im Vergleich sehr heterogen wahrgenommen werden können. Eine genaue Abgrenzung zwischen Preiswahrnehmung und Preisurteilen fällt schwer, da beide fließend ineinander übergehen. Schon auf der Stufe der Preiswahrnehmung erfolgen erste Bewertungen.

Es existieren mehrere Theorien zur Preiswahrnehmung. Nachfolgend werden zwei Theorien kurz dargestellt, da sie die größte Relevanz für die vorliegende Untersuchung aufweisen. Die *Adaptionsniveaustheorie*⁷⁶⁸ geht davon aus, dass jegliche Wahrnehmung einen Referenzpunkt benötigt. Wahrnehmungen sind folglich relativ. Im Kern sagt diese Theorie aus, dass ein Reiz nicht losgelöst von einem, ihn umgebenden, Kontext wahrgenommen wird. Im Gegenteil, der Reiz wird an diesen Rahmen angepasst, er wird daran *adaptiert*. *„Dabei werden alle relevant erscheinenden Begleitwahrnehmungen zu einem sog. Adaptionsniveau komprimiert, einer Sammel-*

⁷⁶⁴ Kapitel 5 Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

⁷⁶⁵ Kapitel 7 Interpretationslogik

⁷⁶⁶ vgl. Gedenk, K. (2003), S. 597 ff.

⁷⁶⁷ Diller, H. (2003), S. 261

⁷⁶⁸ vgl. Helson, H. (1964)

größe, die dann als Referenzpunkt für die Stimuluseinstufung dient.“⁷⁶⁹ Dieses Adaptionniveau wird aus internen und externen Preisankern gebildet. Zum sogenannten Fokalpreis, dem zu beurteilenden Preis, zählt nicht nur der tatsächliche Preis, sondern auch Elemente wie die Optik und die Preisauszeichnung, die sich zusätzlich auf die Preiswahrnehmung auswirken können.⁷⁷⁰ Die *Assimilations-Kontrast-Theorie*⁷⁷¹ setzt sich mit dem wahrgenommenen Unterschied zwischen einem Stimulus und dem gegenwärtigen Adaptionniveau auseinander. Hier wird die Frage gestellt, ab wann ein Stimulus als zu einem Niveau zugehörig bzw. als unterschiedlich, im Sinne der Zugehörigkeit zu einer anderen Kategorie von Stimuli, anerkannt wird. Ob ein Stimulus assimilierend oder kontrastierend wirkt, hängt von verschiedenen Aspekten ab, z.B. der Häufigkeit des Auftretens eines Stimulus. Bei dieser Einschätzung treten insofern Verzerrungen auf, als dass Stimuli ähnlicher bzw. unähnlicher wahrgenommen werden können, als dies in Wirklichkeit der Fall ist. „*Assimilations-Kontrast-Effekte spielen, z.B. bei Aktionspreisen eine Rolle, deren Wirkung auf das mittlere Preisempfinden (Adaptionniveau) in Frage steht.*“⁷⁷²

Die Preiswahrnehmung kann durch verschiedene Sachverhalte beeinflusst werden. Zentral für die Einflussmöglichkeiten ist das Streben nach Entlastung auf Seiten der Konsumenten. Der Grund für diese Tendenz liegt in der Tatsache einer kaum überschaubaren Menge relevanter Preise, die den Konsumenten überfordern, sollte er versuchen, eine rationale Entscheidung zu treffen. Verschiedene Vereinfachungsstrategien führen somit zu Wahrnehmungsverzerrungen. Als mögliche Effekte⁷⁷³ können Preisschwellen-, Preisrundungs-, Preisfiguren-, Eckartikel- und Preisfärbungseffekte genannt werden. Zum letztgenannten Effekt zählt neben der tatsächlichen Einfärbung des Preises auch der Aspekt der Preisetikettierung, z.B. als Sonderangebot. Wie schon diese kurze Auflistung zeigt, ist die Preiswahrnehmung generell nicht nur von einer Komponente abhängig. Im Rahmen dieser Untersuchung erfolgt allerdings eine Fokussierung auf Sonderangebotssignale, da sie generell, aber auch im Rahmen großer Kampagnen, Anwendung finden.

Was ist über die Wirkung von Sonderangeboten bekannt? Feststeht, dass der kurzfristige Absatz durch den Einsatz von Sonderangeboten deutlich gesteigert werden kann.⁷⁷⁴ Langfristige Wirkungen sind schwer quantifizierbar. Verschiedene Studien berichten von negativen Auswirkungen auf die Verschiebung des Referenzpreises, des Markenwertes, des Markenimages und der Markentreue.⁷⁷⁵ In Bezug zur Markentreue sind Kunden z.B. nicht mehr bereit ein spezielles Markenprodukt zu kaufen, da sich z.B. durch das Sonderangebot der Referenzpreis für das Produkt verringert

⁷⁶⁹ Diller, H. (2003), S. 263

⁷⁷⁰ vgl. ebenda, S. 276 ff.

⁷⁷¹ vgl. Sherif, M.; Taub, D.; Hovland, C. I. (1958); Sherif, M.; Hovland, C. I. (1961)

⁷⁷² Diller, H. (2003), S. 264

⁷⁷³ vgl. ebenda, S. 270 ff.

⁷⁷⁴ vgl. Gedenk, K. (2002), S. 215 ff.; Simon, H.; Fassnacht, M. (2009), S. 498 f.

⁷⁷⁵ vgl. Gedenk, K. (2002), S. 245 ff.; Simon, H.; Fassnacht, M. (2009), S. 499 f.; Hardesty, D. M.; Bearden, W. O. (2003); Villarejo-Ramos, A. F.; Sánchez-Franco, M. J. (2005); Yoo, B.; Donthu, N.; Lee, S. (2000); Mela, C. F.; Gupta, S.; Lehmann, D. R. (1997)

hat. Eine allgemeine Aussage über die Vorteilhaftigkeit von Sonderangeboten kann allerdings nicht getroffen werden.⁷⁷⁶

Diese Anmerkungen spiegeln zunächst die Wirkung von Sonderangeboten aus Sicht eines Anbieters dar. Wie sieht es aber aus Sicht der Konsumenten aus? Wie wirken Sonderangebote auf sie? Was lösen sie in ihnen aus?

Da mit der Wirkung von Sonderangeboten auch direkt das Thema der Preiswahrnehmung angesprochen wird, stellt sich generell die Frage nach der Ausprägung des Preisbewusstseins in Deutschland. Über die Zeit konnte ab 2004 in verschiedenen Studien⁷⁷⁷ festgestellt werden, dass das Phänomen der Schnäppchenjagd besonders in Deutschland stark ausgeprägt ist. In keinem anderen europäischen Land orientieren sich die Konsumenten so stark am Preis wie in Deutschland. Deutsche gelten generell als besonders preissensibel. Konnte zur Jahrtausendwende noch ein enormer Schnäppchenboom ausgemacht werden, hat sich dieses Extrem mittlerweile wieder etwas gelegt. Es besteht zwar nach wie vor ein stark ausgeprägtes Preisbewusstsein allerdings in einem etwas gemäßigeren Umfang.

Dieser preisbewusste bzw. -sensible Konsument wird in der Literatur auch unter dem Begriff des *Smart Shoppers*⁷⁷⁸ geführt. Er wird als Konsument betrachtet, der „*im Rahmen seines Einkaufsverhaltens überdurchschnittliche Anstrengungen auf sich nimmt, um eine qualitativ gute Kernleistung zu einem möglichst geringen Preis zu erhalten.*“⁷⁷⁹ Er ist stets auf der Suche nach Preiserlebnissen. Diese werden als „*angenehme oder unangenehme, mehr oder weniger bewusste und nicht regelmäßig wiederkehrende Empfindung über Preise*“⁷⁸⁰ definiert. Preiserlebnisse sind folglich wie Erlebnisse allgemein in der Lage, Emotionen auszulösen.⁷⁸¹ Emotionen wirken sich insofern auf die Wahrnehmung aus, als dass sie hierbei Einfluss auf die Interpretation entscheidungsrelevanter Informationen nehmen können.⁷⁸² Eine positive Stimmung kann die Fokussierung auf positive Aspekte einer Entscheidungssituation oder eines Produktes zur Folge haben, während negative Aspekte ausgeblendet werden⁷⁸³ (mood congruity⁷⁸⁴). Dadurch ist es Emotionen generell möglich, Denkprozesse zu unterbrechen, bevor diese im Rahmen einer Entscheidungssituation zu einem nicht endenden, unverhältnismäßig aufwendigen Suchprozess führen. Im Ergebnis gelangt man auf diese Weise zwar nicht zwangsläufig zu den besten Entscheidungen, dennoch sind Emotionen dafür verantwortlich, dass Verzögerungen vermieden werden und überhaupt entschieden wird.⁷⁸⁵

⁷⁷⁶ vgl. Simon, H.; Fassnacht, M. (2009), S. 500

⁷⁷⁷ vgl. Hauck, M. (2004), S. 9; http://www.gfk-verein.de/index.php?article_id=65&clang=0 (abgerufen am 10.09.2013); http://www.planung-analyse.de/news/studien/pages/protected/Ausgepraegtes-Preisbewusstsein-in-Deutschland_5753.html (abgerufen am 20.12.2013)

⁷⁷⁸ vgl. Esser, B. (2002), S. 11 ff.; Neuhaus, V. (2001), S. 11 ff.; Wiswede, G. (2003), S. 257

⁷⁷⁹ Esser, B. (2002), S. 18

⁷⁸⁰ Diller, H. (2007), S. 96

⁷⁸¹ vgl. ebenda, S. 95

⁷⁸² vgl. Loewenstein, G.; Lerner, J. S. (2003), S. 629

⁷⁸³ vgl. Diller, H. (2007), S. 99 f.

⁷⁸⁴ vgl. Bower, G. H. (1981)

⁷⁸⁵ vgl. Damasio, A. R. (1994), S. 191 ff.; LeDoux, J. (1998), S. 299 f.

Sind die Emotionen im Zusammenhang mit Sonderangeboten positiv, so wirken sie belohnend. Anders ausgedrückt können Preise und in diesem Sinne auch subjektiv wahrgenommene Preise als Opfer empfunden werden, die man bringen muss, um ein Produkt zu erwerben. Dabei steigt der wahrgenommene Produktwert mit sinkenden monetären Opfern in Form günstig empfundener Preise.⁷⁸⁶ Auf der anderen Seite kann der Kauf eines Sonderangebots ebenfalls belohnend wirken, indem sich ein Konsument in der Rolle des sparsamen und cleveren Einkäufers sieht.⁷⁸⁷

Das Streben nach Belohnung und die Vermeidung von Bestrafung bzw. Verlust steuert das tierische wie auch das menschliche Verhalten. Um das Verhalten daran auszurichten, sind verschiedene Teilprozesse erforderlich, wie z.B. das Erfassen und das Einschätzen potentieller Belohnungen bzw. Verluste, aber auch das Lernen von Belohnungen und Verlusten, um das Verhalten besser an Umweltbedingungen anzupassen.⁷⁸⁸ Tiere reagieren vordergründig auf vegetative Belohnungen, sind aber auch empfänglich für nicht-vegetative Belohnungen. Im Vergleich dazu kann über Menschen Folgendes festgehalten werden: „*Humans use a wide range of nonvegetative rewards, such as money, challenge, acclaim, visual and acoustic beauty, power, security, and many others, ...*“⁷⁸⁹.

Die angesprochene Preisorientierung macht den Smart Shopper sensibel für preispolitische Instrumente wie Sonderangebote. Wird der Konsument mit Sonderangeboten konfrontiert, so stellt eine derartige Etikettierung ein Signal⁷⁹⁰ dar. Zum einen verspricht ein derartig ausgezeichnetes Kaufangebot Belohnung in Form einer Preisersparnis, aber auch in Form von Stolz auf das eigene rollenkonforme Handeln⁷⁹¹, gleichzeitig stellt es eine Komplexitätsreduktion im Rahmen häufig sehr homogener Produktbereiche bzw. gesättigter Märkte dar. In einer Situation, in der Produktdifferenzen immer weiter verschwinden, stechen Sonderangebote hervor und stellen ein einfaches Entscheidungskriterium dar.

Es ist folglich anzunehmen, dass die Wahrnehmung des Preis-Leistungs-Verhältnisses durch ein Kaufangebot mit zusätzlicher Auszeichnung als Sonderangebot zum Positiven verändert werden kann. Insofern sollte ein Sonderangebotssignal einen Reiz darstellen, auf den man sich zubewegt. Durch den verstärkten Einsatz dieser verkaufsfördernden Maßnahme im Einzelhandel und dem damit einhergehenden alltäglichen Charakter könnte es mittlerweile allerdings auch zu einer Abnutzung der Sonderangebotswirkung gekommen sein. Es besteht die Möglichkeit, dass ihnen die Konsumenten neutraler gegenüberstehen und sie insofern weniger stark wahrgenommen werden. Die vorliegende fMRT-Untersuchung zielt daher auf die Identifikation der hirnhysiologischen Korrelate ab, die dem Einfluss von Sonderangebotssignalen im Rahmen von Kaufentscheidungen zu Grunde liegen.

⁷⁸⁶ vgl. Zeithaml, V. A. (1988), S. 10 ff.

⁷⁸⁷ vgl. Schindler, R. M. (1989), S. 447 f.

⁷⁸⁸ vgl. Schultz, W. (2006); O'Doherty, J. P. (2004)

⁷⁸⁹ Schultz, W. (2006), S. 90

⁷⁹⁰ vgl. Spence, M. A. (1974); Kirmani, A.; Rao, A. R. (2000); Erdem, T.; Swait, J. (1998)

⁷⁹¹ vgl. Gedenk, K. (2003), S. 603

6.2 Neuronaler Hintergrund

Nachdem ein Überblick über die theoretischen Grundlagen zum Thema Sonderangebotssignale gegeben wurde, geht es nun darum die bisher berichteten neuronalen Grundlagen i.V.m. Sonderangebotssignalen abzubilden. Hierzu erfolgt die Vorstellung verschiedener Studien und deren Ergebnisse, die sich bereits mit diesem Thema auf neuronaler Ebene beschäftigt haben bzw. die dabei helfen können, diesbezüglich Hypothesen abzuleiten.

Dem Autor ist lediglich die Untersuchung von *Weber & Neuhaus*⁷⁹² in Kooperation mit dem *Siegfried Vögele Institut* bekannt, die sich auf neuronaler Ebene mit der Wirkung von Rabattsignalen im Rahmen von Kaufentscheidungen auseinander gesetzt hat und an die die vorliegende Studie im Sinne einer Erweiterung und leichten Abwandlung des Designs anknüpft. In besagter Studie ging es um die Frage, wie sich Rabattsymbole auf die Preiswahrnehmung und auf Kaufentscheidungen auswirken. Im Fokus stand folglich die neuronale Repräsentation des Einflusses von Rabattsymbolen auf den Kaufentscheidungsprozess. Im Verlauf der Untersuchung wurden die Probanden mit verschiedenen Produkten konfrontiert. Im Anschluss an die bildliche Darstellung eines Produktes wurde separat ein Preis und in einigen Fällen ein Rabattsymbol eingeblendet. Der Preis wurde hierbei auf dreierlei Weise variiert. Entweder entsprach der abgebildete Preis dem normalen Kaufpreis des Produktes (100%), lag deutlich unter diesem (25%) oder wies einen deutlich höheren als den marktüblichen Preis auf (400%). Das Rabattsymbol wurde nur i.V.m. einem normalen Preis eingesetzt.⁷⁹³ Die verwendeten Produkte unterschieden sich bezogen auf ihren Marktpreis insofern, dass sowohl auf teurere (> 100€) als auch auf weniger kostenintensive Produkte (< 5€) zurückgegriffen wurde. Aufgabe der Probanden war es, Kaufentscheidungen für die präsentierten Stimuli zu treffen. Im Ergebnis wurde eine verstärkte Aktivierung im ventralen Striatum (VS) berichtet. Bei einzelnen Probanden wurde zudem eine verminderte Aktivierung des anterioren Cingulum (ACC) festgestellt. Diese Deaktivierung konnte allerdings nicht auf der Gruppenebene bestätigt werden. Die Autoren schlussfolgern, dass das Rabatt-Signal ein starkes Signal darstellt und wie ein konditioniertes Signal wirkt. Das Rabatt-Symbol selbst wirkt nicht belohnend, sondern es versetzt in den Zustand, der die Erwartung einer Belohnung hervorruft. Dieser Zustand verleitet dazu, aktiv auf Dinge zuzugehen und erhöht somit die Wahrscheinlichkeit, sich für diese Dinge zu entscheiden bzw. diese Dinge zu kaufen. Die vereinzelt gefundene Deaktivierung des anterioren Cingulum (ACC) deutet auf eine kognitive Entlastungsfunktion von Rabattsignalen hin. Diese Struktur hängt mit Konflikt-Monitoring, Fehlermeldungen und mit kognitiver Kontrolle zusammen.⁷⁹⁴ Bei einigen Probanden wurden anscheinend Teile dieser kognitiven Kontrolle blockiert. Das Rabattsymbol „*wird zum Schlüsselreiz und entlastet [...] so von einer*

⁷⁹² vgl. Weber, B.; Neuhaus, C. (2007)

⁷⁹³ vgl. Siegfried Vögele Institut (2008), S. 67

⁷⁹⁴ vgl. Sohn, M.-H.; Albert, M. V.; Jung, K.; Carter, C. S.; Anderson, J. R. (2007); Carter, C. S.; van Veen, V. (2007); Brown, J. W.; Braver, T. S. (2007); Brown, J. W.; Braver, T. S. (2005); Fan, J.; Flombaum, J. I.; McCandliss, B. D.; Thomas, K. M.; Posner, M. I. (2003)

aufwändigen Differenzierung zwischen (häufig kaum unterschiedlichen) Marken.“⁷⁹⁵ Im Anschluss an die Untersuchung gaben einige Probanden an, dass sie bewusst versucht hatten, sich nicht durch das Rabattsignal beeinflussen zu lassen. Aufgrund der gefundenen neuronalen Aktivierung resümieren die Autoren: „*Rabatte wirken unterbewusst.*“⁷⁹⁶ Im Zuge verschiedener Studien konnte bereits gezeigt werden, dass eine Beteiligung des ventralen Striatums (VS) bzw. des Nucleus Accumbens (NAcc) bei Untersuchungen zu monetären, aber auch zu sozialen Belohnungen und im Zusammenhang mit der Erwartung von Belohnung vorliegt.⁷⁹⁷

Ein anderes Beispiel für eine Striatum-Beteiligung stellt die Studie von *Plassmann, Kenning & Ahlert*⁷⁹⁸ dar. Bei loyalen Kunden konnten an dieser Stelle erhöhte Aktivierungen herausgestellt werden. Genauer gesagt, stand diese Aktivierung für eine Situation, in der loyale Kunden mit dem Label eines von ihnen präferierten Geschäfts, im Sinne eines belohnungsversprechenden Signals, im Rahmen einer Kaufentscheidung konfrontiert wurden. Eine derartige Aktivierung konnte für Probanden, die über keine bzw. nur eine geringe Loyalität zu dem jeweiligen Geschäft aufwiesen, nicht berichtet werden. Wie an dieser und auch an anderen Studien zu sehen ist, können Kaufentscheidungen durch den Kontext beeinflusst werden, in den sie eingebettet sind. Das kann zum einen der Kontext eines Rabattsymbols sein, der dafür sorgt, dass ein Kaufangebot im besten Fall auch als belohnend im Sinne von günstig wahrgenommen wird. Es kann aber genauso gut jeglicher andere Kontext sein, der in der Lage ist, ein Kaufangebot mit positiven Assoziationen aufzuladen, z.B. die Einblendung des Unternehmenslogos eines Geschäfts, zu dem eine Kaufloyalität besteht.

Als weiteres Beispiel für diesen Aspekt kann die Studie von *Linder et al.*⁷⁹⁹ herangezogen werden. Sie untersuchten die Wirkung eines in Deutschland bekannten Siegels für biologisch angebaute Lebensmittel (Bio-Siegel). Im Fokus stand zum einen der Effekt des Siegels auf die *Willingness to pay* und zum anderen die neuronale Aktivität während der Produktbewertungsphase. Das Bio-Siegel hat ähnlich wie das Rabattsymbol eine Signalfunktion, die auf eine (zwar in beiden Fällen unterschiedliche, aber für den Konsumenten insgesamt) positive Entscheidung hindeutet bzw. positive Assoziationen hinsichtlich des Kaufangebots kommuniziert. Beim Kontrast der Produkte mit Bio-Siegel im Vergleich zu konventionell gelabelten Produkten konnte ebenfalls eine erhöhte Aktivierung des ventralen Striatums (VS) festgestellt werden. Dies deckt sich mit dem Ergebnis von *Weber & Neuhaus*⁸⁰⁰.

⁷⁹⁵ Weber, B.; Neuhaus, C. (2007), S. 45

⁷⁹⁶ ebenda, S. 46

⁷⁹⁷ vgl. Raab, G. et al (2011); Izuma, K.; Saito, D. N.; Sadato, N. (2008); Zink, C. F.; Tong, Y.; Chen, Q.; Bassett, D. S.; Stein, J. L.; Meyer-Lindenberg, A. (2008); Knutson, B.; Rick, Scott; Wimmer, G. E.; Prelec, D.; Loewenstein, G. (2007); Knutson, B.; Adams, C. M.; Fong, G. W.; Hommer, D. (2001); Breiter, H. C.; Aharon, I.; Kahneman, D.; Shizgal, Peter (2001); Elliott, R.; Friston, K. J.; Dolan, R. J. (2000); Delgado, M. R.; Nystrom, L. E.; Fissell, K.; Noll, D. C.; Fiez, J. A. (2000)

⁷⁹⁸ vgl. Plassmann, H.; Kenning, P.; Ahlert, D. (2007)

⁷⁹⁹ vgl. Linder, N. S.; Uhl, G.; Fließbach, K.; Trautner, P.; Elger, C. E.; Weber, B. (2010)

⁸⁰⁰ vgl. Weber, B.; Neuhaus, C. (2007)

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung i.V.m. Sonderangebotssignalen eine erhöhte Aktivierung des ventralen Striatums (bzw. des Nucleus Accumbens) erwartet (H_1).

Im Rahmen einer Untersuchung von *Deepe et al.*⁸⁰¹ wurden Kaufentscheidungen simuliert und auf die Unterschiede geachtet, die bei Entscheidungen für die Lieblingsmarke (First-Choice-Brand) im Vergleich zu Entscheidungen für eine Marke, die nicht die Lieblingsmarke darstellte, vorliegen. Ein interessantes Ergebnis bestand hierbei in Gehirnregionen, die bei besagtem Vergleich eine Deaktivierung aufwiesen. Sie wurden als *Komplexitätsreduktion* im Sinne einer *kortikalen Entlastung* interpretiert, da es sich um Regionen handelte, die mit dem Arbeitsgedächtnis, Planung und allgemein mit Denkprozessen verbunden werden. Neben anderen Regionen⁸⁰² war auch der dorsolaterale präfrontale Cortex (DLPFC) betroffen. Im Gegensatz zu den Ergebnissen dieser Studie wies der dorsolaterale präfrontale Cortex im Rahmen einer Studie von *McClure et al.*⁸⁰³ zur Wirkung von Markeninformationen eine erhöhte Aktivität auf. In dieser Untersuchung wurden die beiden Marken Pepsi und Coca-Cola gegeneinander getestet. Im Ergebnis zeigte sich für Pepsi keine spezielle markenbezogene Aktivierung, hingegen wurden bei Darstellung der Marke Coca-Cola verschiedene Gehirnregionen verstärkt aktiviert, unter anderem auch der dorsolaterale präfrontale Cortex (DLPFC). Der Unterschied zwischen diesen beiden Studien besteht darin, dass bei *Deepe et al.* die Lieblingsmarke explizit berücksichtigt wurde, wohingegen dies bei *McClure et al.* nicht der Fall war. Coca-Cola war hier trotz Präferenz nicht eindeutig die Lieblingsmarke der Probanden. Im Umkehrschluss deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass eine kortikale Entlastung nur i.V.m. der Lieblingsmarke erfolgt (Winner-Take-All-Effekt).

Generell signalisieren Sonderangebotssignale günstige Angebote und sind insofern in der Lage, Kaufentscheidungen zu vereinfachen. Bereits bei den theoretischen Aspekten in Kapitel 6.1⁸⁰⁴ fiel der Begriff der Komplexitätsreduktion und auch beim Ergebnis der Vorgänger-Studie von *Weber & Neuhaus* zeigten sich zwar nicht auf Gruppenniveau, aber immerhin bei einigen Probanden Deaktivierungen in einem Bereich, der mit kognitiver Kontrolle in Verbindung gebracht wird.

Vor diesem Hintergrund besteht die Möglichkeit, dass Sonderangebotssignale, ähnlich der Wirkung einer Lieblingsmarke, auch eine kortikale Entlastung im Rahmen der Kaufentscheidung mit sich bringen, die eine kritische Begutachtung eines Kaufangebots überlagert. Dies könnte sich in Form einer Deaktivierung des dorsolateralen präfrontalen Cortex (DLPFC) bzw. des anterioren Cingulum (ACC) widerspiegeln (H_2).

⁸⁰¹ vgl. Deepe, M. et al. (2005)

⁸⁰² prämotorisches Areal, posteriorer parietaler Cortex und occipitaler Cortex

⁸⁰³ vgl. McClure, S. M. et al. (2004)

⁸⁰⁴ Kapitel 6.1 Theoretischer Hintergrund

6.3 Versuchsaufbau und -ablauf

Nachdem die beiden zentralen Hypothesen auf Grundlage des theoretischen und neuronalen Hintergrundwissens formuliert wurden, geht es im Folgenden darum, die Rahmenbedingungen der vorliegenden Studie, inklusive des experimentellen Designs, ausführlich abzubilden. Das experimentelle Design ist, wie bereits in Kapitel 5.2.1⁸⁰⁵ thematisiert, von immenser Bedeutung für das Gelingen einer fMRT-Studie. Ein grundlegender Vorteil einer detailreichen Darstellung der allgemeinen Erhebungssituation wie auch des experimentellen Designs besteht darin, das Verständnis für eine Studie zu erhöhen. Die genaue Aufarbeitung ist zudem vorteilhaft, da nur auf diese Weise eine seriöse Möglichkeit besteht, die Qualität einer empirischen Untersuchung zu bewerten und Untersuchungsergebnisse zu validieren. Die Bearbeitung erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird der Versuchsaufbau beschrieben, anschließend auf den genauen Untersuchungsablauf eingegangen.

6.3.1 Der Versuchsaufbau

Das zentrale Forschungsinteresse der vorliegenden fMRT-Studie besteht in der Untersuchung der neuronalen Wirkung von Sonderangebotssignalen im Rahmen von Kaufentscheidungen. Um diese Fragestellung sinnvoll erörtern zu können, geht es für die Probanden der Untersuchung allgemein darum, Kaufentscheidungen zu treffen. Die genaue Aufgabenstellung lautete: *„Bitte entscheiden Sie spontan, ob Sie ein Produkt bzw. ein Produktpaket zu dem angegebenen Preis kaufen würden.“*⁸⁰⁶ Passend zur Aufgabe wurden die Probanden mit Stimulusmaterial in Gestalt verschiedener Kaufangebote konfrontiert. Hierbei stellen eine Produktabbildung, ein zugehöriger Preis und teilweise ein Sonderangebotssignal die variablen Stimuluskomponenten dar. Wie in Abbildung 79 beispielhaft zu sehen ist, wird ein Stimulus dadurch abgerundet, dass neben den bereits erwähnten Elementen noch zwei Antwortmöglichkeiten links und rechts unterhalb der Produktabbildung positioniert sind.



Abbildung 79: Kaufangebot ohne Sonderangebotssignal

Um der Aufgabenstellung in adäquater Weise nachkommen zu können, galt es hierbei *verschiedene Aspekte* zu berücksichtigen.

Jeder Stimulus, sprich jedes Kaufangebot, wurde maximal 3 Sekunden lang dargeboten. Da die Erfassung der Wirkung von Sonderangebotssignalen im Vordergrund stand und sich deren Wirkung generell verringert, je mehr Zeit eine Person in eine

⁸⁰⁵ Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

⁸⁰⁶ Anhang 1: Die Experimentalbeschreibung

Kaufentscheidung investiert, ging es zum einen darum, die Entscheidungszeit relativ kurz zu halten.⁸⁰⁷ Zudem wurden in den Kaufangeboten Produkte des täglichen Konsums, die als Einzelprodukt den Wert von 2,00€ nicht überstiegen, verwendet, so dass die Einkaufssituation weitgehend automatisiert bzw. gewohnheitsmäßig abläuft. In diesem Sinne entspricht die Kaufentscheidung generell einer Situation ohne großen kognitiven Aufwand und in diesem Sinne einer kurzen Entscheidungszeit. Eine maximale Darbietungszeit von 3 Sekunden sollte daher i.d.R. für die Aufgabenerfüllung ausreichen.⁸⁰⁸ Im Verlauf des Experiments begegnete den Probanden jedes der Produkte mehrmals. Wie anhand des faktoriellen Designs weiter unten nachzuvollziehen ist, musste für ein Produkt insgesamt zwölf Mal eine Kaufentscheidung getroffen werden. Jedes Produkt wurde sowohl sechs Mal als Einzelprodukt und weitere sechs Mal als Produktpaket⁸⁰⁹ zum Kauf angeboten. Trotz dieser Vielzahl an Stimuli und auch wiederholten Konfrontationen mit demselben Produkt, war es für das Untersuchungsziel wichtig, dass die Probanden jedes Kaufangebot als einzelne Entscheidung betrachten. In diesem Sinne sollte das, was bereits im Zuge des Experiments *gekauft wurde*, keinen Einfluss auf die Bewertung nachfolgender Kaufangebote haben.

Ein weiterer Aspekt in Bezug auf die Kaufentscheidung besteht in der Limitation eines für die Aufgabe zur Verfügung stehenden Geldbetrages. Da jedes Kaufangebot als separate Entscheidung angesehen werden sollte, sollte in dieser Untersuchung sichergestellt werden, dass die Kaufangebote unabhängig von einem finanziellen Budget bewertet werden. Den Probanden wurde folglich kein fixes Budget vorgegeben. Vielmehr wurde sogar erwähnt, dass man bei den Entscheidungen gerade nicht danach gehen sollte, was einem normalerweise als finanzielles Budget zur Verfügung steht. Aus einer kritischen Perspektive heraus betrachtet könnte man den Eindruck gewinnen, dass gerade ein finanzieller Rahmen zu realistischen Kaufentscheidungen führt. Problematisch wird dies nur, wenn das zur Verfügung stehende Geld schon zu einem recht frühen Zeitpunkt verbraucht ist, so dass man theoretisch im weiteren Verlauf des Experiments nichts mehr kaufen könnte, auch wenn man die Angebote für kaufwürdig hält. Da die Probanden zu Beginn des Experiments keine spezifischen Kenntnisse über die einzelnen Preise und Produktmengen haben, ist eine Entkopplung der einzelnen Kaufentscheidung von einem fixen Budget anzustreben. Zudem werden hier Produkte zum Kauf angeboten, die eher im Sinne von Snacks und somit als Ergänzung zur Grundernährung zu verstehen sind. Für diese Art von Produkten würde man i.d.R. eher kein allzu großes Budget haben, da sie absolut gesehen im Niedrigpreis-Bereich liegen. Auch in diesem Sinne ist die Fixierung

⁸⁰⁷ Im Sinne der bereits angesprochenen *Reduzierung des kognitiver Aufwand* i.V.m. SA-Signalen sollten die Probanden im Rahmen der experimentellen Situation die Kaufangebote nicht genau nachrechnen können, sondern nur eine grobe Einschätzung vornehmen.

⁸⁰⁸ Die Darbietungsdauer von 3 Sekunden setze sich aus 250ms für das Erfassen des Angebots, 1000ms für eine generelle Entscheidungsfindung und zusätzlichen 1750ms, um den Probanden ein wenig Extra-Zeit zu geben, zusammen.

⁸⁰⁹ Mit dem Begriff *Produktpaket* wird hier die Situation bezeichnet, in der eine größere Anzahl eines Produktes (2-4 Stück) ein Kaufangebot ausmacht.

eines finanziellen Budgets unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Aspekte der Erhebung generell abzulehnen.

Diese weiteren Aspekte i.V.m. der Aufgabe wurden den Probanden zum einen über die Experimentalbeschreibung⁸¹⁰ im Vorfeld der Erhebung und zum anderen im Zuge der Einleitung im Verlauf der Erhebung kommuniziert.⁸¹¹

Die Probanden gingen im Laufe der Untersuchung der Aufgabe nach, mehrere Kaufentscheidungen zu treffen. Da das Ergebnis jeder Aufgabe im Vorfeld der Entscheidung nicht vorhergesagt werden kann, ist unklar welches Angebot gekauft bzw. nicht gekauft wird. Man weiß dementsprechend nicht, welcher Stimulus zu welcher Kategorie, die Aufgabe betreffend, gehört. Dies kann erst nach Beendigung der Untersuchung festgehalten werden. Aus diesem Grund wird bei dem experimentellen Design dieser Studie von einem *Event-related Design*⁸¹² gesprochen. Auf diese Weise konnten alle Stimuli in einer zufälligen Reihenfolge präsentiert werden, was auch dem Untersuchungsziel entgegen kam.

Da ein Stimulus anhand dreier Faktoren variiert werden konnte, spricht man in Verbindung mit der Definition der Stimuli zudem von einem faktoriellen Design, welches in Abbildung 80 dargestellt wird.

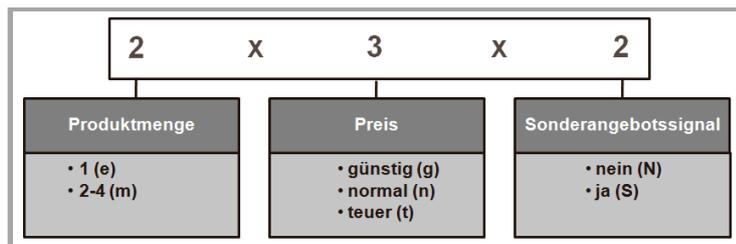


Abbildung 80: 2x3x2-Design

Der Faktor *Produktmenge* weist zwei Ausprägungen auf. Zum einen werden Kaufangebote dargestellt, bei denen die Abbildung eines Einzelproduktes im Mittelpunkt steht. Zum anderen galt es ebenfalls Kaufentscheidungen zu treffen, die sich auf mehr als ein einzelnes Produkt bezogen. In dieser Variante wurde ein Produkt entweder in 2-, 3- oder 4-facher Form abgebildet. Dieser Faktor hatte den Zweck, die Entscheidungssituation bzw. die Beurteilung der Kaufangebote für die Probanden zu erschweren. Präsentiert man jeweils nur ein Produkt mit einem Preis, so gestaltet es sich leichter, ein Kaufangebot zu durchschauen. Die Gegenüberstellung von eher transparenten und weniger transparenten Situationen erscheint daher hinsichtlich der Wirkung von Sonderangebotssignalen von großem Interesse. Dieser Sachverhalt stellt eine Erweiterung im Vergleich zur Vorgängerstudie von *Weber & Neuhaus*⁸¹³ dar. Die Variation innerhalb der Option *mehrere Produkte* bzw. *Produktpaket* ist darauf zurückzuführen, dass man es den Probanden nicht zu leicht machen wollte, indem man für diese Variante immer nur zwei Produkte mit einem Preis darstellt, der theoretisch *nur* halbiert werden muss. Die Anzahl der Produkte wurde von 2-4 vari-

⁸¹⁰ vgl. Anhang 1: Die Experimentalbeschreibung

⁸¹¹ vgl. Kapitel 6.3.2 Der Versuchsablauf

⁸¹² vgl. Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

⁸¹³ vgl. Weber, B.; Neuhaus, C. (2007)

iert, um den Versuch einer Berechnung nach dem Motto zu erschweren: Je größer die Anzahl der dargebotenen Produkte, desto unübersichtlicher die Situation.

Beim Faktor *Preis* liegen drei Differenzierungen vor. Kaufangebote wurden entweder mit einem günstigen, einem normalen oder mit einem teuren Preis dargeboten. Da die abgebildeten Produkte alle aus einem Kiosk an der Epileptologie am Uniklinik-Gelände stammen, die Erhebung auf dem Uniklinik-Gelände stattfand und die Probanden aus einer Probanden-Datenbank der Uniklinik gezogen wurden, wurden diese Besonderheiten bezüglich der Rahmenbedingungen der Untersuchung bei der Preisbildung berücksichtigt.

Im Rahmen der *Einzelprodukt-Situation* wurde daher zunächst ein *normaler Preis* als Mittelwert aus dem Uniklinik-Kioskpreis (UKK-Preis), der i.d.R. teurer ist als der Einzelhandelspreis, und einem Internetpreis verschiedener Einzelhändler, der i.d.R. billiger ist als derjenige im UKK, berechnet. Aufgrund der Tatsache, dass im UKK Produkte eher in kleineren Menge angeboten werden als üblich im Einzelhandel, musste auf die Internetseiten verschiedener Einzelhändler zurückgegriffen werden, da bei keinem Einzelhändler alle Produkte mit der entsprechenden Menge zum Kauf angeboten wurden. Nachdem für jedes Produkt ein normaler Preis gebildet wurde, konnte angelehnt an diesen Wert jeweils ein günstiger und ein teurer Preis ermittelt werden. Dies geschah indem für einen *günstigen Preis* der normale Preis um 25% reduziert und der normale Preis für einen *teuren Preis* um 25% erhöht wurde. Die Abstände zwischen den drei Kategorien sollten gleichmäßig gehalten werden. In der Preiskategorie *normal* endeten die Preise i.d.R. mit 0, bei den Kategorien *günstig* und *teuer* mit 9, z.B. 1,59€. ⁸¹⁴ Die Preiserstellung in der *Produktpaket-Situation* erfolgte fast identisch zur Systematik in der Einzelprodukt-Situation. Der einzige Unterschied bestand in der Findung des *normalen Preises*. Hierbei wurde die jeweils abgebildete Menge eines Produktes, zwei bis vier Produkte, mit dem normalen Preis aus der Einzelprodukt-Situation multipliziert. Von diesem normalen Preis für die Produktpaket-Situation wurden dann entsprechend auch wieder ein *günstiger Preis* (-25%) und ein *teurer Preis* (+25%) abgeleitet. Auch in dieser Situation endeten die erstellten Preis in der Kategorie *normal* i.d.R. mit 0 und in den Preiskategorien *günstig* und *teuer* ebenfalls mit 9. ⁸¹⁵

Auch in Bezug auf die Preisgestaltung liegt hier eine Erweiterung bzw. Veränderung vor. Im Gegensatz zur Vorgängerstudie liegen hier relativ gesehen gleich Abstände zwischen den Preiskategorien vor. ⁸¹⁶

Neben der Unterscheidung zwischen Einzelprodukt und Produktpaket und den drei Preisstufen gab es noch eine weitere Variationsmöglichkeit für die Stimuli. Die letzte Unterscheidung in Bezug auf das Stimulusmaterial bezieht sich auf das *zusätzliche Einblenden eines Sonderangebotssignals*. Den Probanden wurden folglich sowohl Kaufangebote mit wie auch ohne *Sonderangebotssignal* zur Beurteilung vorgelegt.

⁸¹⁴ vgl. Anhang 2: Übersicht über die Preise

⁸¹⁵ vgl. ebenda

⁸¹⁶ In der Studie von Weber & Neuhaus (2007) lag der normale Preis bei 100%, der günstige Preis bei 25% und der teure Preis bei 400%. Es bestand folglich ein unterschiedlich großer Abstand zwischen den drei Preiskategorien.

Sonderangebote kommen in der Realität zwar oft vor, eine normale Preisetikettierung macht jedoch die Mehrheit der Fälle aus. Um diesem Sachverhalt gerecht zu werden und somit einen realistischen Umgang mit der Verwendung eines Sonderangebotsignals zu pflegen, wurden insgesamt nur 25% der Stimuli mit diesem Symbol versehen. Das Symbol für Sonderangebote wurde mit Hilfe von WordArt in Microsoft Office PowerPoint erstellt und in Bezug auf die Formatierung an die Vorgänger-Studie von Weber & Neuhaus⁸¹⁷ angelehnt.

Durch die Kombination jeglicher Ausprägungen der drei angesprochenen Faktoren *Produktmenge* (**e**in/ **m**ehrere), *Preis* (**g**ünstig/ **n**ormal/ **t**euer) und *Sonderangebotssignal* (**N**ein/ **S** für Ja) können insgesamt zwölf unterschiedliche Kategorien gebildet werden (egN, egS, enN, ...). Folglich existierten von jedem Produkt 12 Varianten. Das heißt, dass *Prinzenrolle* im Laufe des Experiments sechs Mal als Einzelprodukt und sechs Mal als Produktpaket zu sehen war und zwar mit jeder möglichen Preisstufe und dann noch entweder mit oder ohne Sonderangebotssignal. Abbildung 81 zeigt anschaulich unterschiedliche Varianten eines Produktes.



Abbildung 81: Verschiedene Varianten eines Stimulus⁸¹⁸

Die Beschreibung der Kategorien bzw. der Anzahl an Stimuli in den einzelnen Kategorien trifft bis auf das Sonderangebotssignal zu. Beim Faktor Sonderangebotssignal stellt sich die Situation etwas anders dar. Aus dem bereits angeführten Argument wird die Zahl der Stimuli mit einem Sonderangebotssignal auf insgesamt 25% der Stimuli begrenzt. Insgesamt bestand das experimentelle Design aus 264 Stimuli. Davon waren 25% bzw. 66 der Stimuli mit einem Sonderangebotssignal verbunden. Jeder Proband traf demnach für 264 Kaufangebote eine Entscheidung. Die Systematik für die *zeitliche Darbietung eines Stimulus* wird durch Abbildung 82 veranschaulicht.

⁸¹⁷ vgl. Weber, B.; Neuhaus, C. (2007), S. 42

⁸¹⁸ Preise Prinzenrolle: (e) 0.49€/ 0.60€/ 0.79€ und (m) 1.39€/ 1.80€/ 2.19€



Abbildung 82: Darbietungsdauer eines Stimulus

Da bei der Aufgabenstellung im Vordergrund stand, spontane Entscheidungen zu treffen, wurde jedes Kaufangebot maximal 3000ms eingeblendet. In der Phase der Stimuluspräsentation gab es zwei Reaktionsmöglichkeiten auf Seiten der Probanden. Entweder trafen sie innerhalb der 3000ms eine Entscheidung oder aber sie reagierten gar nicht auf ein Kaufangebot. Im ersten Fall wurde die ausgewählte Entscheidung, also *Kaufen* bzw. *Nicht kaufen*, umgehend nach der Reaktion des Probanden für 250ms hell unterlegt bzw. gehighlightet. Somit erfuhr ein Proband ein kurzes Feedback bezüglich der getroffenen Entscheidung. Im Anschluss daran wurde ein schwarzer Hintergrund mit einem zentral positionierten weißen Kreuz eingeblendet. Dies steht stellvertretend für das sogenannte Interstimulus-Intervall (ISI) und stellt eine im Bereich von 3000-6000ms variierende Pause zwischen zwei Stimuli dar. Da es sich bei der vorliegenden Untersuchung um ein Event-related Design handelte, war die Verwendung eines im Anschluss an die Stimuli variierenden ISI notwendig.⁸¹⁹ Im Fall einer Nicht-Reaktion kam es sinnvoller Weise nicht zu einem farblich hervorgehobenen Feedback und es folgte direkt nach den 3000ms maximaler Darbietungszeit ebenfalls ein zwischen 3000-6000ms variierendes ISI. Nach dem ISI begann die gerade beschriebene Ablaufschleife von Neuem. Grob gesehen besteht das experimentelle Design, wie Abbildung 83 beispielhaft darstellt, aus einer Aneinanderreihung von Kaufangebot, Feedback bzw. kein Feedback und Inter-Stimulus-Intervall.

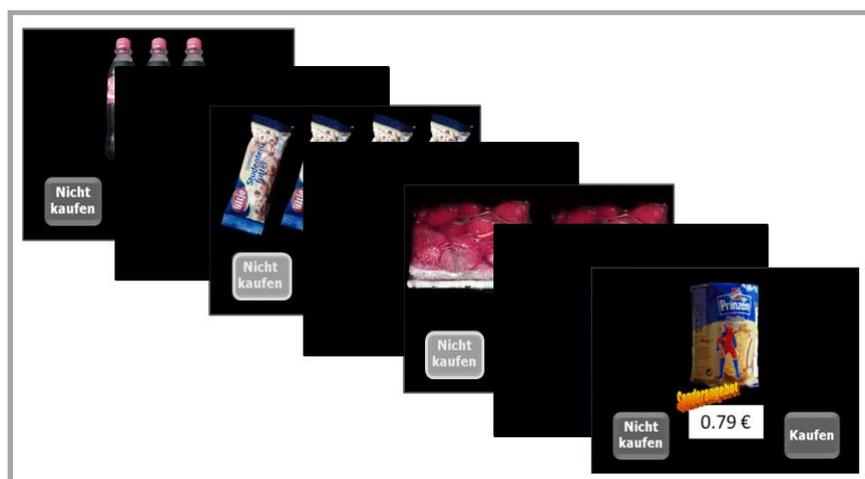


Abbildung 83: Ausschnitt aus dem Ablauf der Untersuchung

⁸¹⁹ vgl. Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

Die Reihenfolge der Stimuli wurde hierbei randomisiert, d.h. die Stimuluspräsentation erfolgte für jeden Probanden zufällig. Insgesamt dauerte die fMRT-Untersuchung ca. 30 Minuten.⁸²⁰

Im Rahmen des *Stimulusmaterials* wurden mehrere Abbildungen von 22 unterschiedlichen Produkten verwendet. Aus pragmatischen Gründen wurden Produkte ausgewählt, die im Kiosk der Epileptologie⁸²¹ zum Kauf angeboten wurden. Bei der Selektion wurde darauf geachtet, dass die Produkte relativ zeitnah nach einem Kauf konsumiert werden können. Im Zuge eines im Vorfeld der fMRT-Untersuchung erfolgten Kontakttelefonats bekamen die Probanden ohne nähere Erklärung die Anweisung, *nüchtern* zur Erhebung zu erscheinen⁸²². Es wurde ihnen gesagt, dass es wichtig wäre, dass sie vier Stunden vor dem Erhebungstermin nichts mehr essen. Durch die Kombination dieser beiden Sachverhalte wurde versucht, das Involvement bzw. die Relevanz bezogen auf die Kaufsituation zu erhöhen und somit realistische Kaufentscheidungen zu unterstützen. Unter den ausgewählten Produkten befanden sich sowohl Getränke, wie auch verschiedene Schokoriegel, Chips, Obst und Ähnliches. Die Abbildungen folgender Produkte wurden im Rahmen der vorliegenden Studie verwendet: Balisto, Coca-Cola, Müllermilch Erdbeere, Vio, Haribo Goldbären, RitterSport, M&M, Ültje Studentenfutter, Leibniz Minis, Twix, Apfel, Käsebrötchen, Banane, Schnecke (Gebäck), Erdbeerkuchen, Bounty, Corny, MüllerFructiv, Fritt, Nimm2, Prinzenrolle und Pringles.⁸²³

An dieser fMRT-Untersuchung nahmen sechs Frauen und sechs Männer mit einem durchschnittlichen Alter von 28 Jahren teil⁸²⁴. Sie wurden telefonisch zufällig aus einer Probanden-Datenbank der Uniklinik Bonn rekrutiert. Da sie in der Datenbank geführt wurden, waren Alter, Geschlecht und weitere sozio-demografische Daten bereits bekannt. Alle Testpersonen verfügten über Erfahrungen mit fMRT-Untersuchung, d.h. sie hatten bereits mindestens einmal zuvor in einem MR-Scanner gelegen. Dieser Umstand stellt zwar keine notwendige Voraussetzung dar, wie allerdings bereits in Kapitel 5.2.3⁸²⁵ angesprochen wurde, ist es durchaus von Vorteil mit *Probanden* zu arbeiten, die bereits über Erfahrungen mit fMRT-Untersuchungen verfügen. Die Stichprobengröße von 12 Personen ist unter den gegebenen Umständen und der Art der Untersuchung, wie ebenfalls in Kapitel 5.2.3⁸²⁶ dargelegt wurde, als ausreichend zu bewerten.

Für die Teilnahme an der Untersuchung erhielten die zwölf Probanden zweierlei *Vergütung*. Zum einen wurden ihnen nach der Beendigung des Experiments 10€ in bar bezahlt. Dieser Betrag entspricht einer standardmäßigen Bezahlung für ein einstündiges Experiment. Zum anderen durften die Probanden, wie sie durch die Experimen-

⁸²⁰ 4.500 - 9.250ms pro Stimulus; im Schnitt 6.875ms pro Stimulus; 6.875ms*264 Stimuli = 1.815s = 30 1/4 Minuten → ca. 30 Minuten (im Schnitt)

⁸²¹ Dieses lag auf der gegenüberliegenden Straßenseite des Gebäudes der Life & Brain GmbH auf dem Gelände der Uniklinik Bonn.

⁸²² vgl. Kapitel 6.3.2 Der Versuchsablauf

⁸²³ vgl. Abbildung 87: Der Warentisch

⁸²⁴ vgl. Anhang 3: Anonymisierte Probandendaten

⁸²⁵ vgl. Kapitel 5.2.3 Stichprobengröße und Einsatz erfahrener Probanden

⁸²⁶ vgl. ebenda

talbeschreibung⁸²⁷ in der Vorbereitungsphase erfahren, Waren im Wert von 10€ mit nach Hause nehmen. Diese wurden zufällig aus den innerhalb des Experiments *gekauften Angeboten* ausgewählt. Dabei galt jeweils der Preis und die dargebotene Menge an Produkten für die Errechnung der 10€ als ausschlaggebend, zu dem ein bestimmtes Angebot im Rahmen der Untersuchung gekauft wurde. Dieser Sachverhalt wurde auf Nachfrage einiger Probanden im Vorfeld der eigentlichen Erhebung noch einmal kurz erläutert. Hätte ein Proband z.B. insgesamt nur Waren im Wert von 8,50€ gekauft, so hätte er auch nur Waren in diesem Wert bekommen, sprich alles was er gekauft hätte. Dieser Fall kam jedoch nie vor, d.h. es wurden immer Waren mit einem Gesamtwert von über 10€ gekauft. Dieser zweite Teil der Bezahlung ist im Sinne der Anreizkompatibilität zu verstehen. Ein Verhalten war folglich wie in der Realität mit bestimmten Konsequenzen verbunden. Eine *gute Wahl* hatte Einfluss darauf, welche Menge an Produkten letztendlich im Rahmen eines Warenwertes von 10€ mit nach Hause genommen werden durfte. Insgesamt sollte über diese Art der Bezahlung, zusätzlich zu den bereits angesprochenen Sachverhalten, ebenfalls ein höheres Involvement in Bezug auf die Entscheidungssituation erzeugt werden, was wiederum zu realitätsnahen Kaufentscheidungen führen sollte. Kritisch anzumerken ist, dass die Probanden dadurch evtl. dazu motiviert wurden, Kaufangebote mit einem Gesamtwert von mindestens 10€ zu kaufen, auch wenn sie diese in Wirklichkeit gar nicht kaufen würden bzw. auch wenn ihnen die Kaufangebote nicht kaufwürdig erschienen. In Anbetracht der relativ großen Menge an Kaufangeboten⁸²⁸ und der Preise für diese, wurde dies für wenig wahrscheinlich gehalten.

Die MRT- und fMRT-Aufnahme erfolgte mit dem MAGNETOM Avanto 1.5T von Siemens. In Abbildung 48⁸²⁹ sieht man den *MR-Scanner* aus verschiedenen Perspektiven. Von vorne ist der Scanner-Innenbereich, im Volksmund aufgrund seiner Form auch *Röhre* genannt, gut erkennbar. An der Scanner-Öffnung ist eine Liege montiert, die vertikal wie horizontal automatisch verstellbar ist, so dass ein Proband nach Anbringung weiterer technischer Hilfsmittel, in Rückenlage mit dem Kopf voran, langsam in den Scanner eingefahren werden kann. In der Rückansicht ist der Hauptteil des MR-Scanners zu sehen. Er besteht im Kern aus einem supraleitenden Magneten, der das 1,5 Tesla starke Magnetfeld erzeugt und aus den Gradienten-Spulen, die bei der Generierung von räumlichen Informationen eine entscheidende Rolle spielen.

Im Rahmen der Untersuchung wurden weitere *technische Hilfsmittel* eingesetzt, die für die Umsetzung des experimentellen Designs und die Durchführung der damit verbundenen Aufgabe essentiell sind. Zu beachten ist hierbei allgemein, dass durch die Spezialgeräte keine Feldinhomogenitäten erzeugt werden dürfen. Für die Darbietung von visuellem Stimulusmaterial wurden relativ lange Zeit Spiegelkonstruktionen eingesetzt, über die es einem im Scanner befindlichen Probanden ermöglicht wurde,

⁸²⁷ vgl. Anhang 1: Die Experimentalbeschreibung

⁸²⁸ Im Verlauf der Untersuchung wurden von jedem Probanden insgesamt 264 Kaufentscheidungen getroffen.

⁸²⁹ Abbildung 48: Front- und Rückansicht des Siemens MAGNETOM Avanto (1,5 Tesla)

außerhalb des Scanners an eine Wand oder eine andere Oberfläche projizierte Stimuli zu sehen.⁸³⁰ Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung konnte für die Stimuluspräsentation auf spezielle *Video-Goggles* zurückgegriffen werden. Wie Abbildung 84 zeigt, wurden diese am oberen Teil der Kopfspule⁸³¹ befestigt und nach Verbindung der beiden Kopfspulenteile für jeden Probanden so eingestellt, dass sie beim Blick in die Video-Goggles eine klares Bild erkennen konnten. Eine gewissenhafte Einstellung ist wichtig, da die Probanden theoretisch in Folge einer schlechten Einstellung an den Video-Goggles vorbeischaun bzw. ein nur unscharfes Bild sehen können. Diese Video-Goggles sind für Personen mit bis zu 4 Dioptrien einstellbar.



Abbildung 84: Video-Goggles, angebracht auf der oberen Hälfte der 2-teiligen Kopfspule

Um auf die Stimuli, in Form von verschiedenen über die Video-Goggles eingeblendeten Kaufangeboten, mit einer Kaufen- bzw. Nicht kaufen-Entscheidung zu reagieren, kamen zwei *Response-Devices* in Gestalt von *Vier-Finger-Handgeräten* zum Einsatz. Abbildung 85 ist zu entnehmen, dass es sich hierbei um zwei Greif-Ringe handelt, die jeweils mit zwei Reaktionsknöpfen versehen sind. Theoretisch kann eine Reaktion sowohl mit dem Daumen als auch mit dem Zeigefinger ausgelöst werden. Für diese Studie genügte es allerdings, die beiden Zeigefinger-Knöpfe mit den beiden möglichen Reaktionen *Kaufen* und *Nicht kaufen* zu belegen. Die Daumen-Knöpfe besaßen folglich keine Funktion. Bei einem Druck auf diese passierte nichts.



Abbildung 85: Response-Devices (Vier-Finger-Handgeräte)

6.3.2 Der Versuchsablauf

Nachdem bereits die Einzelheiten des experimentellen Designs dargelegt und auch verschiedene Anmerkungen zur Aufgabenstellung gemacht wurden, geht es nun er-

⁸³⁰ vgl. O'Doherty, J. P.; Kringelbach, M. L.; Rolls, E. T.; Hornak, J.; Andrews, C. (2001); Breiter, H. C. et al. (2001); Büchel, C.; Morris, J.; Dolan, R. J.; Friston, K. J. (1998)

⁸³¹ vgl. Kapitel 4.3 Der MR-Scanner

gänzend darum, einen größeren Rahmen um die Untersuchung zu ziehen. Wie in Abbildung 86 dargestellt ist, kann der Ablauf der Untersuchung in sechs Phasen eingeteilt werden, die im Nachfolgenden beschrieben werden.

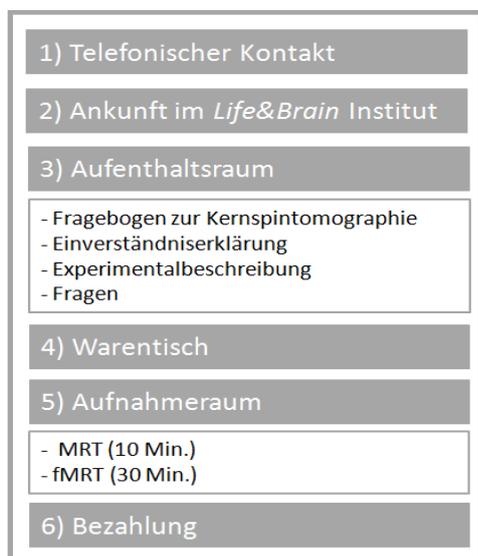


Abbildung 86: Ablauf der fMRT-Studie

Im Vorfeld der eigentlichen Erhebung wurden zufällig zwölf Probanden aus einer Probanden-Datenbank der Uniklinik Bonn *telefonisch kontaktiert*. Im Rahmen des Gesprächs wurde jede Person gefragt, ob sie Interesse und Zeit hätte, an einem fMRT-Experiment teilzunehmen. Im Falle einer Bestätigung wurde im weiteren Gesprächsverlauf über die Bezahlung⁸³² gesprochen und ein Erhebungstermin ausgemacht. Als Letztes wurden die Probanden noch darauf hingewiesen, nüchtern zur Untersuchung zu erscheinen, d.h. sie wurden gebeten, vier Stunden vor dem vereinbarten Termin nichts mehr zu essen.

Die eigentliche Erhebung begann mit der *Ankunft* der Probanden im *Life & Brain Institut* auf dem Gelände der Uniklinik Bonn. Nachdem sich die Probanden beim Pförtner angemeldet hatten, wurden sie abgeholt und in einen Aufenthaltsraum geführt.

Im *Aufenthaltsraum* ging es in einem ersten Schritt darum, zwei Formalitäten zu klären. Die Probanden sollten dazu zunächst den *Fragebogen zur Kernspintomographie* in Ruhe durchlesen und wahrheitsgemäß beantworten. Es wurde sichergestellt, dass die Probanden dem relativ starken Magnetfeld, mit einer Stärke von 1,5 Tesla, ohne gesundheitliche Bedenken ausgesetzt werden dürfen.⁸³³ Aus diesem Grund wird nach Operationen am Herzen oder Kopf, Metallteilen im Körper, Tätowierungen, Schwangerschaft und weiteren kritischen Sachverhalten gefragt. Zusätzlich werden auch ein paar sozio-demografische Daten und die Händigkeit bei verschiedenen Tätigkeiten abgefragt, welche aber für diese Untersuchung keine weitere Rolle spiel-

⁸³² Es wurden zu diesem Zeitpunkt nur von den 10€ in bar gesprochen, eine zusätzliche Belohnung wurde zwar angesprochen, aber nicht im Detail erläutert. Es wurde nichts über das eigentliche Experiment gesagt.

⁸³³ vgl. Kapitel 4.4 MRT-Sicherheitsaspekte

ten.⁸³⁴ Nachdem einer Teilnahme aus medizinischen Gründen nichts mehr im Weg stand, wurde den Probanden eine *Einverständniserklärung* vorgelegt. Dieses Formular klärt die Probanden darüber auf, welche Konsequenzen ein zufälliger pathologischer Befund im Zuge der Untersuchung mit sich bringt.⁸³⁵ Des Weiteren gibt der Proband sein Einverständnis zur Aufzeichnung und Veröffentlichung der erhobenen Daten, allerdings ohne Weitergabe personenbezogener Informationen an Dritte. Die persönlichen Daten unterliegen dem Datenschutz. In einem zweiten Schritt erhielten die Probanden nach der Unterzeichnung beider Schriftstücke die sogenannte *Experimentalbeschreibung*⁸³⁶. Die Probanden sollten sich diese zunächst alleine durchlesen, bevor ihnen die Möglichkeit gegeben wurde, Fragen zum Ablauf, den Stimuli und der Aufgabe zu stellen. Im Rahmen der Experimentalbeschreibung wurden die Probanden über die Stimuli informiert und auf verschiedene Dinge hingewiesen, die sie bezüglich der Aufgabenstellung berücksichtigen sollten. Sie wurden z.B. darüber informiert, dass sie spontane Entscheidungen treffen sollten und dass es für keine Entscheidung eine Rolle spielen sollte, welche Angebote im Laufe des Experiments bereits gekauft wurden. In diesem Sinne sollte jedes Kaufangebot als einzelne Entscheidung gesehen werden. Nachdem die Probanden die Experimentalbeschreibung durchgelesen hatten, wussten sie darüber hinaus, dass sich ein Kaufangebot auf ein einzelnes Produkt und auf eine größere Anzahl dieses Produktes beziehen kann. Überdies wurden sie darüber in Kenntnis gesetzt, dass ihnen im Verlauf des Experiments jedes Produkt bzw. Produktpaket mehrmals begegnen würde. Nicht explizit erwähnt wurde, dass der Preis variiert wird und dass Kaufangebote teilweise mit einem Sonderangebotssignal versehen werden. Nach der Klärung aller Fragen wurden die Probanden in einen weiteren Raum begleitet, indem der sogenannte *Warentisch* aufgebaut war.



Abbildung 87: Der Warentisch

Die Untersuchungsteilnehmer hatten hierbei unbegrenzt Zeit, sich mit allen 22, im Rahmen der Untersuchung verwendeten, Original-Produkten vertraut zu machen.

⁸³⁴ Alle 12 Personen waren Rechtshänder und die sozio-demografischen Daten lagen schon vor, da alle 12 Probanden bereits Teil der Uniklinik-Datenbank waren.

⁸³⁵ Obwohl die vorliegende fMRT-Untersuchung keine medizinische Anwendung darstellte, bestand die Möglichkeit, im Zuge der Aufnahmen Hinweise auf eine krankhafte Veränderung des Gehirns zu erhalten. Ein auffälliger Befund muss dem Probanden mitgeteilt und eine Empfehlung zum weiteren Vorgehen i.V.m. einem Radiologen gegeben werden.

⁸³⁶ vgl. Anhang 1: Die Experimentalbeschreibung

Dafür benötigten diese i.d.R. ein bis zwei Minuten. Dieser Vorgang diente der Vermeidung von Missverständnissen die Größe bzw. Menge der zum Kauf angebotenen Produkte betreffend. Es wurde somit sichergestellt, dass den Probanden eine realistische Einschätzung hinsichtlich der verschiedenen Kaufangebote möglich war.

Mit Erfüllung der formalen Kriterien von Seiten der Probanden und Kenntnis über den Ablauf der Untersuchung, die Stimuli und die Aufgabe waren die grundlegenden theoretischen Vorbereitungen für die fMRT-Untersuchung abgeschlossen. Im Anschluss betraten die Probanden zunächst den *Kontrollraum*, der sozusagen den Vorraum des *Aufnahmeraums* darstellt. Von diesem Raum aus erfolgt die computergestützte Koordination jeglicher Hard- und Software, deren Zusammenspiel den korrekten Ablauf des Experiments und der Aufzeichnung der MRT- bzw. fMRT-Rohdaten gewährleistet.⁸³⁷ Vom Kontrollraum aus besteht die Möglichkeit über eine große, verglaste Scheibe zu sehen, was innerhalb des Aufnahmeraumes passiert. Zudem kann man über eine Gegensprechanlage zu jeder Phase des Experiments mit dem Probanden kommunizieren.

Bevor die Probanden den Kontrollraum in Richtung Aufnahmeraum verließen, wurden sie daran erinnert, sich aufgrund des relativ starken statischen Magnetfeldes aus Sicherheitsgründen vor Betreten des Aufnahmeraums aller metallischen Gegenstände zu entledigen. Als Letztes erhielten sie wegen der Geräuschkulisse innerhalb des Scanners Ohrstöpsel.⁸³⁸

Nach Eintritt in den *Aufnahmeraum* wurden die Probanden gebeten, sich auf einer Liege, die sich unmittelbar vor der Scanner-Öffnung befindet und mit dem Tomographen verbunden ist, bequem hinzulegen. Infolge der Erreichung einer bequemen Position liegen sie bezogen auf den MR-Scanner mit dem Kopf voran in Rückenlage. Als erstes wird nun der obere Teil der Kopfspule⁸³⁹ mit dem in der Liege montierten unteren Teil verbunden und über einen Stecker an den Scanner angeschlossen, so dass der Kopf von der gesamten Spule umgeben wird. Im Rahmen dieser Untersuchung kam eine *Arrayspule*⁸⁴⁰ zum Einsatz, d.h. dass innerhalb dieser Kopfspule sowohl Hochfrequenz-Spulen zur Anregung wie auch Receiver-Spulen zur Signaldetektion enthalten sind. Um eine ruhige Kopflage und in diesem Sinne geringe Kopfbewegungen über das Experiment hinweg zu unterstützen, wurden die seitlichen Freiräume zwischen Kopf und Kopfspule auf Höhe der Ohren mit Hilfe von kleinen gepolsterten Kissen bzw. kleinen Sandsäcken gefüllt.

Im nächsten Schritt erfolgte eine Kalibrierung der Kopfposition, um eine für die MR-Aufnahme adäquate Position zu gewährleisten. Hierzu schließt der Proband zunächst kurz die Augen, da ein Kreuz über eine Lichtquelle erzeugt wird, die sich an der Scanner-Öffnung und über dem Gesicht des Probanden befindet. Auf diese Weise wird eine für die Messung optimale Kopfposition markiert. Bei Bedarf erhielten die Probanden eine Anweisung hinsichtlich einer Korrektur ihrer Kopfposition.

⁸³⁷ vgl. Kapitel 4.3 Der MR-Scanner

⁸³⁸ vgl. Kapitel 4.4 MRT-Sicherheitsaspekte

⁸³⁹ vgl. Abbildung 84: Video-Goggles, angebracht auf der oberen Hälfte der 2-teiligen Kopfspule

⁸⁴⁰ vgl. Kapitel 4.3 Der MR-Scanner

Nach einer gelungenen Kalibrierung wurden die *Video-Goggles*⁸⁴¹, die an der Kopfspule befestigt sind, solange für jeden Probanden eingestellt bis der grafische Hintergrund innerhalb der, von außen wie ein Mikroskop wirkenden, Apparatur deutlich zu erkennen war. Im Rahmen dieser Studie war der Einsatz der Video-Goggles erforderlich, da mit ihrer Hilfe die Präsentation der Stimuli erfolgte. Anschließend bekamen die Probanden die beiden *Response-Button*⁸⁴² in die Hände gelegt. Über diese Knöpfe war es den Probanden möglich, ein Feedback auf ein dargebotenes Kaufangebot zu geben. Über die beiden Zeigefinger konnten sie hierbei zwischen den Optionen *Kaufen* und *Nicht kaufen* wählen. Zu guter Letzt erhielten die Probanden für den Fall, dass sie sich aus irgendeinem Grund unwohl fühlen sollten, einen *Notfallschalter*. Dieser Schalter bzw. der Schalterknopf ist mit einem Alarm im Kontrollraum verbunden, so dass der aufzeichnende Techniker im Notfall die Untersuchung abbrechen bzw. dem Probanden zu Hilfe kommen kann.⁸⁴³ Mit der Übergabe des Notfallschalters und dem langsamen Einfahren der Liege in das Zentrum des MR-Scanners waren die letzten praktischen Vorbereitungen abgeschlossen, so dass nun die eigentliche Messung beginnen konnte.

Im Scanner liegend wurde zunächst die *strukturelle MRT-Aufnahme* durchgeführt. Diese dauerte ungefähr zehn Minuten und erforderte keine Aktivität des Probanden. Der Proband lag folglich ruhig und entspannt im Scanner. Diese Aufnahme wurde benötigt, um die aktivitätsbezogenen fMRT-Daten der einzelnen Probanden über eine Abbildung ihres Gehirns zu legen und somit grafisch hochauflösend zu verorten (Koregistrierung). Im Anschluss an die MRT-Aufnahme wurden die Probanden über die Gegensprechanlage zuerst zu ihrem Wohlbefinden befragt und dann darüber informiert, dass das eigentliche Experiment in Kürze startet.

Kurze Zeit später wurden die Stimuluspräsentation und die *fMRT-Aufnahme* synchron vom Kontrollraum aus gestartet.⁸⁴⁴ Zu Beginn der Präsentation wurden ein paar einleitende Anmerkungen und Erinnerungen bezüglich des Experiments über die Video-Goggles eingeblendet. Erneut wurde kurz auf den Aufbau eines Stimulus und der damit verbundenen Aufgabe eingegangen. Es gab zudem eine weitere Anmerkung zur Handhabung der Aufgabe, in der darum gebeten wurde, eine Kaufentscheidung unabhängig vom generellen Einkaufsbudget zu treffen. Dadurch sollte noch einmal betont werden, dass jedes Kaufangebot separat zu bewerten ist. Es wurde ebenfalls daran erinnert, dass jedes Produkt mehrmals dargestellt wird. Zum Abschluss dieses einleitenden Teils wurde die Funktionalität des linken und rechten Response-Buttons angesprochen und ein zahlenmäßiger Countdown eingeleitet. Nach Ablauf des Countdowns wurden die verschiedenen Kaufangebote in Form der

⁸⁴¹ vgl. Abbildung 84: Video-Goggles, angebracht auf der oberen Hälfte der 2-teiligen Kopfspule

⁸⁴² vgl. Abbildung 85: Response-Devices (Vier-Finger-Handgeräte)

⁸⁴³ I.d.R. überwacht der aufzeichnende Techniker auch über die Gegensprechanlage, die während der gesamten Untersuchung aktiv ist, ob auffällige Geräusche oder Beschwerden zu vernehmen sind.

⁸⁴⁴ Über die sog. *SyncBox* wird gewährleistet, dass die Messung des MR-Signals und die Präsentation des Stimulusmaterials parallel starten. Diese systematische Kopplung der beiden Prozesse ist unabdingbare Voraussetzung für die anschließende fMRT-Datenanalyse.

Stimuluspräsentation randomisiert dargestellt und von den Probanden entweder gekauft oder abgelehnt. Insgesamt dauerte die fMRT-Untersuchung ca. 30 Minuten.

Den Abschluss dieser Untersuchung bildet die Aufklärung über den Sinn und Zweck der Studie und die *Bezahlung der Probanden*. Wie bereits telefonisch vereinbart, erhielten sie neben 10€ in bar zusätzlich, wie in der Experimentalbeschreibung erläutert, *gekaufte Waren* im Wert von 10€.

6.4 Anmerkungen zur Erhebung, Vorverarbeitung und Analyse der Daten

Bevor es um die Ergebnisdarstellung und Interpretation der Ergebnisse geht, sollen an dieser Stelle kurz einige Anmerkungen zur Erhebung, Vorverarbeitung und Analyse der fMRT-Daten hinsichtlich der eigenen Untersuchung gemacht werden.

Wie bereits erwähnt stand für die fMRT-Untersuchung ein *1,5 Tesla Siemens MAGNETOM Avanto* zur Verfügung. Das Stimulusmaterial wurde mit Hilfe der Software *Presentation*⁸⁴⁵ gesteuert und den Probanden über Video-Goggles⁸⁴⁶ im Scanner präsentiert. Über zwei Handgeräte⁸⁴⁷ konnten die Probanden auf die Stimuli in Form von Kaufangeboten reagieren. Die Aufzeichnung der Gehirnaktivität und die Darbietung des Stimulusmaterials wurden über die *SyncBox*⁸⁴⁸ aufeinander abgestimmt. Somit wird gewährleistet, dass im Anschluss an die fMRT-Erhebung die gemessenen Aktivierungswerte mit konkreten experimentellen Bedingungen verknüpft werden können. Ohne diese Zuordnung könnte eine systematische Analyse der fMRT-Daten nicht erfolgen.

Die strukturelle MRT (MRT) wurde mit Hilfe einer T_1 -gewichteten Sequenz erzeugt und führt zu einer hochauflösenden dreidimensionalen Abbildung des Gehirns. Für die funktionelle MRT (fMRT) wurde hingegen eine T_2^* -gewichtete EPI-Sequenz⁸⁴⁹ verwendet. Diese Messsequenz weist zwar im Vergleich zu einer T_1 -gewichteten Sequenz eine schlechtere Bildauflösung in Bezug auf die kontrastreiche Darstellung der unterschiedlichen Gewebetypen auf. Allerdings ist eine derartige Messsequenz in der Lage sehr sensibel den Grad der Sauerstoffsättigung des Blutes in den entsprechenden Strukturen abzubilden. Über die EPI-Sequenz erfolgt die Messung der Stärke des BOLD-Signals. Im Zuge der konkreten Messsequenz wurde eine Repetitionszeit (TR) von 3s und eine Echozeit (TE) von 50ms gewählt. Das Gehirn wurde hierbei über 30 Schichten gemessen. Im Ergebnis der Koregistrierung⁸⁵⁰ erhält man für jede Person verschiedene Bilddateien, die für jeden definierten Voxel Zeitreihen in Bezug auf die Stärke des BOLD-Signals enthalten. Dies sind die Rohdaten der fMRT-Datenanalyse.

⁸⁴⁵ vgl. <http://neurobs.com> (abgerufen am 05.02.2014)

⁸⁴⁶ vgl. http://nordicneurolab.com/Products_and_Solutions/fMRI_Hardware/index.aspx (abgerufen am 14.12.2013)

⁸⁴⁷ vgl. ebenda

⁸⁴⁸ vgl. ebenda

⁸⁴⁹ Echo Planar Imaging-Sequenz

⁸⁵⁰ vgl. Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

Die hochauflösenden dreidimensionalen Gehirnabbildungen mit den farblich markierten, signifikant aktivierten Regionen entstehen allerdings erst, nachdem eine Vorverarbeitung der Rohdaten stattgefunden hat und diese vorverarbeiteten fMRT-Daten anschließend einer statistischen Analyse unterzogen wurden. Für die Vorverarbeitung und Analyse der fMRT-Daten konnte auf die Software *Statistical Parametric Mapping 8 (SPM8)*⁸⁵¹ zurückgegriffen werden. Die *Vorverarbeitung* beinhaltet alle in Kapitel 5.3.2⁸⁵² beschriebenen Vorverarbeitungsschritte: eine *Bewegungskorrektur* auf das erste Bild, eine zeitliche Korrektur auf Schicht 29 (verschachtelte Messung), eine *Normalisierung* in den MNI-Raum und auch eine räumliche Glättung mit einem 8mm³-Gaußfilter. Im Ergebnis der Vorverarbeitung der Daten liegen vergleichbare fMRT-Daten für die verschiedenen Personen vor, die zudem eine Fehlerbereinigung nach den zur Verfügung stehenden Möglichkeiten erfahren haben. Um die grafischen Outputs der fMRT-Analyse intuitiv interpretieren zu können, weisen die fMRT-Daten nach der Vorverarbeitung zudem die *neurologische Konvention*⁸⁵³ auf, d.h. Aktivierungen, die im Coronarschnitt links erscheinen, beziehen sich auch auf die linke Gehirnhälfte und rechts dargestellte Markierungen repräsentieren Aktivierungen in der rechten Gehirnhälfte. Zudem liegt eine Voxelgröße von 3mm³ vor. Nach Abschluss der Vorverarbeitung sind die Daten bereit für die statistische Analyse. Im Rahmen der *Datenanalyse* wurden alle 12 Probanden zunächst in Form einer *Einzelanalyse*⁸⁵⁴ untersucht. Zum einen ist sie Grundlage für die Gruppenanalyse, zum anderen besteht auf der Ebene der Einzelpersonen generell die Möglichkeit, Aktivierungsabweichungen im Vergleich zur Gruppenebene zu entdecken und zu berichten⁸⁵⁵. Da hinsichtlich der eigenen Untersuchung auf der Einzelebene keine Auffälligkeiten vorlagen, bezieht sich die Ergebnispräsentation im Nachfolgenden ausschließlich auf die Gruppenebene. Im Zuge der *Gruppenanalyse* wurde eine *Random-Effects-Analyse* angewendet, um zu verallgemeinerbaren Aussagen zu gelangen. Im Gegensatz zur Fixed-Effects-Analyse können hier sowohl die Varianz innerhalb der Personen wie auch die Varianz zwischen den Personen in die Effektschätzung mit einfließen.⁸⁵⁶ Im Ergebnis werden für unterschiedliche Kontraste t-Karten erstellt, die es zu interpretieren gilt.

Um zu aussagekräftigen Ergebnissen im Sinne eines methodisch nachvollziehbaren Vorgehens zu kommen, wurde neben der Anwendung einer Random-Effects-Analyse ein *zweistufiges Analyseverfahren* gewählt, das verschiedene methodische Herausforderungen berücksichtigt.⁸⁵⁷ In einem ersten Schritt wurde für jeden im nachfolgenden betrachteten Kontrast eine *Whole-Brain-Analyse* durchgeführt. Diese erfolgt auf einem *unkorrigierten Niveau* von $p = 0.001$, um zunächst einen Überblick über po-

⁸⁵¹ Wellcome Trust Centre for Neuroscience, London, UK; <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>

⁸⁵² Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

⁸⁵³ vgl. ebenda

⁸⁵⁴ vgl. Kapitel 5.4.1 Einzelanalyse

⁸⁵⁵ Im Zuge der Hypothesenbildung für die vorliegende fMRT-Untersuchung sind teilweise auch derartige Informationen berücksichtigt worden. Im Rahmen der Studie von Weber & Neuhaus (2007) wurden vereinzelt Deaktivierungen des anterioren Cingulum berichtet.

⁸⁵⁶ vgl. Kapitel 5.4.2 Gruppenanalyse

⁸⁵⁷ vgl. Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

tenziell aktivierte Bereiche zu gewinnen. Durch dieses liberale Vorgehen wird vermieden, dass tatsächlich vorhandene Aktivierungen übersehen werden (Minimierung des Fehlers 2. Art). Da die Inflation des α -Fehlers im Rahmen der Whole-Brain-Analyse mit mehreren 10.000 simultanen Tests eine große Relevanz besitzt, sind die gefundenen Bereiche als erster Hinweis auf mögliche aktivierte Areale anzusehen. Um zwischen farblichen Markierungen⁸⁵⁸ differenzieren zu können, die lediglich Messfehler bzw. Rauschen darstellen und solchen, die stellvertretend für tatsächliche Aktivierungen oder Deaktivierungen stehen, werden die im Zuge der Whole-Brain-Analyse gefundenen Bereiche in einem zweiten Schritt mittels *ROI-Analysen (im weiteren Sinne)* bzw. einer *Small Volume Correction (SVC)* genauer betrachtet. Das Zwischenergebnis auf der ersten Stufe besteht in der Benennung der potenziell aktivierten Gehirnregionen durch Experten. Mit Kenntnis dieser Bereiche gilt es Small Volumes zu definieren, die auf der Grundlage unabhängiger Studienergebnisse erstellt werden. Hinsichtlich der zweiten Analysestufe im Sinne einer Small Volume Correction werden nicht mehr alle Datenpunkte in die statistische Analyse einbezogen, sondern nur noch diejenigen, die innerhalb der definierten Masken für die betreffenden Regionen liegen. Die Analyse erstreckt sich folglich über viel kleinere Bereiche, die zusätzlich über die *FWER-Korrektur*⁸⁵⁹ für multiple Tests korrigiert werden. Genau genommen wird hierzu die Theorie der Gaußfelder verwendet. Dieser zweite Schritt kann im Gegensatz zur Whole-Brain-Analyse, die als eher liberal anzusehen ist, als konservativ eingeschätzt werden. Im Ergebnis werden nur noch diejenigen Bereiche bzw. *Regions of Interest* als signifikant ausgewiesen, die unter diesen strengeren Kriterien noch deutliche Unterschiede im Vergleich zweier Bedingungen aufweisen. Im Ergebnisteil werden zudem nur diejenigen Aktivierungen berichtet, die im Zuge einer Small Volume Correction auf dem Cluster-Level signifikant sind.

Nachdem der Rahmen der vorliegenden Studie durch die bisherigen Unterkapitel ausführlich dargelegt wurde, geht es im nächsten Schritt darum, die Ergebnisse der Untersuchung darzustellen. Zur Ergebnisdarstellung ist anzumerken, dass die grafischen Gehirnabbildungen in Folge der Whole-Brain-Analyse generiert wurden. Im Ergebnis der Small Volume Correction erhält man nur eine statistische Tabelle für das betrachtete Volumen, keine neue Gehirnabbildung. Aus diesem Grund wird in den grafischen Abbildungen nur auf diejenigen farblichen Markierungen eingegangen, die nach der Small Volume Correction auf Cluster-Level signifikant sind. Es werden somit nur die potenziellen Aktivierungen herausgestellt, die auch nach der zweiten Analysestufe als tatsächliche Aktivierungen bestehen bleiben.

6.5 Ergebnisse

Hinsichtlich der Ergebnisse ist anzumerken, dass hier zweierlei Arten von Daten vorliegen, die als Ergebnisse zu bezeichnen und in diesem Sinne im weiteren Verlauf zu interpretieren sind. Zum einen besteht die Möglichkeit aus den fMRT-Daten die gene-

⁸⁵⁸ als signifikant ausgezeichnete Aktivierungen

⁸⁵⁹ vgl. Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

relle forschungsleitende Frage zu beantworten. Zum anderen liegen zusätzlich auch die Verhaltensdaten der zwölf Befragten vor, die dabei helfen können, weitere Erkenntnisse aus dieser Untersuchung abzuleiten.

6.5.1 fMRT-Daten

Die fMRT-Daten stellen die primären Ergebnisse dieser Untersuchung dar. Sie liegen grafisch in Form einer dreidimensionalen Gehirnabbildung vor. Diese Gehirnabbildungen können im Rahmen der Ergebnisdarstellung in SPM8 gleichzeitig in einem coronaren⁸⁶⁰, sagittalen⁸⁶¹ und axialen⁸⁶² Gehirnschnitt genauer betrachtet werden. Die grafische Abbildung ist mit einer entsprechenden voxelweisen Statistik verbunden, so dass hierbei interaktiv für jeden angesteuerten Voxel der generierten dreidimensionalen Gehirndarstellung im Sinne der statistischen Analyse die jeweiligen Signifikanzwerte angezeigt werden können. Im Falle signifikanter Aktivierungen bzw. Deaktivierungen sind dann an den entsprechenden Stellen innerhalb der jeweiligen Gehirnschnitte farbliche Markierungen zu erkennen. Wie bereits in Kapitel 5.4.1⁸⁶³ angesprochen, stellen die grafischen Gehirnabbildungen im Rahmen der Ergebnispräsentation sog. *Kontraste* im Sinne der *Subtraktionslogik* dar. Hierbei werden die Aktivierungen von zwei Bedingungen, die sich i.d.R. nur durch einen Sachverhalt unterscheiden, übereinander gelegt. Im Ergebnis werden nur die Bereiche farblich markiert, die beim Vergleich der beiden Bedingungen unterschiedliche Aktivierungen aufweisen und folglich in der einen Bedingung signifikant aktiver oder signifikant weniger aktiv sind. Signifikante Aktivierungsunterschiede sind den entsprechenden Bedingungen zuzuordnen und werden im Anschluss in Bezug auf diese anhand ihrer Bedeutung interpretiert. Theoretisch können aufgrund des relativ komplexen Designs (2x3x2-Design) unterschiedliche Kontraste betrachtet werden. Aufgrund des allgemein schlechten Signal-zu-Rausch-Verhältnisses bzw. der generell niedrigen Signalstärke bei fMRT-Messungen ist es für die Aufdeckung signifikanter Aktivierungsunterschiede, bezogen auf einen speziellen Kontrast, erforderlich, dass genügend Beobachtungen bzw. Stimuli pro Bedingung vorhanden sind.⁸⁶⁴ Aus diesem Grund konzentriert sich die Ergebnisdarstellung *nur* auf drei Kontraste, für die zum einen ausreichend viele Beobachtungen zur Verfügung stehen und die zum anderen signifikante Aktivierungsunterschiede aufweisen.⁸⁶⁵ Wie bereits angesprochen werden im Nachfolgenden nur Ergebnisse auf der Gruppenebene dargestellt.

Der erste dargestellte Kontrast stellt die Bedingungen *Kaufen* und *Nicht kaufen* gegenüber. Hierzu werden auf der einen Seite alle Stimuli gebündelt, die im Experiment

⁸⁶⁰ Gehirnschnitte von vorne nach hinten, so als würde man von vorne in den Kopf gucken

⁸⁶¹ Gehirnschnitte von links nach rechts, so als würde man von der Seite in den Kopf gucken

⁸⁶² Gehirnschnitte von oben nach unten, so als würde man von oben in den Kopf gucken

⁸⁶³ Kapitel 5.4.1 Einzelanalyse

⁸⁶⁴ vgl. Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

⁸⁶⁵ Alle weiteren möglichen Kontraste ergaben keine signifikanten Aktivierungsunterschiede und werden daher an dieser Stelle nicht dargestellt. Auf einige theoretisch interessante Kontraste wird im Rahmen von *Kapitel 7.2.2 Handlungstheoretische Interpretation des Kontrastes SA-Signal vs. kein SA-Signal* noch hingewiesen.

gekauft wurden, auf der anderen Seite stehen alle Stimuli, die nicht gekauft wurden. Im Rahmen dieses Kontrastes, wie auch bei den beiden anderen betrachteten Kontrasten, vermischen sich alle Faktoren mit ihren Ausprägungen innerhalb der beiden Bedingungen. Der Unterschied liegt hier lediglich in der Entscheidung, die ein Proband in Bezug auf ein Kaufangebot getroffen hat. Folgender Frage wird mit diesem Kontrast auf den Grund gegangen: In welchen Hirnregionen lassen sich in Abhängigkeit der Entscheidung ein Produkt zu kaufen oder nicht zu kaufen signifikante Aktivierungsunterschiede messen. Anders ausgedrückt, zeigt sich im Ergebnis, welcher Bereich aktiver oder weniger aktiv ist, wenn man einen Kauf tätigt.

Um die Auswirkungen des multiplen Testens und die Wirkung des gewählten Signifikanzniveaus bzw. einer entsprechenden Korrektur zu verdeutlichen, erfolgt für den ersten Kontrast beispielhaft zunächst die Ergebnisdarstellung auf der ersten Analysestufe zu zwei unterschiedlichen Signifikanzniveaus. Abbildung 88 zeigt das Ergebnis der Whole-Brain-Analyse für $p_{\text{unkorrigiert}} = 0.005$, Abbildung 89 bildet hingegen das Ergebnis im Fall $p_{\text{unkorrigiert}} = 0.001$ ab.

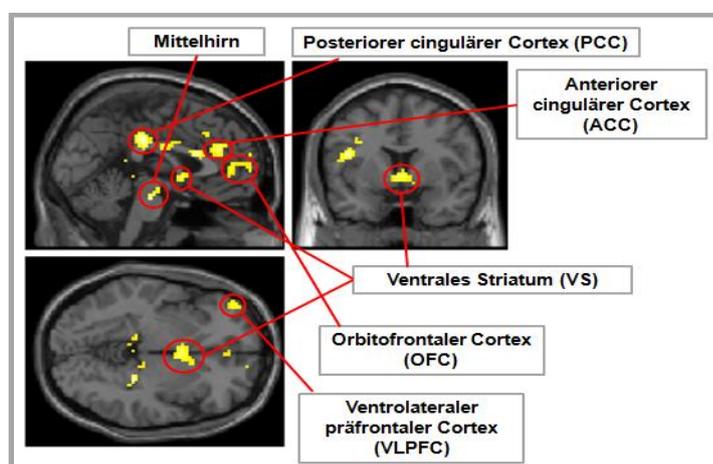


Abbildung 88: t-Kontrast „Kaufen vs. Nicht kaufen“ (Whole-Brain-Analyse: $p_{\text{unkorrigiert}} < 0.005$)

In Abbildung 88 indizieren die gelb markierten Bereiche eine signifikant erhöhte Aktivierung, für den Fall eines Kaufes im Kontrast zu einem Nicht-Kauf. Es ist erkennbar, dass im Rahmen dieser *unkorrigierten Whole-Brain-Analyse* ($p = 0.005$) mehrere Bereiche mit einer signifikanten Aktivierung ausgezeichnet sind. Wie bereits beschrieben, sind die Ergebnisse auf dieser ersten Analysestufe im Sinne *potenziell* aktivierter Regionen zu verstehen. Mit der Unterstützung eines Experten⁸⁶⁶ konnten zunächst folgende potentiell relevante Areale i.V.m. *Kaufen* herausgestellt werden: der orbitofrontale Cortex (OFC), der ventrolaterale präfrontale Cortex (VLPFC), der anteriore cinguläre Cortex (ACC), das ventrale Striatum (VS), das Mittelhirn und der posteriore cinguläre Cortex (PCC).⁸⁶⁷

⁸⁶⁶ vgl. Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

⁸⁶⁷ Auf der Abbildung finden sich auch noch ein paar vereinzelt gelb markierte Stellen, denen hier keine weitere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Bei diesen vermeintlichen Aktivierungen handelt es sich lediglich um kleine Stellen ohne weitere Ausdehnung. Aus der statistischen Logik im Zusammenhang mit der fMRT heraus ist es sehr unwahrscheinlich, dass dies eine tatsächlich vorhandene Aktivierung darstellt. Die rot umkreisten Bereiche zeigen eine größere Ausdehnung. Hier ist die Wahrscheinlichkeit deutlich höher, dass dieser ausgedehnte Bereich eine tatsächliche Aktivierung repräsentiert.

Betrachtet man im Vergleich dazu Abbildung 89, welche das Ergebnis der etwas konservativeren Whole-Brain-Analyse ($p_{\text{unkorrigiert}} = 0.001$) darstellt, so ist festzustellen, dass bereits durch dieses veränderte Signifikanzniveau deutlich weniger potenzielle Aktivierungen gemeldet werden.

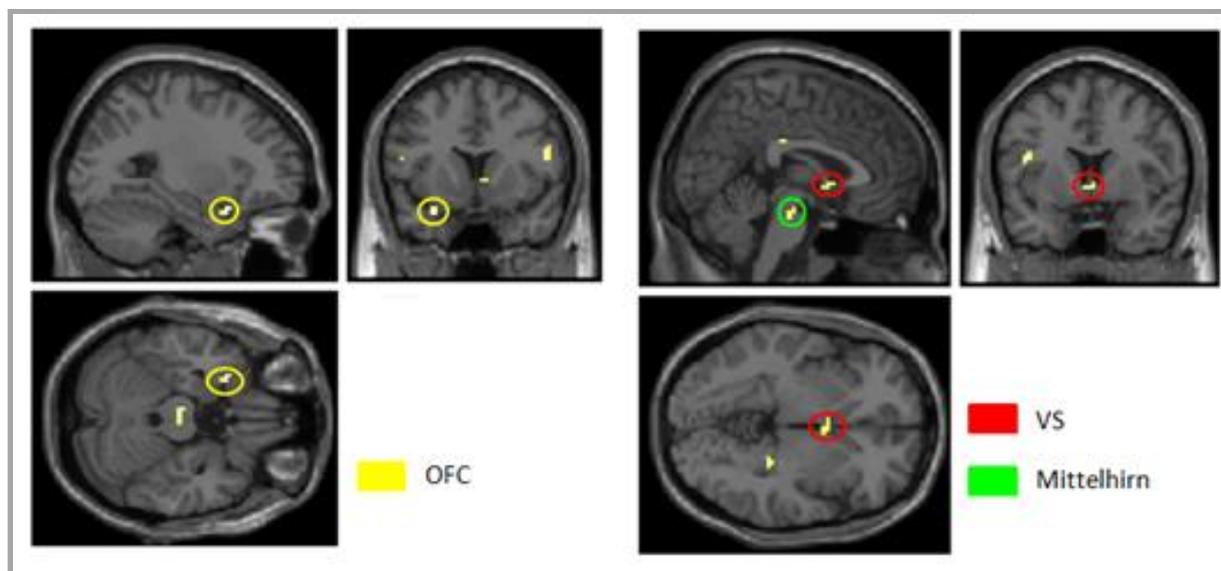


Abbildung 89: t-Kontrast „Kaufen vs. Nicht kaufen“ (Whole-Brain-Analyse: $p_{\text{unkorrigiert}} < 0.001$)

Wie bereits im Rahmen von Kapitel 5.4.3⁸⁶⁸ erläutert, sieht das eigene Vorgehen auf der ersten Analysestufe generell eine Whole-Brain-Analyse mit einem unkorrigierten p-Wert von 0.001 vor. Dieser Wert gilt als Kompromiss zwischen einem zu liberalen (z.B. $p_{\text{unkorrigiert}} = 0.005$) und einem zu konservativen Vorgehen (Anwendung einer Korrektur) in Bezug auf die Whole-Brain-Analyse. Die verschiedenen statistischen Tabellen in Bezug auf die Whole-Brain-Analysen sind dem Anhang⁸⁶⁹ zu entnehmen. Diese potenziell höher aktivierten Gehirnareale bilden den Ausgangspunkt der zweiten Analysestufe, einer *ROI-Analyse im weiteren Sinne*⁸⁷⁰. Hierbei werden, wie bereits erläutert, nicht mehr alle Datenpunkte berücksichtigt, sondern nur noch diejenigen, die innerhalb definierter Gehirnregionen liegen und in diesen Bereichen einer *Small Volume Correction (SVC)* unterzogen werden. Um diese Small Volume Correction (SVC) durchführen zu können, wurden im Vorfeld ROI-Masken definiert, innerhalb derer eine konservative Korrektur letztlich Anwendung fand. Für die ROI-Definition wurde auf, von den fMRT-Daten unabhängige, Studienergebnisse zurückgegriffen. Die gezieltere Analyse über die Small Volume Correction (SVC) für den Kontrast *Kaufen vs. Nicht kaufen* ergab, dass letztendlich drei Regionen signifikant höhere Aktivierungen auf einem Cluster-Level aufweisen, wenn ein Angebot gekauft wird. Im Ergebnis können folgende Regionen berichtet werden, die in Abbildung 89 farblich umkreist sind: das *Mittelhirn*, das *ventrale Striatum (VS)* und der *orbitofrontale Cortex (OFC)*. Die statistischen Ergebnisse in Bezug auf die zweite Analysestufe sind den Tabellen 3 bis 5 zu entnehmen. Folgende MNI-

⁸⁶⁸ Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

⁸⁶⁹ vgl. Anhang 4 - 8 (Statistische Tabellen für den Kontrast *Kaufen vs. Nicht kaufen*)

⁸⁷⁰ vgl. Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

Koordinatenpunkte⁸⁷¹ stellten jeweils das Zentrum des Small Volumes mit einem 10mm Radius dar: [3, -21, -18] für das Mittelhirn⁸⁷², [9, 9, -3] für das VS⁸⁷³ und [-27, 18, -15] für den OFC⁸⁷⁴.

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [3,-21,-18]													
set-level		cluster-level				peak-level					mmmmmm		
p	c	$p_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	p_{uncorr}	$p_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	(Z_{\equiv})	p_{uncorr}			
		0.015	0.229	7	0.229	0.014	0.435	3.94	3.63	0.000	-3	-21	-24
						0.039	0.614	3.51	3.27	0.001	3	-18	-18

Tabelle 3: „Kaufen vs. Nicht kaufen“ Small Volume Correction (Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$) für das Mittelhirn

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [9,9,-3]													
set-level		cluster-level				peak-level					mmmmmm		
p	c	$p_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	p_{uncorr}	$p_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	(Z_{\equiv})	p_{uncorr}			
		0.010	0.154	10	0.154	0.029	0.763	3.65	3.39	0.000	0	6	-3
						0.048	0.763	3.41	3.19	0.001	6	12	0

Tabelle 4: „Kaufen vs. Nicht kaufen“ Small Volume Correction (Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$) für das VS

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [-27,18,-15]													
set-level		cluster-level				peak-level					mmmmmm		
p	c	$p_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	p_{uncorr}	$p_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	(Z_{\equiv})	p_{uncorr}			
0.002	2	0.020	0.433	5	0.308	0.006	0.172	4.31	3.91	0.000	-27	12	-21
		0.028	0.433	3	0.433	0.048	0.754	3.41	3.20	0.001	-24	21	-18

Tabelle 5: „Kaufen vs. Nicht kaufen“ Small Volume Correction (Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$) für den OFC

Beim zweiten Kontrast wird ein Vergleich zwischen den Bedingungen *mehrere Produkte* und *ein Produkt* angestellt. Wie beim ersten Kontrast werden auch hier für die Betrachtung der beiden Bedingungen jeweils alle Stimuli gebündelt, die ein bzw. mehrere Produkte im Kaufangebot abbilden. In Abbildung 90 ist zu erkennen, dass der *dorsolaterale* bzw. *seitliche Präfrontalcortex (DLPFC)* beidseitig signifikant höher aktiviert ist, wenn mehrere Produkte ein Kaufangebot ausmachen. Zudem zeigt Abbildung 91 eine weitere signifikante Aktivierung im *visuellen Cortex*.

⁸⁷¹ Es werden jeweils nur die Koordinaten und Quellen berichtet, die i.V.m. signifikanten Aktivierungen stehen.

⁸⁷² vgl. Knutson, B. et al. (2007)

⁸⁷³ vgl. Zink, C. F. et al. (2008)

⁸⁷⁴ vgl. O'Doherty, J. P.; Critchley, H.; Deichmann, R.; Dolan, R. J. (2003)

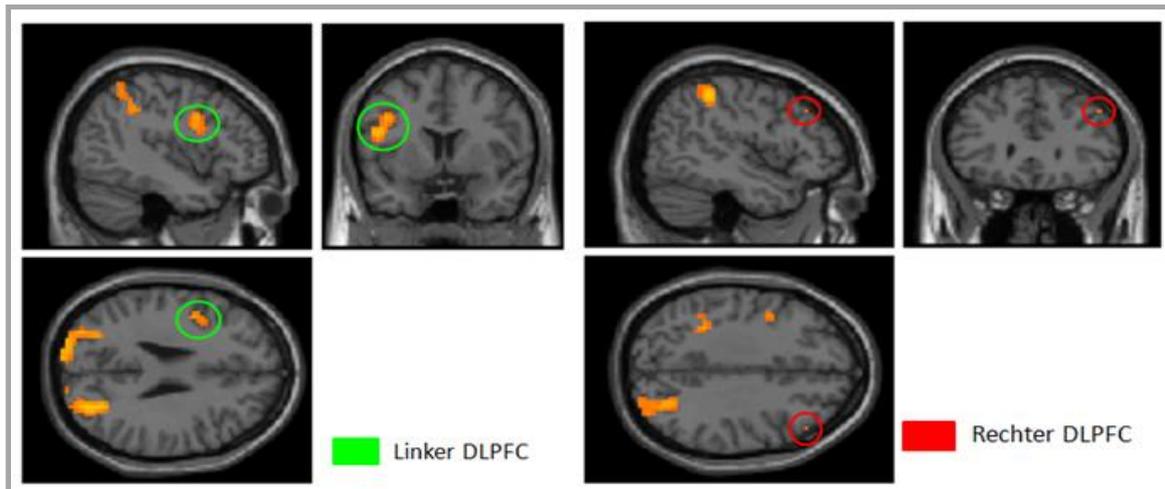


Abbildung 90: t-Kontrast „Mehrere Produkte vs. ein Produkt“ (I) (Small Volume Correction: Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$)

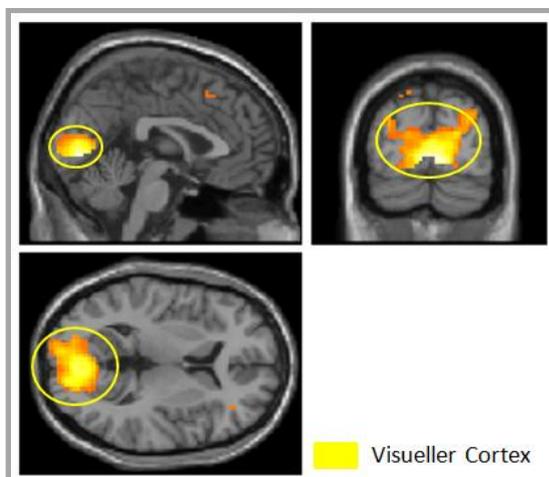


Abbildung 91: t-Kontrast „Mehrere Produkte vs. ein Produkt“ (II) (Small Volume Correction: Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$)

Die statistischen Tabellen in Bezug auf die Small Volume Correction (SVC) sind dem Anhang⁸⁷⁵ zu entnehmen. Für die ROI-Definition wurden die MNI-Koordinaten [-45, 18, 24] für den linken seitlichen Präfrontalcortex⁸⁷⁶, [51, 27, 42] für den rechten seitlichen Präfrontalcortex⁸⁷⁷ und [-9, -81, 3] für den visuellen Cortex⁸⁷⁸ herangezogen.

Der letzte Kontrast beschäftigt sich mit der zentralen Fragestellung dieser Untersuchung. Gegenüber gestellt werden hier auf der einen Seite alle Stimuli, die durch das SA-Signal als *Sonderangebote* ausgezeichnet wurden und auf der anderen Seite alle Stimuli, die nicht über ein SA-Signal verfügten und insofern *reguläre Kaufangebote* suggerierten. Betrachtet wird hier, welche Gehirnregionen eine signifikant stärkere oder schwächere Aktivität aufweisen, für den Fall, dass ein SA-Signal eingeblendet wurde. Abbildung 92 ist diesbezüglich zu entnehmen, dass die *vordere Inselrinde* bzw. *anteriore insula* beim Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* stärker aktiviert ist. Festzuhalten ist folglich, dass sich die Wirkung des SA-Signals im Rahmen dieser Studie in der signifikant erhöhten Aktivierung der vorderen Inselrinde widerspiegelt.

⁸⁷⁵ vgl. Anhang 9 - 12 (Statistische Tabellen für den Kontrast *Mehrere Produkte vs. ein Produkt*)

⁸⁷⁶ vgl. Owen, A. M.; McMillan, K. M.; Laird, A. R.; Bullmore, E. (2005)

⁸⁷⁷ vgl. Hutcherson, C. A.; Plassmann, H.; Gross, J. J.; Rangel, A. (2012)

⁸⁷⁸ vgl. Saito, D. N.; Okada, T.; Honda, M.; Yonekura, Y.; Sadato, N. (2006)

Die statistischen Tabellen bezüglich der Small Volume Correction (SVC) können im Anhang nachempfunden werden.⁸⁷⁹ Zur Erstellung der ROI-Masken wurden für die vordere linke Inselrinde⁸⁸⁰ die MNI-Koordinaten [-27, 21, -3] und [36, 27, 6] für die vordere rechte Inselrinde⁸⁸¹ verwendet.

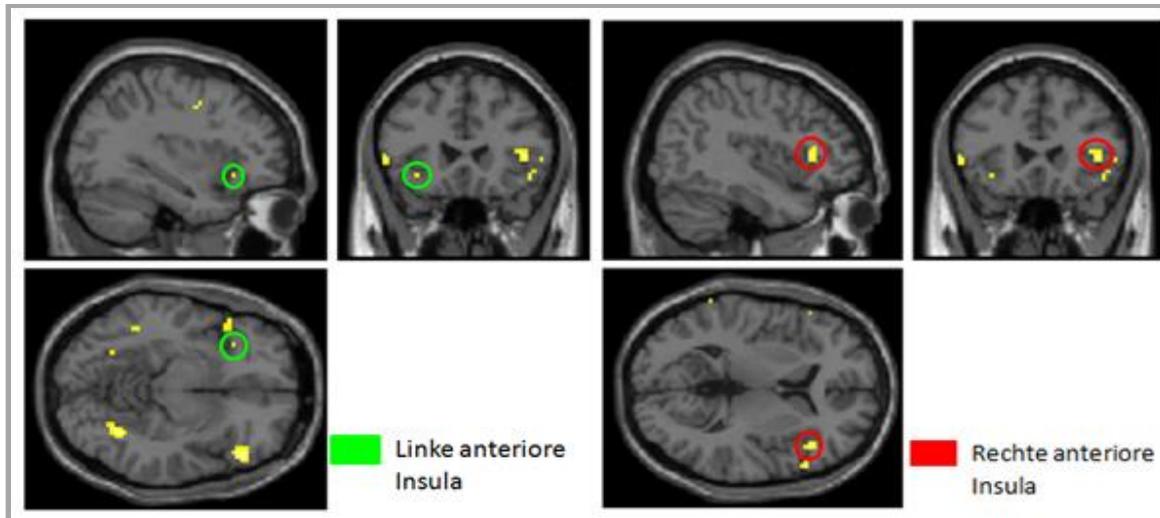


Abbildung 92: t-Kontrast „SA-Signal vs. kein SA-Signal“ (Small Volume Correction: Cluster-Level $p_{FWER} < 0.05$)

6.5.2 Verhaltensdaten

Neben den Gehirnschans liegen zusätzlich auch die Verhaltensdaten der zwölf Probanden vor. Diese stellten sich im Rahmen der dargestellten Untersuchung der Aufgabe, für jedes präsentierte Angebot eine positive bzw. negative Kaufentscheidung zu treffen. Um die Ergebnisdarstellung bezüglich der Verhaltensdaten besser nachvollziehen zu können, wird noch einmal kurz auf das vorliegende faktorielle Design eingegangen. Wie bereits in Kapitel 6.3.1⁸⁸² beschrieben, wurden die in dieser Studie verwendeten Stimuli durch die drei Faktoren *Produktmenge* (**e**_{in}/ **m**_{ehrere}), *Preis* (**g**_{ünstig}/ **n**_{ormal}/ **t**_{eu**e****r**) und *Sonderangebotssignal* (**N**_{ein}/ **S** _{für Ja}) charakterisiert. Bildet man alle möglichen Kombinationen aus den drei Faktoren so können insgesamt zwölf unterschiedliche Kategorien gebildet werden (egN, egS, enN, ...). Bezogen auf die Verhaltensdaten wurde für jede der zwölf Personen protokolliert, wie viele Kaufangebote in den einzelnen Kategorien prozentual angenommen wurden (*% Käufe Kategorie*) und wie viel Zeit sie durchschnittlich für die Entscheidungen innerhalb der einzelnen Kategorien benötigten (*Response Time*). Die Verhaltensdaten werden nachfolgend in aggregierter Form dargestellt, da hierbei, wie bei den fMRT-Daten, generelle Aussagen auf Gruppenniveau von Interesse sind. Da in Bezug auf die Verhaltensdaten eine relativ geringe Menge an Beobachtungen vorliegt (n=12), erscheint ein Signifikanztest an dieser Stelle nicht weiter sinnvoll. Vielmehr werden die Verhaltensdaten deskriptiv betrachtet und nur tendenziell interpretiert, um als ergänzende Information das Gesamtbild der Untersuchung abzurunden. Um einen genaueren}

⁸⁷⁹ vgl. Anhang 13 - 15 (Statistische Tabellen für den Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal*)

⁸⁸⁰ vgl. Knutson, B. et al. (2007)

⁸⁸¹ vgl. Caria, A.; Veit, R.; Sitaram, R.; Lotze, M.; Weiskopf, N.; Grodd, W.; Birbaumer, Niels (2007)

⁸⁸² Kapitel 6.3.1 Der Versuchsaufbau

Einblick in die Verhaltensdaten zu gewinnen, werden diese aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet.

In einem ersten Schritt werden die *Einzelprodukt- und die Produktpaketsituation* in Tabelle 6 *getrennt voneinander* dargestellt. In den beiden Perspektiven gilt es innerhalb jeder Preisstufe die Reaktionen auf Sonderangebote und normale Kaufangebote zu vergleichen. Betrachtet man zunächst die Wirkung von *Sonderangeboten bei der Darbietung eines Produktes*, so festzuhalten, dass nur unter der Bedingung *günstiger Preis* prozentual gesehen mehr Kaufangebote angenommen wurden, wenn ein Sonderangebotssignal abgebildet war (+8,1%). Wurde bei der Einzelabbildung hingegen ein *normaler* oder ein *teurer Preis* angegeben, so wurden ausgezeichnete Sonderangebote seltener ausgewählt als reguläre Angebote (enS vs. enN = -6,6% und etS vs. etN = -6,5%).

Kategorie	% (Käufe Kategorie)	RT (Response Time)	Kategorie	% (Käufe Kategorie)	RT (Response Time)
egN	61,60%	1121,7 ms	mgN	58,10%	1313,3 ms
egS	69,70%	1293,7 ms	mgS	59,80%	1337,6 ms
Kategorie	% (Käufe Kategorie)	RT (Response Time)	Kategorie	% (Käufe Kategorie)	RT (Response Time)
enN	38,40%	1215,6 ms	mnN	34,90%	1402,7 ms
enS	31,80%	1306,5 ms	mnS	36,80%	1378,7 ms
Kategorie	% (Käufe Kategorie)	RT (Response Time)	Kategorie	% (Käufe Kategorie)	RT (Response Time)
etN	22,30%	1161,9 ms	mtN	15,90%	1549,7 ms
etS	15,80%	1476,5 ms	mtS	18,20%	1485,1 ms

Tabelle 6: Separate Betrachtung der Einzelprodukt- und Produktpaketperspektive

Abbildung 93 verdeutlicht diesen Sachverhalt noch einmal in Form eines Balkendiagramms.

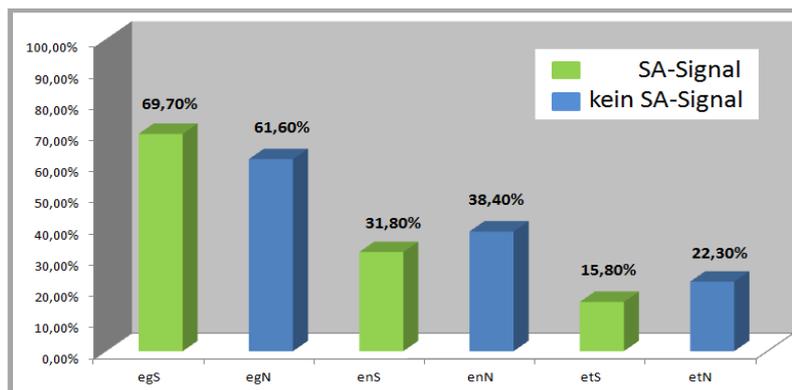


Abbildung 93: Einzelproduktsituation Vergleich S vs. N (% Käufe Kategorie)

Wird ein Sonderangebotssignal i.V.m. einem Kaufangebot eingeblendet, weisen die Probanden generell etwas höhere Response-Zeiten auf. Bei der Betrachtung von Abbildung 94 fällt auf, dass es im Vergleich bei dem teuren Preis länger dauert (+314,6 ms) eine Entscheidung zu fällen als bei den beiden anderen Preisstufen (g = +172,0 ms/ n = +90,6 ms).

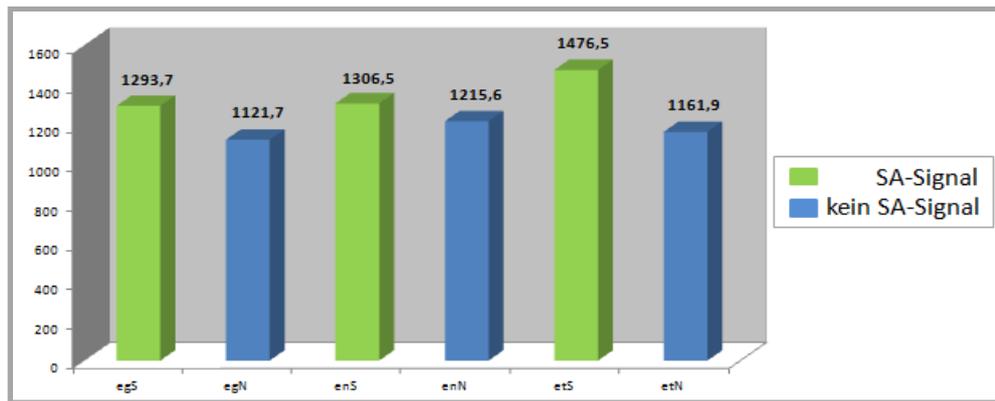


Abbildung 94: Einzelproduktsituation Vergleich S vs. N (Response Time in ms)

Für den Fall, dass *mehrere Produkte Teil eines Kaufangebotes* sind, zeigen die Verhaltensdaten ein etwas anderes Bild.⁸⁸³ Das Verhalten der Probanden deutet generell auf ein homogeneres Bild hin. Dieser Sachverhalt ist auch Abbildung 95 und Abbildung 96 zu entnehmen. Bei einem *günstigen Preis* gibt es kaum einen Unterschied zwischen der Annahme eines Kaufangebots mit und ohne Sonderangebotssignal. Der Unterschied liegt prozentual gesehen bei 1,8% zu Gunsten der Angebote mit Sonderangebotssignal. Auch bezüglich der Response-Zeit gibt es kaum Differenzen. Mit 24,3ms dauert eine Reaktion einen kleinen Tick länger für den Fall, dass ein Sonderangebot markiert ist. Beim Vergleich in den Kategorien mit der *normalen* und der *teuren Preisstufe* verhält es sich ebenfalls so, dass man für Angebote mit einem Sonderangebotssignal ein leichtes Plus (mnS vs. mnN = +1,9% und mtS vs. mtN = +2,3%) verzeichnen kann. Bei der normalen Preiskategorie fällt eine allgemeine Entscheidung allerdings 24ms und bei der teuren Preiskategorie ca. 65 ms schneller, wenn ein Sonderangebotssignal vorhanden ist als bei einem vergleichbaren Angebot ohne Sonderangebotssignal.

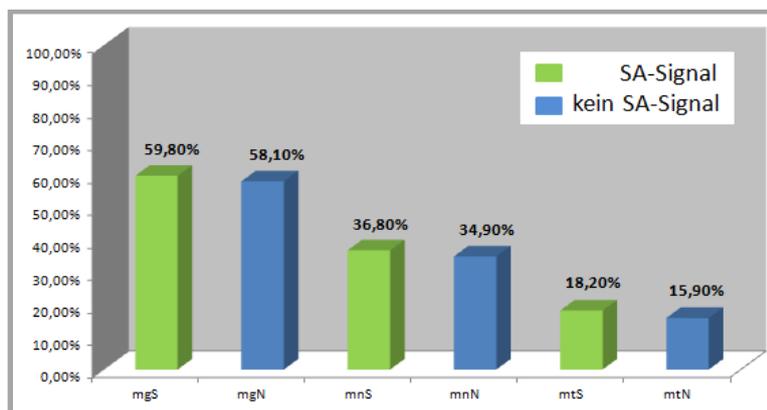


Abbildung 95: Produktpaketsituation Vergleich S vs. N (% Käufe Kategorie)

⁸⁸³ vgl. Tabelle 6: Separate Betrachtung der Einzelprodukt- und Produktpaketperspektive

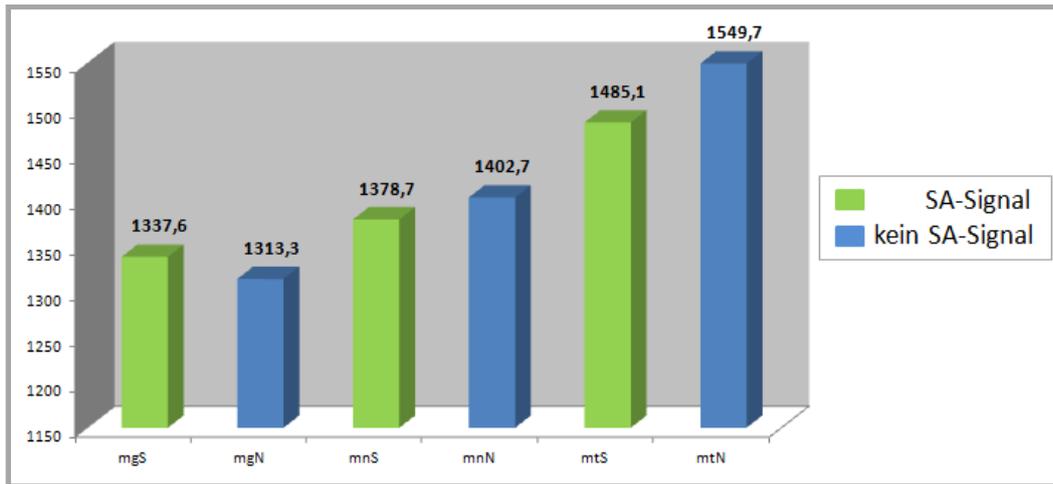


Abbildung 96: Produktpaketsituation Vergleich S vs. N (Response Time in ms)

Nach der getrennten Betrachtung von Einzelprodukt- und Produktpaketsituation erfolgt nun, wie Tabelle 7 zu entnehmen ist, in einem weiteren Schritt der *direkte Vergleich beider Perspektiven sonderangebotsbezogene Entscheidungen betreffend*. Durch diesen Vergleich können die unterschiedlichen Eindrucksbilder prägnanter voneinander abgesetzt werden.

Kategorie	% (Käufe Kategorie)	RT (Response Time)	Kategorie	% (Käufe Kategorie)	RT (Response Time)
egS	69,70%	1293,7 ms	mgS	59,80%	1337,6 ms
enS	31,80%	1306,5 ms	mnS	36,80%	1378,7 ms
etS	15,80%	1476,5 ms	mtS	18,20%	1485,1 ms

Tabelle 7: Gemeinsame Betrachtung von Einzelprodukt- und Produktpaketperspektive in Bezug auf Sonderangebote

Ruft man sich die Zahlen aus der getrennten Perspektive kurz in Erinnerung, so wurden in der Produktpaketsituation in der Kategorie mit dem günstigen Preis leicht mehr Sonderangebote als reguläre Kaufangebote gekauft (+ 2%).⁸⁸⁴ Beim direkten Vergleich mit der Einzelproduktsituation (egS vs. mgS) ist allerdings ein größerer Unterschied zu erkennen. Auch Abbildung 97 veranschaulicht, dass bei der Einzelproduktsituation ca. 10% mehr Käufe getätigt wurden.

Im Rahmen der separaten Betrachtung kommt es in der Produktpaketsituation in den beiden Preiskategorien *normal* und *teuer* auch zu einem ganz leichten positiven Effekt des Sonderangebotssignals im Kontrast zu regulären Angeboten (ca. +2%).⁸⁸⁵ Vergleicht man die Wirkung des Sonderangebotssignals direkt mit der Einzelproduktsituation für beide genannten Preisstufen, so werden bei einem normalen Preis 5% (enS vs. mnS) und bei einem teuren Preis immerhin noch 2,5% (etS vs. mtS) mehr Käufe zu Gunsten der Produktpaketsituation getätigt, wie ebenfalls Abbildung 97 zu entnehmen ist.

⁸⁸⁴ vgl. Abbildung 95: Produktpaketsituation Vergleich S vs. N (% Käufe Kategorie)

⁸⁸⁵ vgl. ebenda

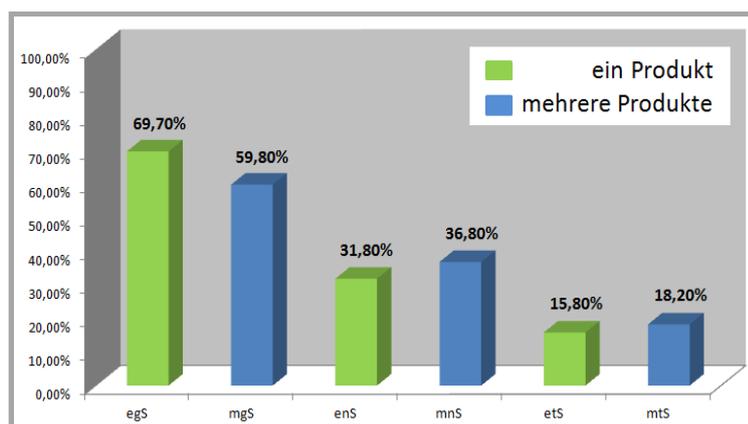


Abbildung 97: Einzelprodukt- vs. Produktpaketsituation Vergleich S (% Käufe pro Kategorie)

Über die Betrachtung der Response-Zeiten ist generell die Tendenz zu erkennen, dass im Rahmen der Entscheidungen hinsichtlich der Produktpaketsituation mehr Zeit für eine Entscheidung benötigt wurde. Allerdings handelt es sich hier eher um kleine Unterschiede, die in Tabelle 7 und Abbildung 98 zum Ausdruck kommen.

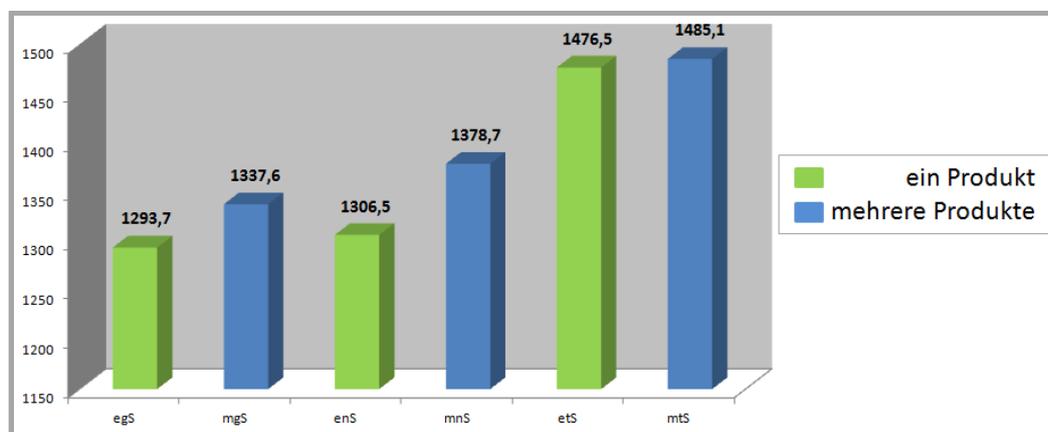


Abbildung 98: Einzelprodukt- vs. Produktpaketsituation Vergleich S (Response Time in ms)

6.6 Interpretation

Nach der Darstellung der Ergebnisse in Bezug auf die fMRT- und Verhaltensdaten erfolgt an dieser Stelle eine erste Interpretation. Dazu wird die Bedeutung der im Zuge der fMRT erfassten neuronalen Aktivierungen in Bezug auf die entsprechenden Kontraste interpretiert. Im Zusammenhang mit den beiden ersten Kontrasten liegen keine Hypothesen vor, die es zu überprüfen gilt, da diese Kontraste nicht das zentrale Forschungsinteresse darstellen. Allerdings erfolgt für beide Kontraste eine Art theoretische Herleitung, um einen Rahmen für die Einordnung dieser fMRT-Ergebnisse zu gewährleisten. Den beiden Kontrasten wird an dieser Stelle Aufmerksamkeit geschenkt, da sie im Zuge der Datenanalyse signifikante Aktivierungen aufwiesen. In diesem Sinne können sie auch als weitere Beispiele für die neuronale Interpretation verwendet werden und zudem im Fall plausibler Interpretationen aus theoretischer Sicht die Messung bzw. das Ergebnis in Bezug auf den Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* in gewisser Weise validieren. Für den letztgenannten Kontrast liegen hin-

gegen zwei, in Kapitel 6.2⁸⁸⁶ abgeleitete, Hypothesen vor, die hier Berücksichtigung finden.

Beim Kontrast *Kaufen vs. Nicht kaufen* geht es um die Herausstellung und Interpretation der Gehirnareale, die stärker bzw. schwächer aktiviert sind, wenn ein Angebot gekauft bzw. abgelehnt wurde. In diesem Kontrast wird der neuronale Aktivierungsunterschied abgebildet, der generell zwischen Stimuli der Bedingung *Kaufen* (alle Stimuli, die gekaufte Kaufangebote repräsentieren) und Stimuli der Bedingung *Nicht kaufen* (alle Angebote, die nicht gekauft wurden) besteht. Der inhaltliche Unterschied zwischen beiden Bedingungen liegt in der Überlegung, dass die Probanden im Rahmen der gekauften Angebote in die Erwartung einer Belohnung versetzt wurden, was letztendlich zum Kauf eines Angebots führt. Diese Kaufangebote wirken insofern belohnend, als dass gekaufte Angebote das verhaltenssteuernde Prinzip des Gain Seeking zum Ausdruck bringen. Man wendet sich Dingen zu, die Belohnung versprechen. Die Hinwendung manifestiert sich dann in der *Kaufentscheidung*. Anders ausgedrückt wird das menschliche Verhalten durch die Ziele bestimmt.⁸⁸⁷ Diese Belohnung bzw. Belohnungserwartung fehlt bei den nicht gekauften Angeboten. Daher kann intuitiv vermutet werden, dass im Zuge des Kontrastes *Kaufen vs. Nicht kaufen* verstärkt Gehirnregionen aktiviert sind, die mit dem Belohnungssystem zusammenhängen. Es wäre kontraintuitiv, wenn Areale aktiviert wären, die bspw. in die Verarbeitung negativer Emotionen involviert sind.

Für diesen Kontrast ergaben sich, wie in Kapitel 6.5.1⁸⁸⁸ berichtet, erhöhte Aktivierungen im Bereich des Mittelhirns, des ventralen Striatums (VS) und des orbitofrontalen Cortex (OFC). Diese drei aktivierten Gehirnregionen können dem mesolimbischen System zugeordnet werden. „*Das mesolimbische System dominiert bei der Registrierung, Verarbeitung und Voraussage natürlicher Belohnungsereignisse und stellt zugleich einen wichtigen Teil des zerebralen Belohnungssystems dar, und zwar im Zusammenhang mit der Ausschüttung der sogenannten hirneigenen Drogen, der Endorphine und Enkephaline, die in uns freudige Erregung und Lustgefühle erzeugen. Diese Vorgänge stehen im Zusammenhang mit einem komplizierten System der Belohnungserwartung und Belohnungsregistrierung, ...*“⁸⁸⁹. Dieses System arbeitet über die Ausschüttung von Dopamin: „*Das motivierende Dopamin wird von Zellen im ventralen tegmentalen Areal produziert und dann parallel zum Nucleus accumbens, zur Amygdala, zum Hippocampus und zum dorsolateralen und orbitofrontalen Cortex geleitet.*“⁸⁹⁰ Die Aktivierung des Mittelhirns ist i.V.m. dem ventralen tegmentalen Areal (VTA) zu sehen. Das VTA liegt in der sogenannten Mittelhirnhaut, das den größten Teil des Mittelhirns ausmacht, und ist mit der Produktion von Dopamin betraut. Die Mittelhirnaktivierung ist folglich konform mit einer Beteili-

⁸⁸⁶ Kapitel 6.2 Neuronaler Hintergrund

⁸⁸⁷ vgl. Scheier, C.; Held, D.; Schneider, J.; Bayas-Linke, D. (2012), S. 93; Dijksterhuis, A.; Aarts, H. (2010), S. 468

⁸⁸⁸ Kapitel 6.5.1 fMRT-Daten

⁸⁸⁹ Roth, G.; Pauen, M. (2008), S. 94

⁸⁹⁰ ebenda, S. 94

gung des mesolimbischen Systems. Aktivierungen des Mittelhirns bzw. des ventralen tegmentalen Areals wurden auch in verschiedenen Studien in Bezug auf monetäre Belohnungen berichtet.⁸⁹¹

Die *Aktivierung des ventralen Striatum* deckt sich ebenfalls gut mit dem mesolimbischen System. Zudem zählt das ventrale Striatum bzw. der Nucleus Accumbens zu den am häufigsten verzeichneten Gehirnstrukturen bei Untersuchungen zu positiven Emotionen bzw. Belohnungen. Das ventrale Striatum ist dem Striatum zugehörig und besteht zum größten Teil aus dem Nucleus accumbens, der wiederum Teil des mesolimbischen Systems ist. Schon 1954 zeigte sich die Verbindung zwischen dem ventralen tegmentalen Areal (VTA) und dem Nucleus Accumbens als das Belohnungszentrum im Gehirn von Ratten entdeckt wurde.⁸⁹² Viele Studien unterstreichen den damaligen Befund, indem sie die Aktivierung des ventralen Striatums bzw. des Nucleus Accumbens bei Untersuchungen zu monetären, aber auch zu sozialen Belohnungen berichten.⁸⁹³

Auch die erhöhte *Aktivierung des orbitofrontalen Cortex (OFC)* kann mit dem mesolimbischen System verbunden werden. Verschiedene Studien berichten eine erhöhte Aktivierung des orbitofrontalen Cortex (OFC) im Zusammenhang mit monetären Belohnungen.⁸⁹⁴ Der orbitofrontale Cortex ist mit verschiedenen Regionen verknüpft. So empfängt er unter anderem Informationen von allen fünf Sinnen und auch vom viszeralem System.⁸⁹⁵ Daher sind auch abstrakte Belohnungen, wie Geld, in der Lage eine Aktivierung des OFC auszulösen. Aufgrund der Verbindung zum sensorischen wie auch zum viszeralem System wird dem orbitofrontalen Cortex eine wichtige Rolle im Rahmen der emotionalen Verarbeitung zugesprochen. Der OFC ist an der Einschätzung von Stimuli in Bezug auf Belohnungswert bzw. erwarteten Belohnungswert beteiligt und kann als Repräsentation eines Belohnungswertes verstanden werden.⁸⁹⁶ Einige Forscher sehen eher eine indirekte Beziehung zwischen Belohnungswerten und dem orbitofrontalen Cortex.⁸⁹⁷ Hiernach signalisiert der orbitofrontale Cortex keinen generellen Belohnungswert, sondern Wert in Bezug auf spezifische Ergebnisse. Aktivierungen im OFC scheinen belohnungswertrelevante Attribute von erwarteten Ergebnissen zu reflektieren. Der OFC signalisiert hiernach belohnungsrelevante Zustände, die eine bestimmte Situation definieren.

⁸⁹¹ vgl. Izuma, K.; Saito, D. N.; Sadato, N. (2008); Knutson, B.; Taylor, J.; Kaufman, M.; Peterson, R.; Glover, G. (2005); ; Breiter, H. C. et al. (2001); Elliott, R.; Friston, K. J.; Dolan, R. J. (2000); Thut, G.; Schultz, W.; Roelcke, U.; Nienhusmeier, M.; Missimer, J.; Maguire, R. Paul; Leenders, K. L. (1997); Schulz, W.; Dayan, P.; Montague, P. R. (1997)

⁸⁹² vgl. Olds, J.; Milner, P. (1954)

⁸⁹³ vgl. Raab, G.; Elger, C. E.; Neuner, M.; Weber, B. (2011); Izuma, K.; Saito, D. N.; Sadato, N. (2008); Zink, C. F. et al. (2008); Knutson, B. et al. (2007); Plassmann, H.; Kenning, P.; Ahlert, D. (2007); Knutson, B. et al. (2001); Breiter, H. C. et al. (2001); Elliott, R.; Friston, K. J.; Dolan, R. J. (2000); Delgado, M. R. et al. (2000)

⁸⁹⁴ vgl. Izuma, K.; Saito, D. N.; Sadato, N. (2008); O'Doherty, J. P. et al. (2001); Breiter, H. C. et al. (2001); Elliott, R.; Friston, K. J.; Dolan, R. J. (2000); Thut, G. et al. (1997)

⁸⁹⁵ vgl. O'Doherty, J. P. (2004)

⁸⁹⁶ vgl. Kringelbach, M. L. (2005); O'Doherty, J. P. (2004); O'Doherty, J. P. et al. (2001); Rolls, E. T. (2000)

⁸⁹⁷ vgl. Schoenbaum, G.; Takahashi, Y.; Liu, T.-L.; McDannald, M. A. (2011)

Generell sind mehrere Regionen im Rahmen von Kaufentscheidungen und auch allgemein i.V.m. dem Belohnungssystem beteiligt. Es kann festgehalten werden, dass die hier gefundenen Aktivierungen mit Ergebnissen aus anderen Studien übereinstimmen. Insofern kann daraus geschlossen werden kann, dass hinsichtlich des Kontrastes *Kaufen vs. Nicht kaufen* belohnungsbezogene Aktivierungen vorliegen, die mit dem gegenwärtigen theoretischen Verständnis konform sind.

Beim Kontrast *Mehrere Produkte vs. Einzelprodukt* stehen diejenigen Gehirnareale im Vordergrund, die bei Kaufangeboten mit Mehrprodukt-darstellung eine stärkere bzw. schwächere Aktivierung aufweisen, unabhängig davon, ob sie gekauft wurden oder nicht. Es geht hierbei um die Fokussierung auf die Bedingung, in der es vergleichsweise mehr Information (Preis i.V.m. mehreren Produkten) zu verarbeiten galt als bei der anderen (Preis i.V.m. nur einem Produkt), was die Entscheidungssituation unübersichtlicher bzw. schwieriger gestaltet. Man kann für diesen Kontrast davon ausgehen, dass in Gehirnregionen Aktivierungen vorliegen, die aufgrund der weniger transparenten Situation in Bezug zu einem erhöhten Arbeitsaufwand stehen. Muss ein Preis in Bezug zu zwei, drei oder vier Produkten gesetzt werden, stellt dies eine viel komplexere Aufgabe dar, als wenn nur ein Produkt vorhanden ist, das man in Bezug zu einem Preis einschätzen muss. Die Auseinandersetzung mit derartig komplexen Abwägungsprozessen findet im sog. Arbeitsgedächtnis⁸⁹⁸ statt. *Baddeley*⁸⁹⁹ beschreibt das Arbeitsgedächtnis im Sinne eines Mehr-Komponenten-Systems als ein stark kapazitätsbeschränktes System, welches eine kurzzeitige Informationsspeicherung in Form multimodaler Kodierung erlaubt. Über die zentrale Exekutive ist das Arbeitsgedächtnis in der Lage, Informationen sowohl von den eigenen Subsystemen als auch aus dem Langzeitgedächtnis zu einheitlichen episodischen Repräsentationen zu verbinden.

Im Rahmen des Kontrastes *Mehrere Produkte vs. Einzelprodukt* wurde eine erhöhte Aktivierung des dorsolateralen Präfrontalcortex (DLPFC) festgestellt. Diese Aktivierung entspricht verschiedenen Studien⁹⁰⁰ und Metaanalysen bzw. Übersichtsartikeln⁹⁰¹, die sich mit den neuronalen Repräsentationen des Arbeitsgedächtnisses auseinandergesetzt haben und eine Beteiligung des DLPFC, unter anderem auch i.V.m. steigender Arbeitskapazität bzw. komplexeren Prozessen, berichten. Die gefundene Aktivierung des DLPFC unterstreicht, dass in der Bedingung mit der Mehrprodukt-darstellung komplexere Verarbeitungsprozesse ablaufen. Neben der Aktivierung des seitlichen Präfrontalcortex konnte auch eine großflächige Aktivierung in Be-

⁸⁹⁸ vgl. *Baddeley, A. D. (2000); Baddeley, A. D.; Hitch, G. J. (1974)*

⁸⁹⁹ vgl. *Baddeley, A. D. (2000)*

⁹⁰⁰ vgl. *Rypma, B.; Berger, J. S.; D'Esposito, M. (2002); Rypma, B.; D'Esposito, M. (1999); Rypma, B.; Prabhakaran, V.; Desmond, J. E.; Glover, G. H.; Gabrieli, J. D. E. (1999); Baker, S. C.; Rogers, R. D.; Owen, A. M.; Frith, C. D.; Dolan, R. J.; Frackowiak, R. S. J.; Robbins, T. W. (1996); Rowe, J. B.; Owen, A. M.; Johnsrude, I. S.; Passingham, R. E. (2001); Schall, U.; Johnston, P.; Lagopoulos, J.; Jüptner, M.; Jentzen, W.; Thienel, R.; Dittmann-Balcar, A.; Bender, S.; Ward, P. B. (2003); Dagher, A.; Owen, A. M.; Boecker, H.; Brooks, D. J. (1999); Van den Heuvel, O. A.; Groenewegen, H. J.; Barkhof, F.; Lazeron, R. H. C.; van Dyck, R.; Veltman, D. J. (2003)*

⁹⁰¹ vgl. *Owen, A. M. et al. (2005); Owen, A. M. (2000); Cabeza, R.; Nyberg, L. (2000); Curtis, C. E.; D'Esposito, M. (2003)*

zug auf den visuellen Cortex berichtet werden. Auch dieses Ergebnis tritt nicht überraschend auf, da die visuelle Herausforderung im Fall mehrere Produkte, im Vergleich zur Situation in der nur ein Produkt abgebildet ist, größer ist. Wie beim ersten Kontrast spiegeln auch die Ergebnisse des zweiten Kontrastes das gegenwärtig anerkannte theoretische Wissen wider.

Im Zusammenhang mit dem Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* bezieht sich der Kontrastinhalt darauf, dass Aktivierungen untersucht werden, die in einem stärkeren bzw. schwächeren Maß ausgeprägt sind, wenn ein Sonderangebotssignal Teil eines Kaufangebotes ist, verglichen mit der Konstellation, in der ein Kaufangebot ohne Sonderangebotssignal präsentiert wird. Aktivierungen bzw. Deaktivierungen sind in diesem Sinne dem Vorhandensein eines SA-Signals zuzuschreiben. I.d.R. könnte man zunächst annehmen, dass Sonderangebotssignale positive Emotionen auslösen, da sie generell eine Kostenersparnis signalisieren, die positive Wirkungen mit sich bringt. Tatsächlich sind in dieser Untersuchung nicht alle Kaufangebote, die mit einem Sonderangebotssignal gekennzeichnet sind, auch wirklich Sonderangebote. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden nur 25% der Stimuli mit einem Sonderangebotssignal versehen⁹⁰² und diese dann hinsichtlich der Preisstufen (günstig/ normal/ teuer) und der Produktmenge (einzeln/ mehrere) *gleichmäßig verteilt*. Zudem bestand die Möglichkeit, dass die Probanden aufgrund der vielen Kaufentscheidungen, die es im Rahmen der Untersuchung zu treffen galt, teilweise auch skeptisch reagierten, indem sie hinter einem Sonderangebot eine *Täuschung* vermuteten. Auch die Verhaltensdaten⁹⁰³, auf die im nachfolgenden Kapitel noch genauer eingegangen wird, brachten keine eindeutige Tendenz in Richtung einer generell positiven bzw. negativen Wirkung eines Sonderangebotssignals zum Ausdruck.

Der beschriebene Sachverhalt steht im Gegensatz zu den bereits besprochenen Kontrasten, bei denen ein *relativ eindeutiger Kontrastinhalt* vorliegt, was jeweils dazu führt, dass auch die neuronale Interpretation in Bezug auf die beteiligten Gehirnregionen intuitiver bzw. einfacher möglich ist. Beim Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* ist dies nicht der Fall. Aus den angeführten Gründen bietet sich dieser Kontrast an, die besonderen Herausforderungen im Zusammenhang mit der Interpretation neuronaler Aktivierungen im Falle eines kontraintuitiven bzw. komplexeren Sachverhaltes zu verdeutlichen und einen Lösungsansatz aufzuzeigen.

An dieser Stelle bleibt zunächst für die beiden aufgestellten Hypothesen⁹⁰⁴ bezüglich des Kontrastes *SA-Signal vs. kein SA-Signal* festzuhalten, dass im Rahmen dieser Untersuchung für keine der vermuteten Gehirnbereiche signifikante Aktivierungen (VS) bzw. Deaktivierungen (ACC bzw. DLPFC) herausgestellt werden konnten und somit beide Hypothesen verworfen werden müssen. I.V.m. den Stimuli, die Sonderangebotssignale beinhalteten, konnte eine signifikant stärkere Aktivierung der *anterioren Inselrinde* festgestellt werden als bei den Stimuli ohne Sonderangebots-signal.

⁹⁰² vgl. Kapitel 6.3.1 Der Versuchsaufbau

⁹⁰³ vgl. Kapitel 6.5.2 Verhaltensdaten

⁹⁰⁴ vgl. Kapitel 6.2 Neuronaler Hintergrund

Doch was genau bedeutet dieses Ergebnis? Eine Interpretation der Inselrinden-Aktivierung in Bezug auf die vorliegende Studie ist aufgrund der angeführten inhaltlichen Argumente ohne den Bezug zu einem entsprechenden Hintergrundwissen über diese Gehirnregion nicht sinnvoll möglich. Es ist daher zunächst erforderlich, einen neuronalen Bezugsrahmen bzw. eine Referenz auszuarbeiten. Die Herausforderungen i.V.m. der neuronalen und handlungstheoretischen Interpretation, wie auch ein angemessener Umgang mit ihnen, stehen aus diesem Grund im Fokus von Kapitel 7.

7 Interpretationslogik

Bei der Datenauswertung im Allgemeinen wie auch bei der Auswertung von fMRT-Daten im Speziellen *gilt generell*, dass Daten nie für sich selber sprechen. Vielmehr werden zunächst Ergebnisse festgehalten, die es anschließend zu erklären gilt. Hierin liegt gerade die Herausforderung, und im Falle des Gelingens auch Kompetenz, des Wissenschaftsbetriebs. Ziel ist es, das Verständnis in Bezug auf unterschiedliche Sachverhalte, sprich das Wissen, zu verbessern. Diese Verbesserung kann im Sinne der wissenschaftstheoretischen Position des Kritischen Rationalismus als eine immer weiter fortschreitende Annäherung an die Wahrheit bzw. Realität verstanden werden⁹⁰⁵.

Hauptsächlich im Zuge von Kapitel 5⁹⁰⁶, teilweise aber auch in Kapitel 4⁹⁰⁷ (genereller Messvorgang und räumliche Auflösung der Daten), wurden bereits ausführlich die unterschiedlichsten Aspekte einer fMRT-Untersuchung aufgegriffen. Zunächst wurden die neurovaskuläre Kopplung und das BOLD-Signal aufgearbeitet. Dann wurden die generelle Erhebungssystematik und die konkrete Datenakquisition thematisiert. Zudem erfolgte eine Auseinandersetzung mit den generierten Daten und der Vorverarbeitung dieser Daten; dies begünstigt ein besseres Verständnis für die räumliche und zeitliche Dimension in den fMRT-Daten. Den inhaltlichen Abschluss stellte die Datenanalyse mit der Ergebnispräsentation dar. Es wurden folglich alle relevanten Teilprozesse bzw. Sachverhalte abgebildet, die in Summe den Gesamtprozess von der Erstellung des Stimulusmaterials bis hin zur Entscheidung, dass Region X eine signifikante Aktivierung bzw. Deaktivierung aufweist und nicht eine benachbarte Region, ausmachen. Am Ende von Kapitel 6⁹⁰⁸ wurde ein erster Versuch unternommen, die auf die beschriebene Weise erzeugten Ergebnisse zu interpretieren.

In diesem Kapitel geht es darum, die Herausforderungen i.V.m. der neuronalen und der handlungstheoretischen Interpretation von fMRT-Daten darzustellen und einen pragmatischen Umgang damit aufzuzeigen. Generell zielt dieses Kapitel darauf ab, mit Hilfe der fMRT-Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung herauszuarbeiten, wie die fMRT-Daten zu interpretieren sind bzw. wie die Aussagekraft von fMRT-Daten allgemein zu bewerten ist. In einem ersten Schritt wird hierzu eine *neuronale Interpretation* für den Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* vorgenommen. Hierbei handelt es sich um eine Art Mikro-Ebene der Interpretation. Das Ziel auf dieser Ebene besteht in der Klärung der Frage, was die Aktivierung bzw. Deaktivierung einer bestimmten Gehirnregion i.V.m. einem konkreten Kontrast inhaltlich aussagt bzw. bedeutet. In einem zweiten Schritt wird anschließend die *handlungstheoretische Interpretation*, im Sinne einer Makro-Ebene der Interpretation, thematisiert. Sie baut auf der neuronalen Interpretation auf, indem hier der Versuch erfolgt, fMRT-Ergebnisse mit konkreten Handlungen (z.B. Kauf) bzw. Entscheidungen (z.B. Kaufentscheidungen) zu verknüpfen. Es geht um die Frage, inwieweit von erfassten Gehirnaktivierun-

⁹⁰⁵ vgl. Kappelhoff, P. (2000), S. 13

⁹⁰⁶ Kapitel 5 Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

⁹⁰⁷ Kapitel 4 Die strukturelle Magnetresonanztomographie (MRT)

⁹⁰⁸ Kapitel 6 Eine fMRT-Studie zur Wirkung von Sonderangebotssignalen bei Kaufentscheidungen

gen auf weiteres Handeln bzw. Verhalten geschlossen werden kann. Erörtert werden soll, was die erhobenen fMRT-Daten letztendlich aussagen und wo die Grenze in Bezug auf die Interpretation zu sehen ist.

7.1 Neuronale Interpretation

Um die Herausforderungen i.V.m. der neuronalen Interpretation darzustellen, wird insofern an den Schlusspunkt des letzten Kapitels angeknüpft, als dass anhand des vorliegenden Beispiels, genauer gesagt anhand des Kontrastes *SA-Signal vs. kein SA-Signal*, eine neuronale Interpretation für die gefundene neuronale Aktivierung durchgeführt wird.

7.1.1 Generelle Überlegungen zur neuronalen Interpretation

Bevor es um die konkreten Einzelheiten in Bezug auf den angesprochenen Kontrast geht, ist es für eine angemessene Einordnung des nachfolgenden Beispiels wichtig, einige Abhängigkeiten hinsichtlich der neuronalen Interpretation zu klären.

Im Rahmen der neuronalen Interpretation beeinflussen grundlegend zwei Sachverhalte den jeweils vorliegenden Schwierigkeitsgrad. Diese zwei Einflussgrößen betreffen die Eindeutigkeit des Kontrastinhaltes und die Multifunktionalität einer aktivierten bzw. deaktivierten Gehirnregion. Abbildung 99 zeigt die vier generellen Szenarien, mit denen man im Rahmen der neuronalen Interpretation konfrontiert werden könnte.⁹⁰⁹

		Multifunktionalität	
		spezifisch	unspezifisch
Kontrastinhalt	gerichtet	1	2
	ungerichtet	3	4

Abbildung 99: Verschiedene Szenarien i.V.m. der neuronalen Interpretation

Wie bereits die ersten beiden besprochenen Kontraste *Kaufen vs. Nicht kaufen* und *mehrere Produkte vs. Einzelprodukt* beispielhaft zeigen, ist es durchaus häufig der Fall, dass eindeutige Kontrastinhalte vorliegen. Kaufen kann, auch durch die Herleitung im Rahmen von Kapitel 6.6⁹¹⁰, relativ plausibel mit einer positiven Wirkung verbunden werden. Zudem steht die Situation, in der mehrere Produkte abgebildet sind, nachvollziehbarer Weise stellvertretend für einen höheren Verarbeitungsaufwand (visuell wie auch in Bezug zum Arbeitsgedächtnis). Aus diesem Grund können die jeweils gefundenen Aktivierungen verhältnismäßig einfach interpretiert werden. An-

⁹⁰⁹ Um diesen Sachverhalt nicht unnötig zu verkomplizieren, wird in der Darstellung ausgeklammert, dass generell auch mehrere Gehirnregionen i.V.m. einem Kontrast Aktivierungen bzw. Deaktivierungen zeigen können. Ist der Grundgedanke ersichtlich, sollte es keine Schwierigkeit darstellen, diesen auf besagte Möglichkeit auszuweiten.

⁹¹⁰ Kapitel 6.6 Interpretation

ders ausgedrückt, könnte man die beiden Kontrastinhalte, zwar aus unterschiedlichen Gründen aber generell gesehen, auch als *gerichtet* kategorisieren.

Eine andere Situation liegt vor, wenn Kontrastinhalte mehrdeutige bzw. komplexere Sachverhalte beschreiben. Um derartige Kontrastinhalte zu erfassen, gilt es umso mehr eine *genaue inhaltliche Benennung des betreffenden Kontrastes* vorzunehmen.⁹¹¹ Die verbale Fixierung eines Kontrastinhaltes ist prinzipiell immer möglich. Wird die konkrete Umsetzung einer Studie dabei jedoch nicht explizit berücksichtigt, sondern bei der Benennung zentral auf die Ausführungen im theoretischen Teil geachtet, kann und sollte dies auch schwerwiegende Folgen für die neuronale Interpretation mit sich bringen. Aus Gründen der Inhaltsvalidität⁹¹² muss diese verbale Fixierung folglich immer vor dem Hintergrund des konkreten experimentellen Designs, der konkreten Umsetzung der theoretischen Überlegungen, erfolgen.

Beim Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* macht es für die neuronale Interpretation z.B. einen Unterschied, ob das SA-Signal stets mit einem günstigen Preis eingeblendet wurde oder ob ausgezeichnete Sonderangebote auch teure Preise beinhalteten. Wären im Zuge von Sonderangeboten nur günstige Preise eingesetzt worden, so wäre eine positive Wirkung der SA-Signale gut vorstellbar und der Kontrastinhalt in diesem Sinne eindeutiger bzw. gerichtet. Da die Preise in der vorliegenden Untersuchung auch im Rahmen der Sonderangebote variiert wurden und somit die Kombination eines SA-Signals mit einem teuren Preis möglich war, kann nicht per se auf eine positive Wirkung geschlossen werden. Aus dieser Perspektive, die das konkrete experimentelle Design mit einschließt, stellt der betrachtete Kontrastinhalt eine nicht eindeutige Situation dar. Dies unterstützen auch die Argumente aus Kapitel 6.6⁹¹³. SA-Signale können theoretisch sowohl positive wie auch negative Emotionen mit sich bringen. Das Einzige was zunächst in Bezug auf den Kontrastinhalt gesagt werden kann ist, dass der Unterschied der zu vergleichenden Bedingungen darin besteht, dass in einer Bedingung ein SA-Signal präsent ist und in der anderen Bedingung Kaufangebote ohne SA-Signal angeboten wurden. Der Kontrastinhalt bezieht sich folglich auf die Aktivierungen bzw. Deaktivierungen, die mit der Einblendung eines SA-Signals einhergehen. Im Bezug zu Abbildung 99 kann hierbei passender von einem *ungerichteten* Kontrastinhalt gesprochen werden.

Zum Aspekt der *Multifunktionalität* ist generell anzumerken, dass die Beteiligung einer Gehirnregion an unterschiedlichen Aufgaben, Prozessen oder Funktionen nicht die Ausnahme sondern die Regel darstellt. Selten ist eine Gehirnregion dermaßen spezialisiert, dass sie nur mit einer konkreten Aufgabe betraut ist.⁹¹⁴ Es existieren

⁹¹¹ Dies ist generell ein wichtiger Punkt, also auch im Falle eindeutiger bzw. gerichteter Kontrastinhalte. Er fällt aber noch stärker ins Gewicht, wenn es darum geht, mehrdeutige Kontrastinhalte überhaupt zu erkennen.

⁹¹² vgl. Kappelhoff, P. (2000), S. 113 f.; Die genannte Quelle bezieht sich zwar auf Indikatoren, die ein Konstrukt abbilden sollen, der zugrundeliegende Gedankengang kann aber auf die vorliegende Situation, also die verbale Bezeichnung eines Kontrastinhaltes in Bezug auf einen untersuchten Kontrast, übertragen werden.

⁹¹³ Kapitel 6.6 Interpretation

⁹¹⁴ Nur mit einer Funktion betraut sind in diesem Sinne die unmittelbaren sensorischen Eingangsgebiete.

viele spezialisierte Gehirnbereiche, wie z.B. die Sprachareale, aber auch hier erfüllen einzelne Bereiche selten nur eine konkrete Funktion. Vielmehr bedienen sie unterschiedliche Grundprozesse, in diesem Rahmen allerdings mehrere ähnliche bzw. zueinander in Bezug stehende Teilprozesse. Das *Broca-Areal* ist im Kern mit der Sprachmotorik verbunden, das *Wernicke-Areal* ist für die Sprachverarbeitung zuständig. In diesen spezialisierten Bereichen übernehmen beide aber nicht nur eine spezifische Funktion, sondern mehrere ähnliche Funktionen. Die *Multifunktionalität* einzelner Gehirnregionen kann aber auch sehr unterschiedliche Funktionen betreffen. Bspw. konnten für den anterioren cingulären Cortex (ACC) Aktivierungen i.V.m. der Verarbeitung konfliktärer Wahrnehmungen⁹¹⁵, Selbstwahrnehmung⁹¹⁶, Schmerzwahrnehmung⁹¹⁷, Schmerzempathie⁹¹⁸ und auch Planungsprozessen⁹¹⁹ berichtet werden. Das Gehirn stellt gerade aufgrund seiner unzähligen Verknüpfungen zwischen den verschiedenen Gehirnregionen eine sehr komplexe Struktur dar und kann vor allem aufgrund dieser Gegebenheit die unterschiedlichsten einfachen und komplexen Herausforderungen des Alltags meistern. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass ein spezielles Areal nur mit einer konkreten Funktion verbunden ist, Multifunktionalität ist der Standard.⁹²⁰ Aus diesem Grund beinhaltet das Kategorisierungsschema in Abbildung 99 eine Unterteilung in *spezifische* und *unspezifische* Multifunktionalität. In diesem Sinne sind das Broca-Areal und das Wernicke-Areal Beispiele für spezifische Multifunktionalität, der anteriore cinguläre Cortex (ACC) steht stellvertretend für unspezifische Multifunktionalität.

Wie in Kapitel 6.5.1⁹²¹ dargestellt, konnte für den im Fokus stehenden Kontrast eine signifikant höhere Aktivierung der *anterioren Insula* festgestellt werden. Die gefundene Aktivierung kann an dieser Stelle zunächst als ein Fall unspezifischer Multifunktionalität angesehen werden. Eine Aktivierung der anterioren Insula wurde bisher, wie im Nachfolgenden noch darzulegen ist, im Zusammenhang mit sehr unterschiedlichen Funktionen berichtet. Da im konkreten Fall neben der *unspezifischen Multifunktionalität* zudem ein *ungerichteter Kontrastinhalt* vorliegt, bietet sich der Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* in besonderer Weise als Anschauungsbeispiel für eine neuronale Interpretation an. In Bezug zu Abbildung 99 liegt Fall 4 vor. Die neuronalen Interpretationen der beiden erstgenannten Kontraste stellen hingegen einen geringen Schwierigkeitsgrad dar, da sie in beschriebener Weise *gerichtet* sind. In Bezug auf Abbildung 99 kann diese Situation entweder als Fall 1 oder Fall 2 kategorisiert werden.

Nachdem der Ausgangspunkt für die neuronale Interpretation des Kontrastes *SA-Signal vs. kein SA-Signal* geklärt ist, gilt es noch die zentrale Bedeutung eines ausführlich recherchierten *neuronalen Bezugsrahmens* herauszustellen. In aller Regel

⁹¹⁵ vgl. Brown, J. W.; Braver, T. S. (2007)

⁹¹⁶ vgl. Fossati, P.; Hevenor, S. J.; Graham, S. J.; Grady, C.; Keightley, M. L.; Craik, F.; Mayberg, H. (2003)

⁹¹⁷ vgl. Freund, W.; Stuber, G.; Wunderlich, A. P.; Schmitz, B. (2007)

⁹¹⁸ vgl. Gu, X.; Han, S. (2007)

⁹¹⁹ vgl. Schweimer, J. (2006)

⁹²⁰ vgl. Rösler, F. (2011), S. 50

⁹²¹ Kapitel 6.5.1 fMRT-Daten

erfolgt die Darstellung des neuronalen Hintergrundes zu Beginn der Abbildung einer fMRT-Studie. Im hier vorliegenden Fall geschah dies auch und führte im Ergebnis zur Ableitung zweier Hypothesen.⁹²² Allerdings ergab sich mit der Aktivierung der anterioren Insula ein *unerwartetes Ergebnis*, für das aus diesem Grund noch kein Hintergrundwissen aufgearbeitet wurde.

Um einen ersten Eindruck hinsichtlich der Bedeutung des Hintergrundwissens zu vermitteln, wird an dieser Stelle kurz die Studie von *Knutson et al.*⁹²³ angesprochen, die im weiteren Verlauf noch genauer aufgegriffen wird. Diese Studie stellt im Ergebnis eine Verbindung zwischen einer Insula-Aktivierung und der Verarbeitung von exzessiven Preisen heraus. In Konsequenz dieses Studienergebnisses wurde die anteriore Insula stark mit *Preisschmerz* verknüpft. Mit dieser Information im Hinterkopf könnte man darauf kommen, dass die Aktivierung der anterioren Insula in der vorliegenden Untersuchung für eine negative Wirkung von SA-Signalen spricht. Ein neuronaler Rahmen, der diese intuitive Interpretation unterstützt, sollte auf Studien basieren, die eine anteriore Insula-Aktivierung lediglich im Kontext negativer Sachverhalte verzeichnen. In diesem Fall wäre die neuronale Interpretation, trotz der Tatsache eines ungerichteten Kontrastinhaltes, relativ einfach. Die nachfolgenden Ausführungen werden zeigen, dass sich das neuronale Hintergrundwissen zur anterioren Insula zunächst komplexer, im Sinne einer unspezifischen Multifunktionalität, gestaltet und daher die beschriebene Interpretationsvariante für den Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* nicht zu empfehlen ist.

Die nachfolgende Zusammentragung verschiedener Studien, die auf unterschiedliche Weise einen Bezug zur Inselrinde aufweisen, erfüllt zwei Funktionen. Zum einen geht es darum zu zeigen, wie kontrovers die Funktion bzw. die Bedeutung der Inselrinde diskutiert wird. Zum anderen dient diese, nicht erschöpfende, Materialsammlung auch dazu, einen Ansatz für eine studienübergreifende Perspektive zu liefern. Diese Sichtweise soll letztendlich im Sinne einer überarbeiteten Referenz zu einer angemessenen Interpretation der gefundenen Inselrinden-Aktivierung im Rahmen dieser Studie, aber auch in Bezug auf vorangegangene und nachfolgende Untersuchungen, beitragen.

7.1.2 Neuronale Interpretation für den Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal

Die ausführliche Auseinandersetzung mit der neuronalen Interpretation für den Kontrast *SA-Signal vs. kein SA-Signal* wird zum einen durch den hohen Schwierigkeitsgrad i.V.m. der vorliegenden Situation, zum anderen durch die beschriebene Notwendigkeit eines gewissenhaft recherchierten neuronalen Bezugsrahmens für eine seriöse Interpretation und des Weiteren durch den generellen Fokus dieser Untersuchung auf die Wirkung von Sonderangebotssignalen gerechtfertigt.

Die Erstellung des Hintergrundwissens und eine letztendliche Interpretation der Insula-Aktivierung erfolgt in mehreren Schritten. Zunächst werden unterschiedliche

⁹²² vgl. Kapitel 6.2 Neuronaler Hintergrund

⁹²³ vgl. Knutson, B. et al. (2007)

Studien mit ihren Insula-bezogenen Ergebnissen vorgestellt. Dies stellt die *unterste Abstraktionsebene* dar. Wie noch zu zeigen ist, existiert auf dieser Ebene eine hohe Heterogenität im Zusammenhang mit Insula-Aktivierungen, da sich die einzelnen Untersuchungen teilweise stark in Bezug auf ihre Forschungsfragen unterscheiden. Auf der *2. Abstraktionsebene* erfolgt eine Loslösung der Studienergebnisse von den konkreten inhaltlichen Untersuchungszielen, um die Heterogenität zwischen einzelnen Studien besser ordnen zu können. Hierbei steht die Frage im Vordergrund, mit welchen allgemeinen Sachverhalten die jeweilige Aktivierung der Insula verbunden ist. Theoretisch könnte bereits auf dieser Ebene eine einheitliche Perspektive vorliegen. Abgeschlossen wird die Erstellung des Hintergrundwissens jedoch im vorliegenden Fall durch die *3. Abstraktionsebene*. Diese bildet die Interpretationsgrundlage und versucht auf einer höheren Abstraktionsebene eine Verbindung zwischen den, eine Insula-Aktivierung erzeugenden, Sachverhalten herzustellen. Ziel ist es hierbei, Gemeinsamkeiten zwischen den Studien herauszufiltern und der Ursache für eine Insula-Aktivierung auf den Grund zu gehen, um letztlich die Aktivierung in der vorliegenden Untersuchung angemessen zu interpretieren. Im Anhang⁹²⁴ befindet sich zusätzlich eine tabellarische Übersicht, die jede Studie in Bezug auf die *drei Abstraktionsebenen* abbildet. Hierbei wurden die zentralen Aspekte der einzelnen Studien auf den ersten beiden Ebenen stark verdichtet, im Hinblick auf die 3. Abstraktionsebene allerdings ausführlich ausgearbeitet. Die ergänzende Betrachtung der tabellarischen Übersicht soll dazu beitragen, das Verständnis für die Erarbeitung des Hintergrundwissens in Bezug auf die Bedeutung der Aktivierung der anterioren Insula zu verbessern. Die nachfolgenden 21 Studien bilden die Grundlage für den neuronalen Bezugsrahmen der anterioren Insula-Aktivierung.

*Cacioppo et al.*⁹²⁵ führten eine Meta-Studie zur Erforschung der neuronalen Grundlage von sexuellem Verlangen und Liebe durch. Im Rahmen dieser Meta-Studie fanden 20 Studien Berücksichtigung. Stimuli für die Bedingung Liebe waren jeweils Bilder und Videos mit einem Bezug zu geliebten Menschen (partnerbezogene Stimuli), Stimuli für die Bedingung sexuelles Verlangen stellten Bilder und Videos dar, die sexuelle Aktivitäten in unterschiedlichen Intensitätsgraden zeigten (begehrenswerte Stimuli). Beim Gefühl der Liebe war der anteriore Teil der Insula signifikant stärker aktiviert, bei Gefühlen im Zusammenhang mit sexuellem Verlangen zeigte hingegen der posteriore Teil der Insula eine stärkere Aktivierung. Im Ergebnis wurde ein signifikantes posteriore-anteriore Insula-Muster berichtet, welches stufenweise sexuelles Verlangen und Liebe anzuzeigen scheint. Liebe erwächst aus und ist eine Repräsentation von angenehmen somatosensorischen Erfahrungen, die Verlangen charakterisieren.

*Tusche, Bode & Haynes*⁹²⁶ beschäftigten sich mit der Frage, ob die Beurteilung eines Objektes und damit in Verbindung stehende Entscheidungsprozesse auf die bewusste Verarbeitung objektbezogener Reize angewiesen sind. Um diesen Sachverhalt zu

⁹²⁴ vgl. Anhang 16: Darstellung des Hintergrundwissens auf drei Abstraktionsebenen

⁹²⁵ vgl. Cacioppo, S.; Bianchi-Demicheli, F.; Frum, C.; Pfaus, J. G.; Lewis, J. (2012)

⁹²⁶ vgl. Tusche, A.; Bode, S.; Haynes, J.-D. (2010)

untersuchen, standen zwei Bedingungen im Fokus. Zum einen lag eine *High-Attention-Bedingung* vor, in der es um die genaue Betrachtung von Produkten, hier Autos, und deren Attraktivitätsbewertung ging. Zum anderen wurde eine *Low-Attention-Bedingung* erstellt, in der zwar ebenfalls dieselben Produkte abgebildet wurden, es jedoch vordergründig eine visuelle Fixierungsaufgabe im Zentrum des Bildes und der Aufmerksamkeit zu bearbeiten galt. Für alle Probanden wurde bestätigt, dass die meisten dargestellten Produkte vor dem Experiment gut bekannt waren. Im Ergebnis zeigte sich, dass in beiden Bedingungen Aktivierungen in der Insula und einer weiteren Region⁹²⁷ in der Lage waren, nachfolgende Entscheidungen im Sinne der *Willingness to buy*, die in dieser Studie nach der fMRT-Untersuchung erhoben wurde, vorherzusagen.

*Bartels & Zeki*⁹²⁸ stellten die neuronalen Korrelate von Mutterliebe und romantischer Liebe gegenüber. *Mutterliebe* stellte eine neue Bedingung dar, wohingegen die Bedingung bzw. die Ergebnisse im Zusammenhang mit *romantischer Liebe* aus einer Vorgängerstudie⁹²⁹ beider Autoren stammten. Der Kontrast für Mutterliebe wurde durch Bilder der eigenen Kinder versus Bilder von bekannten gleichaltrigen Kindern dargestellt. Für den Kontrast bezüglich romantischer Liebe wurden für Personen, die „*truly, deeply and madly in love*“⁹³⁰ waren, Bilder von ihren geliebten Partnern Bildern von Freunden gegenübergestellt. Bartels und Zeki sehen die generelle Wirkung von Liebe in Form eines Push-Pull-Mechanismus.⁹³¹ Innerhalb dieses Verständnisses besitzt Liebe zwei Seiten um soziale Distanzen zu überwinden. Auf der einen Seite werden negative Sachverhalte ausgeblendet, indem neuronale Netzwerke deaktiviert werden, die mit kritischen sozialen Bewertungen und negativen Emotionen verbunden sind. Auf der anderen Seite werden Beziehungen zwischen Individuen durch die Aktivierung des Belohnungssystems gestärkt. Hinsichtlich *Mutterliebe* zeigen sich viele Aktivierungen, auch im Bereich der medialen Insula. Die meisten Aktivierungen stimmen mit denjenigen überein, die im Zuge der Untersuchung von *romantischer Liebe*⁹³² festgehalten wurden. Neben den vielen Aktivierungen verbunden mit Mutterliebe konnten auch einige Deaktivierungen aufgedeckt werden. Dies ist insofern interessant, da Emotionen generell ein Produkt von beidem sind, erhöhter Aktivität bezogen auf positive Emotionen und „... *suppressed activity in regions associated with negative emotions, ...*“⁹³³. Es ließen sich keine Deaktivierungen bezogen auf die anteriore Inselrinde ausmachen.

*Paulus & Frank*⁹³⁴ setzten sich mit der Frage auseinander, ob neuronale Substrate, die mit somatischen Markern⁹³⁵ assoziiert werden, auch in Präferenzbeurteilungen

⁹²⁷ medialer präfrontaler Cortex (MPFC)

⁹²⁸ vgl. Bartels, A.; Zeki, S. (2004)

⁹²⁹ vgl. Bartels, A.; Zeki, S. (2000)

⁹³⁰ ebenda, S. 3829

⁹³¹ vgl. Bartels, A.; Zeki, S. (2004), S. 1155

⁹³² vgl. Bartels, A.; Zeki, S. (2000), S. 3831

⁹³³ Bartels, A.; Zeki, S. (2004), S. 1162

⁹³⁴ vgl. Paulus, M. P.; Frank, L. R. (2003)

⁹³⁵ vgl. Damasio A. R.; Tranel, D.; Damasio H. (1991)

involviert sind. Die neuronalen Aktivierungen in Bezug auf Präferenzbeurteilungen wurden mit Hilfe von zwei Bedingungen untersucht. In der einen Bedingung ging es um eine Präferenzentscheidung zwischen zwei Produkten (preference task), in der anderen Bedingung sollte eine visuelle Unterscheidungsaufgabe vorgenommen werden (visual discrimination task). Beim Kontrast dieser beiden Bedingungen wurde unter anderem eine anteriore Inselrinden-Aktivierung gefunden, die bei der Präferenzentscheidung eine stärkere Aktivierung aufwies als bei der visuellen Unterscheidungsaufgabe. Die Autoren merken in ihrer Diskussion an, dass die Befunde dafür sprechen, dass die Insula nicht nur in die Verarbeitung von negativen Emotionen involviert ist. Zudem äußern sie die Vermutung, dass in emotionale Verarbeitungsprozesse involvierte Gehirnregionen möglicherweise sowohl in die Verarbeitung von positiven als auch von negativen Emotionen verwickelt sein können.⁹³⁶

*Rolls, McCabe & Redoute*⁹³⁷ untersuchten wahrscheinlichkeitsbezogene Entscheidungsaufgaben. Es ging ferner um die Beziehung zwischen Erwartungswert, Vorhersagefehler und der Belohnungshöhe auf neuronaler Ebene. In dieser Untersuchung wurden die Probanden mit unterschiedlich belohnenden Auswahlmöglichkeiten konfrontiert. Sie mussten jedes Mal zwischen zwei Alternativen wählen, die sich in ihren Erwartungswerten unterschieden. Jede Alternative war mit einer Belohnungshöhe und einer Eintrittswahrscheinlichkeit versehen. Ziel der Aufgabe war es, soviel Gewinn wie möglich zu generieren. Es wurde festgestellt, dass die Aktivierung der anterioren Insula negativ mit Erwartungswert korrelierte. Eine Aktivierung der anterioren Insula zeigte sich, wenn geringe Belohnungswerte erwartet wurden und ebenfalls wenn eine Belohnung mit Unsicherheit verbunden war.

*Knutson et al.*⁹³⁸ beschäftigten sich in ihrer Studie mit den neuronalen Prädiktoren von Kaufverhalten. Sie charakterisieren Kaufentscheidungen als Trade-off-Entscheidungen⁹³⁹, bei denen es um die Abwägung zwischen dem potenziellen Vergnügen durch einen Kauf und den Schmerz bzw. den Verlust in Form der Bezahlung des Kaufpreises geht. In Sinne dieses Verständnisses gingen sie davon aus, dass unterschiedliche neuronale Systeme für die Antizipation von Gewinn und Verlust verantwortlich sind und maßgeblich nachfolgende Entscheidungen beeinflussen. I.V.m. der Inselrinde fanden sie eine erhöhte Aktivierung im Vorfeld der Kaufentscheidung für den Fall, dass ein Kaufangebot mit einem *exzessiven Preis* versehen wurde. Dieses Ergebnis wurde im Nachfolgenden oft zitiert und führte neben den Studien zur Verarbeitung negativer Stimuli dazu, dass die Inselrinde stark mit dem Begriff des *Preisschmerzes* verankert wurde. In Bezug auf die Vorhersage der Kaufentscheidung ist zu vermerken, dass eine negative Korrelation zwischen einer Inselrinden-Aktivierung und einer Kaufhandlung während der Entscheidungsphase bestand.

⁹³⁶ vgl. Paulus, M. P.; Frank, L. R. (2003), S. 1315

⁹³⁷ vgl. Rolls, E. T.; McCabe, C.; Redoute, J. (2008)

⁹³⁸ vgl. Knutson, B. et al. (2007)

⁹³⁹ vgl. ebenda, S. 147

*Olsson, Nearing & Phelps*⁹⁴⁰ widmeten sich dem neuronalen System der sozialen Angstübertragung. Sie untersuchten, welche Gehirnregionen beim Lernen von Angst durch das Beobachten anderer aktiviert wird. Diese Form des Angstlernens entspricht eher dem Prozess durch den Menschen in der Realität Ängste entwickeln. Dies steht im Gegensatz zur klassischen Angstkonditionierung, bei der über eigene Erfahrungen mit aversiven Reizen gelernt wird. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden unter anderem auch Aktivierungen der anterioren Insula entdeckt. Allerdings waren diese Aktivierungen in der Observationsbedingung (Betrachten einer anderen Person) schwächer als in Testbedingung, in der ein Proband selber dem aversiven Stimulus (einem Elektroschock) ausgesetzt wurde. Die Autoren räumen ein, dass die Aktivierung der anterioren Insula und einer weiteren Gehirnregion⁹⁴¹ während der Observationsbedingung auch i.V.m. Empathie zu sehen sein könnte. Das Lernen von Situationen, die andere Personen stressen, könnte beinhalten, dass man die emotionale Perspektive der beobachteten Person einnimmt, dies wiederum löst eine empathische Reaktion beim Betrachter aus.

*Kuhnen & Knutson*⁹⁴² setzten sich mit der neuronalen Basis finanzieller Risikobereitschaft auseinander. Im Rahmen dieser Untersuchung nahmen die Probanden an einer dynamischen Investment-Aufgabe teil. Eine erhöhte Aktivierung der anterioren Insula ging einer Strategieveränderung in Richtung einer risikoaversen Entscheidung voraus. Wurde in der vorhergehenden Entscheidung eine risikoreiche Wahl getroffen, so erhöhte eine anteriore Insula-Aktivierung die Wahrscheinlichkeit einen risikoaversen Fehler zu machen, also ein schlechteres Ergebnis zu erzielen, wenn man sich für die risikoaverse Option entscheidet. Mit der Perspektive, dass auch die vorangegangenen Entscheidungen Einfluss auf die Antizipation von Verlust haben, kann vermutet werden, dass die Insula-Aktivierung auch in die Antizipation von Verlusten involviert ist.

*Sanfey et al.*⁹⁴³ untersuchten Entscheidungen im Rahmen des *Ultimatum Game* hinsichtlich der damit in Verbindung stehenden neuronalen Aktivität. Es ging bei der Aufgabe um die Aufteilung von 10\$, wobei eine Person ein Angebot bezüglich der Aufteilung des Geldes macht und die andere Person entscheidet, ob sie es annimmt oder es ablehnt. Lehnt sie es ab, so bekommt keiner von beiden eine Belohnung in Form eines Geldbetrages. Wurden unfaire Angebote mit fairen Angeboten kontrastiert, stellte sich unter anderem auch eine erhöhte Aktivierung der anterioren Insula heraus. Des Weiteren zeigte die anteriore Inselrindenaktivierung eine Sensitivität bezogen auf den Grad der Unfairness, indem es eine signifikant höhere Aktivierung bei einem Angebot von 9\$:1\$ im Vergleich zu einem Aufteilungsverhältnis von 8\$:2\$ gab.

⁹⁴⁰ vgl. Olsson, A.; Nearing, K. I.; Phelps, E. A. (2007)

⁹⁴¹ anteriorer cingulärer Cortex (ACC)

⁹⁴² vgl. Kuhnen, C. M.; Knutson, B. (2005)

⁹⁴³ vgl. Sanfey, A. G.; Rilling, J. K.; Aronson, J. A.; Nystrom, L. E.; Cohen, J. D. (2003)

*Ploghaus et al.*⁹⁴⁴ beschäftigten sich mit dem Thema Schmerzen und Antizipation von Schmerzen. Hier wurde mit zwei Intensitäten in Bezug auf temperaturbezogene Stimulationen (schmerzhafte und nicht-schmerzhafte Wärme) gearbeitet. Über unterschiedliche Farben wurde die jeweils nachfolgende Bedingung angekündigt. Im Anschluss an die Untersuchung gaben alle Probanden an, sich der Verbindung zwischen den Farben und ihrer Konsequenzen bewusst gewesen zu sein. Über eine 11-stufige Skala äußerten die Probanden auch einen signifikanten Unterschied in Bezug auf die wahrgenommenen Intensitäten der beiden Bedingungen. Beim Kontrast bezogen auf Schmerzen wurde unter anderem eine Aktivierung der medialen Insula festgestellt. Beim Kontrast für die Antizipation von Schmerzen wurde ein Vergleich der Aktivierungen in Bezug zu den Farben, die beide Bedingungen ankündigten, vorgenommen. Hierbei konnte neben anderen Aktivierungen eine Aktivierung der anterioren Insula aufgedeckt werden.

*Büchel et al.*⁹⁴⁵ thematisierten die neuronalen Reaktionen im Zusammenhang mit klassischer Konditionierung. Klassische Konditionierung stellt eine Form von assoziativem Lernen dar, bei der die Verknüpfung eines neutralen Stimulus und einem Stimulus mit hoher intrinsischer verhaltensbezogener Bedeutung erfolgt. Es wurden vier Gesichter präsentiert und teilweise an einen unangenehmen Ton (1kHz) gekoppelt. Zusätzlich zur Gehirnaktivität wurde auch der Hautleitwiderstand gemessen, welcher indizierte, dass eine signifikante Differenz zwischen *CS⁺-Stimuli* (Gesichter mit unangenehmem Ton) und *CS⁻-Stimuli* (Gesichter ohne unangenehmen Ton) vorlag. Der Kontrast für die Konditionierung ergibt sich, indem *CS⁺_{unpaired}-Stimuli* (Gesichter i.V.m. Ton, aber hier ohne Ton) *CS⁻-Stimuli* (Gesichter immer ohne Ton) gegenübergestellt werden. Unter anderem konnte auch eine Aktivierung der anterioren Insula festgestellt werden.

*Phillips et al.*⁹⁴⁶ setzten sich in ihrer Studie mit den neuronalen Substraten der Wahrnehmung von Gesichtsausdrücken, die Ekel kommunizieren, auseinander. Es wurden sowohl Stimuli verwendet, die Angst (Fear) zum Ausdruck brachten, als auch solche, die Ekel (Disgust) darstellten. In beiden Bedingungen gab es zusätzlich noch zwei *Intensitätsstufen* im Sinne von einem etwas geringeren Ausmaß (75% Ekel/ Angst) und einem höheren Ausmaß (150% Ekel/ Angst). Im Rahmen der Bedingung *Angst* konnte keine Insula-Aktivierung berichtet werden, in Bezug zu Ekel fand man hingegen eine Aktivierung der anterioren Inselrinde. Bei der Bedingung *Ekel* gab es zudem eine signifikant höhere Aktivierung der Inselrinde beim Vergleich von 150% mit 75%. Folglich gilt hier: Je größer der Ekel, desto stärker die Inselrinden-Aktivierung.

⁹⁴⁴ vgl. Ploghaus, A.; Tracey, I.; Gati, J. S.; Clare, S.; Menon, R. S.; Matthews, P. M.; Rawlings, J. N. P. (1999)

⁹⁴⁵ vgl. Büchel, C. et al. (1998)

⁹⁴⁶ vgl. Phillips, M. L.; Young, A. W.; Senior, C.; Brammer, M.; Andrew, C.; Calder, A. J.; Bullmore, E. T.; Perret, D. I.; Rowland, D.; Williams, S. C. R.; Gray, J. A.; David, A. S. (1997)

Kosslyn et al.⁹⁴⁷ untersuchten die Effekte des Wahrnehmens und Visualisierens von aversiven Stimuli. Im Rahmen der Studie wurden aversive und neutrale Stimuli gegenübergestellt, wobei die Stimuli im Vorfeld anhand einer 7-stufigen Skala in Bezug auf Valenz und Arousal (Erregung) bewertet wurden. Aversive Bilder wurden hierbei negativer und stärker erregend eingestuft als neutrale Bilder. Beim Vergleich der negativen mit den neutralen *Visualisierungen* zeigte sich eine Aktivierung im anterioren Inselcortex. Dieses Ergebnis verbinden die Autoren mit dem sog. *Gut Feeling*: „... *this result might indicate that images of aversive stimuli can turn one's stomach, as it were, which is then registered by the brain.*“⁹⁴⁸ Bei der *Wahrnehmung* der negativen im Vergleich zu den neutralen Stimuli ergaben sich allerdings keine Überschneidungen mit den Ergebnissen der Visualisierungsaufgabe. Bei einem *Cross-Condition-Vergleich*, indem visualisierte negative Stimuli mit wahrgenommenen negativen Stimuli kontrastiert wurden, wurde eine stärkere Aktivierung des insulären Cortex für die Visualisierungsaufgabe festgestellt. Für dieses Ergebnis hatten die Autoren keine Erklärung.⁹⁴⁹

Coghill et al.⁹⁵⁰ betrachteten die Verarbeitung von Schmerzen und Vibration im menschlichen Gehirn. Im Rahmen der Untersuchung wurden die Probanden an einem Arm mit schmerzhaften Temperaturen und einer nicht-schmerzhaften Vibration stimuliert. Beim Kontrast *painful vs. neutral* wurde unter anderem eine Aktivierung der kontralateralen anterioren Insula⁹⁵¹ festgestellt. I.V.m. dem Kontrast *vibratory vs. neutral* fand sich eine Aktivierung der posterioren Insula. Beim Kontrast *painful vs. vibratory* ergab sich nur eine signifikant höhere Aktivierung der anterioren Insula.

Naqvi et al.⁹⁵² erforschten im Rahmen einer Läsionsstudie die Wirkung einer Inselrindenverletzung auf das Verlangen zu Rauchen. Dazu wurden 19 Raucher mit einem Schaden der Inselrinde⁹⁵³ und 50 Raucher mit Schäden in anderen Gehirnregionen gegenübergestellt. Alle Probanden rauchten vor dem jeweiligen Unfall mehr als fünf Zigaretten pro Tag und das mindestens zwei Jahre lang. Eine *Disruption of smoking addiction (DOSA)* wurde bei 16 von 19 Rauchern mit Inselrindenläsion festgestellt. Diesbezüglich wurde ein signifikanter Unterschied zwischen Inselrindenschäden und Non-Inselrindenschäden festgestellt. Nach einer weiteren Kontrolle der einzelnen beschädigten Regionen konnte gezeigt werden, dass einzig eine linke und eine rechte Inselrindenbeschädigung einen Bezug zur DOSA aufweisen. Das Resultat indiziert, dass es bei Rauchern, die eine Inselrindenbeschädigung erleiden, sehr wahr-

⁹⁴⁷ vgl. Kosslyn, S. M.; Shin, L. M.; Thompson, W. L.; McNally, R. J.; Rauch, S. L.; Pitman, R. K.; Alpert, N. M. (1996)

⁹⁴⁸ ebenda, S. 1572

⁹⁴⁹ Ein Erklärungsansatz ist *Anhang 16: Darstellung des Hintergrundwissens auf drei Abstraktionsebenen* und den weiteren Ausführungen zu entnehmen.

⁹⁵⁰ vgl. Coghill, R. C.; Talbot, J. D.; Evans, A. C.; Meyer, E.; Gjedde, A.; Bushnell, M. C.; Duncan, G. H. (1994)

⁹⁵¹ Wurde der linke Arm stimuliert, konnte in der rechten anterioren Insula eine Aktivierung gemessen werden.

⁹⁵² vgl. Naqvi, N. H.; Rudrauf, D.; Damasio, H.; Bechara, A. (2007)

⁹⁵³ Die Probanden wiesen tendenziell auch in anderen Regionen Schäden auf.

scheinlich ist, dass sie umgehend mit dem Rauchen aufhören und auch abstinent bleiben. Zusätzlich verspüren sie kein bewusstes Verlangen mehr nach Nikotin, nachdem sie aufhören zu rauchen. Direkt an das Ergebnis anschließend stellt sich die Frage, ob es weitere Verhaltensweisen gibt, die durch eine Inselrindenläsion beeinträchtigt werden. Diesbezüglich gab keiner der Probanden mit Inselrindenläsion und DOSA in einer anschließenden Befragung an, dass er eine Verringerung des Vergnügens beim Essen bzw. ein geringeres Verlangen nach Essen verspürte. In Bezug auf diese Frage bzw. deren Beantwortung kommen die Autoren unter anderem zur folgenden Erklärung: „*One possibility is that motivated behaviors that are fundamental to survival, such as eating, are supported by redundant neural mechanisms that are difficult to disrupt with a lesion in a single brain region.*“⁹⁵⁴

*Paulus & Stein*⁹⁵⁵ bearbeiten in einem Übersichtsartikel das Thema Angst i.V.m. der Inselrinde. Im Rahmen dieses Artikels wurde unter anderem auch eine Verknüpfung der anterioren Insula mit *Interozeption* herausgestellt. Hierunter wird das Körpergefühl bzw. der Sinn für die physiologische Verfassung des gesamten Körpers verstanden.⁹⁵⁶ Zu dieser Funktion zählen die Wahrnehmung von Temperatur, Schmerz, Jucken, Kitzeln, sinnliche Berührung, muskuläre und innere/viszerale Ereignisse, Hunger, Durst, Atemnot und weitere Aspekte.⁹⁵⁷ Das zugrunde liegende neuronale System hinsichtlich der *Interozeption* beschreiben die Autoren als ein gleichgewichtsbezogenes System, welches über aufsteigende Bahnen Informationen vermittelt, um ein inneres Abbild des gesamten Körpers zu generieren.⁹⁵⁸ Hinsichtlich der *Interozeption* sind zwei zentrale Aspekte zu nennen.⁹⁵⁹ Zum einen werden interozeptive Erlebnisse oft mit intensiven affektiven und motivationalen Komponenten verbunden, wie z.B. bei der Wärmeempfindung von Hitze. Zum anderen ist die Bewertung eines derartigen Erlebnisses vom gegenwärtigen Gleichgewichtszustand eines Individuums abhängig. Je nach gegenwärtiger Körpertemperatur kann Wärme bzw. Kälte sowohl als angenehm wie auch als unangenehm wahrgenommen werden. Bezogen auf die Inselrinde und *Interozeption* kommen die Autoren zu dem Schluss, dass eine zentrale Aufgabe der Insula darin besteht, Informationen in Bezug auf die Salienz⁹⁶⁰ und relative Beurteilung der Stimulus-Umgebung zu erhalten. Diese Informationen werden hierbei hinsichtlich eines möglichen Effektes auf den gegenwärtigen Körperzustand bewertet.⁹⁶¹ „*The anterior insular cortex, as part of the interoceptive system, may provide information about future aversive body states associated with conditional stimuli and signal this information to brain areas that are critical for the allocation of attention and the execution of actions.*“⁹⁶²

⁹⁵⁴ Naqvi, N. H. et al. (2007), S. 534

⁹⁵⁵ vgl. Paulus, M. P.; Stein, M. B. (2006)

⁹⁵⁶ vgl. Craig, A. D. (2002), S. 655

⁹⁵⁷ vgl. Paulus, M. P.; Stein, M. B. (2006), S. 383

⁹⁵⁸ vgl. ebenda, S. 383

⁹⁵⁹ vgl. ebenda, S. 383

⁹⁶⁰ sowohl positiv im Sinne von Begehren wie auch negativ im Sinne von Ablehnung

⁹⁶¹ vgl. Paulus, M. P.; Stein, M. B. (2006), S. 383

⁹⁶² ebenda, S. 383

An behaarten Körperregionen bestehen im Zusammenhang mit leichten Berührungen grundlegend zwei Übertragungswege. Zum einen existiert eine schnelle Reizweiterleitung über myelinisierte aufsteigende Fasern, zum anderen ist zusätzlich eine langsamere Übertragung aktiv, die über nicht-myelinisierte Fasern vermittelt wird. *Olausson et al.*⁹⁶³ konzentrierten sich auf die langsam übertragenden nicht-myelinisierten Bahnen i.V.m. einer taktilen Stimulierung (CT)⁹⁶⁴. Für diese Untersuchung konnte eine Probandin, in Form ihrer Initialen mit G.L. bezeichnet, eingesetzt werden, die keine myelinisierten afferenten Bahnen mit großem Durchmesser aufwies und somit eine passende Probandin war, um das CT-System genauer zu betrachten. In Bezug auf taktile Stimulationen hatte die Probandin eine leichte Berührung bemerkt. Sie empfand die Stimulation zwar schwächer als die Kontrollprobanden, aber im selben Maße angenehm. Bei der leichten Berührung ergaben sich für die Kontrollpersonen verschiedene Aktivierungen, auch im Bereich der kontralateralen Inselrinde. Bei G.L. ergab sich hingegen eine bilaterale Aktivierung der Inselregion. Dies bringt die starke Beziehung zwischen dem CT-System und der Inselrinde zum Ausdruck. „*The faint and obscure character of the touch sensation described by G.L., as well as her inability to perceive direction of movement, suggest that the CT system does not provide discriminative aspects of touch. G.L.'s qualitative description seems consistent with CT being a system of significance for affective aspects of touch.*“⁹⁶⁵ Das Ergebnis in Bezug auf die Verarbeitung von leichten Berührungen stützt die Annahme, dass Neuronen, die mit der Verarbeitung von Temperatur, Schmerz und Jucken verbunden sind, in den Inselcortex projizieren, welcher insofern ein essentielles Element des Interozeption-Systems darstellt.⁹⁶⁶

*Hampton et al.*⁹⁶⁷ beschäftigten sich mit dem Einfluss der Amygdala auf die Gewinnerwartung und Entscheidungssignale im präfrontalen Cortex. Hierfür hatten sie die Möglichkeit zwei Probanden einzusetzen, die bilaterale Schäden im Bereich der Amygdala aufwiesen. Alle Probanden nahmen im Zuge der Studie an einer *reversal-learning task* teil. Hierbei ging es im ersten Schritt darum, die richtige, im Sinne von Belohnung, von zwei Entscheidungsalternativen zu lernen. Im zweiten Schritt bestand das Ziel darin, zu erkennen, wann die Zielkategorie geändert wird, also die andere Alternative nun mehr Belohnung verspricht, und auf diese zu wechseln (switch). Beim Kontrast für *reversal learning*, also die Bedingung *switch* (Wechsel auf die andere Alternative) im Vergleich zur Bedingung *stay* (man wählt weiterhin dieselbe Alternative), fand sich eine Aktivierung der anterioren Insula. Diese Aktivierung war in der Kontrollgruppe signifikant höher als bei den beiden Patienten mit Amygdala-Schaden. Bei der Betrachtung von verlustreichen Ergebnissen (punishing outcomes) ist anzumerken, dass keine Insula-Aktivierung zu verzeichnen war.

⁹⁶³ vgl. Olausson, H.; Lamm, Y.; Backlund, H.; Morin, C.; Wallin, B. G.; Starck, G.; Ekholm, S.; Strigo, I.; Worsley, K.; Vallbo, A. B.; Bushnell, M. C. (2002)

⁹⁶⁴ Hier wird eine Kombination der betreffenden afferenten Bahnen mit einer taktilen Stimulierung als „CT-System“ bezeichnet.

⁹⁶⁵ Olausson, H. et al. (2002), S. 902

⁹⁶⁶ vgl. ebenda, S. 902

⁹⁶⁷ vgl. Hampton, A. N.; Adolphs, R.; Tyszka, J. M.; O'Doherty, J. P. (2007)

Huettel et al.⁹⁶⁸ setzten sich mit dem Thema *Unsicherheit in Entscheidungssituationen* auseinander. Sie untersuchten, ob die Präferenz im Falle von Risiko⁹⁶⁹ und die Präferenz im Falle von Ambiguität⁹⁷⁰ auf denselben oder auf unterschiedlichen neuronalen Mechanismen beruhen. Im Rahmen der Untersuchung mussten die Probanden immer zwischen zwei Spielvarianten (monetary gambles) wählen. Bei diesen monetären Spielen gab es verschiedene Gewinndarstellungen. Entweder war der Spielausgang bzw. Gewinn bekannt (certain), mit Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Spielausgänge versehen (risky) oder nur die Spielausgänge waren bekannt, aber keine Information über die Eintrittswahrscheinlichkeiten angegeben (ambiguous). Beim Kontrast *Ambiguität vs. Risiko* zeigt sich unter anderem eine erhöhte Aktivierung der anterioren Insula.

Knutson et al.⁹⁷¹ gingen der Frage nach der neuronalen Repräsentation von positiven Erwartungswerten (expected value) und den Mechanismen, die den Erwartungswert erzeugen, auf den Grund. Die Probanden setzten sich im Rahmen dieser Studie mit einer *probabilistic monetary incentive delay task* auseinander, in der sie mit unterschiedlichen Angeboten konfrontiert wurden und entscheiden mussten, ob sie diese annehmen oder ablehnen. Innerhalb dieser Aufgabe diente die Form (Kreis oder Viereck) um *Valenz* (potentieller Gewinn bzw. Verlust) zu signalisieren. I.V.m. der Form wurden auch noch eine vertikale und eine horizontale Linie an verschiedenen Positionen eingeblendet. Die Position einer vertikalen Linie (links, mittig oder rechts) war mit der *Magnitude des Gewinns bzw. Verlustes* (0.00\$/ 1.00\$ oder 5.00\$) verbunden und die Position einer horizontalen Linie (oben, mittig oder unten) sagte etwas über die *Erfolgswahrscheinlichkeit* aus (hoch, mittel oder niedrig). Beim Kontrast bezogen auf die Valenz (Gewinn vs. Verlust) wurde keine Insula-Aktivierung entdeckt. Beim Kontrast bezogen auf die Magnitude (5.00\$ vs. 0.00\$) zeigte sich eine Aktivierung der Insula.

Nachdem die verschiedenen Studien, die im Rahmen der vorliegenden neuronalen Interpretation den Großteil des Hintergrundwissens darstellen, jeweils anhand ihres inhaltlichen Aufhängers, der groben experimentellen Umsetzung und den zentralen Ergebnissen kurz vorgestellt wurden, sollte auf dieser *untersten Abstraktionsebene* zunächst deutlich geworden sein, dass eine Aktivierung der Inselrinde bereits im Zusammenhang mit vielen unterschiedlichen Anwendungsbereichen berichtet wurde. Die starke Heterogenität auf der 1. Abstraktionsebene kann ebenfalls der tabellarischen Übersicht im Anhang⁹⁷² entnommen werden, in der alle Studien mit ihrem speziellen inhaltlichen Fokus kurz dargestellt sind. Um die Heterogenität in Bezug auf die Insula-Aktivierung übersichtlicher darzustellen, ist es wichtig, die Ergebnisse der Studien auf der 2. Abstraktionsebene zu betrachten. Auf dieser Abstraktionsebene kön-

⁹⁶⁸ vgl. Huettel, S. A.; Stowe, C. J.; Gordon, E. M.; Warner, B. T.; Platt, M. L. (2006)

⁹⁶⁹ Unsicherheit mit bekannten Wahrscheinlichkeiten

⁹⁷⁰ Unsicherheit mit unbekanntem Wahrscheinlichkeiten

⁹⁷¹ vgl. Knutson, B. et al. (2005)

⁹⁷² vgl. Anhang 16: Darstellung des Hintergrundwissens auf drei Abstraktionsebenen

nen die einzelnen Studien grundlegender zugeordnet bzw. differenziert werden. Auch diesbezüglich bietet sich die ergänzende Betrachtung von Anhang 9⁹⁷³ an.

Zum einen finden sich auf der 2. *Abstraktionsebene* einige Studien, die eine Insula-Aktivierung im Zusammenhang mit *positiven Emotionen* berichten. Hier geht es um verschiedene Formen von Liebe, das Treffen von Präferenzentscheidungen und auch um eine positive Vorhersage der *Willingness to buy*. Zum anderen liegen viele Studien vor, die eine Verbindung der Inselrinde mit *negativen Emotionen* aufzeigen. Zu diesem Bereich zählen Studien zum Thema Ekel, Schmerz (Observation, Antizipation und auch eigenes Erleben), Verluste (Erfahrung und Antizipation), geringe Belohnungswerte (die wie Verluste erlebt werden), Unsicherheit (mit bekannten Eintrittswahrscheinlichkeiten), Ambiguität (Unsicherheit ohne bekannte Eintrittswahrscheinlichkeiten), exzessiv hohe Preise, Kaufhandlung (negative Korrelation), Unfairness und Visualisierung von aversiven Stimuli. Des Weiteren wurden Studien vorgestellt, die sich nicht direkt zu den beiden bereits genannten Kategorien zuordnen lassen, da sie weder strikt als positive noch als negative Emotionen aufgefasst werden können bzw. theoretisch beides sein könnten und insofern eher *valenzunabhängige Sachverhalte* repräsentieren. Hierbei handelt es sich um Untersuchungen, die Aktivierungen der Insula verbunden mit dem somatosensorischen System (berührungsbezogene Erfahrungen), Drang nach einem Reiz bzw. Mangel erleben i.V.m. diesem Reiz, Interozeption (Körpergefühl), Strategiewechsel und Magnitude (Gewinn- bzw. Verlusthöhe) festgestellt haben.

Wie bereits anhand der untersten Abstraktionsebene und nun anhand der 2. Abstraktionsebene festgestellt werden kann, wird die Aktivierung der Insula im Allgemeinen sehr heterogen diskutiert. Sie wird sowohl mit positiven, wie auch mit negativen Emotionen in Verbindung gebracht. Zudem existieren auch Ergebnisse, die sich zu keiner der beiden Kategorien direkt zuordnen lassen. Anhand der Ergebnisse auf der 2. Abstraktionsebene⁹⁷⁴ lassen sich erst einmal einige Behauptungen bezogen auf die Bedeutung der Insula abschwächen. Der Position, dass die Insula generell mit positiven Emotionen verbunden ist, können alle Studien entgegen gehalten werden, die Aktivierungen mit negativen bzw. aversiven Stimuli berichten. Gegen die Position, dass die Insula exklusiv im Fall negativer Emotionen aktiviert wird, kann dasselbe Argument angeführt werden. Es wurden z.B. auch Insula-Aktivierungen in den Studien festgestellt, in denen unterschiedliche Formen von Liebe untersucht wurden. In Rahmen einiger dieser Studien wurden auch die Deaktivierungen bezüglich der Liebesbedingung betrachtet. Der Gedanke hierbei war, dass Liebe eine Kombination aus der Verstärkung positiver Emotionen und der Unterdrückung bzw. Ausblendung negativer Emotionen darstellt. Da sich keine Deaktivierung der Inselrinde zeigte, ist dies ein weiterer Hinweis dafür, dass die Insula nicht per se mit negativen Aspekten zu assoziieren ist. Auch die Studie von *Phillips et al.*⁹⁷⁵ spricht trotz einer gefundenen Aktivierung der Insula i.V.m. Ekel dafür, dass die Insula nicht generell auf negative

⁹⁷³ Anhang 16: Darstellung des Hintergrundwissens auf drei Abstraktionsebenen

⁹⁷⁴ vgl. ebenda

⁹⁷⁵ vgl. Phillips, M. L. et al. (1997)

bzw. aversive Stimuli reagiert. Diese Untersuchung beschäftigte sich neben dem Thema Ekel auch mit dem Thema Angst. Im Zusammenhang mit der Bedingung *Angst* konnte allerdings keine erhöhte Aktivierung der Insula herausgestellt werden. Eine Schlussfolgerung hinsichtlich dieser Studie ist, dass zwar zwei negative Emotionen betrachtet wurden, jedoch nur in Bezug zu einer Aktivierung der Insula erfolgte. Eine ähnliche Situation stellt auch die Studie von *Kosslyn et al.*⁹⁷⁶ dar. Im Zuge dieser Studie ging es zum einen um die Wahrnehmung und zum anderen um die Visualisierung von aversiven Stimuli. Im Ergebnis war die Inselrinde nur für die Visualisierungsbedingung stärker aktiviert. Beim Kontrast der Visualisierungs- mit der Perzeptionsbedingung zeigte sich ebenfalls eine signifikant höhere Insula-Aktivierung zu Gunsten der Visualisierung. Hierfür hatten *Kosslyn et al.* keine plausible Erklärung.⁹⁷⁷ Auch hier kann angemerkt werden, dass zwar zwei Situationen mit negativen bzw. aversiven Stimuli vorliegen, jedoch nicht in beiden eine Insula-Aktivierung berichtet werden konnte.

Festzuhalten bleibt zunächst, dass eine Insula-Aktivierung generell weder mit einer positiven noch mit einer negativen Emotion einhergeht. Es zeichnet sich vielmehr der Eindruck einer *valenzunabhängigen Aktivierung* ab, d.h. eine Insula-Aktivierung scheint sich nicht in erster Linie auf die Valenz zu beziehen. Dies spiegelt auch der Vergleich zwischen der Studie von *Tusche, Bode & Haynes*⁹⁷⁸ und *Knutson et al.*⁹⁷⁹ wider. Im Rahmen beider Untersuchungen finden sich sowohl eine Insula-Aktivierung wie auch die Aktivierung des medialen präfrontalen Cortex (MPFC) im Zuge der *Vorhersage einer Kaufentscheidung* bzw. der *Vorhersage der Willingness to buy*. Doch während bei *Knutson et al.* eine negative Korrelation zwischen einer Insula-Aktivierung und einer Kaufentscheidung besteht, berichten *Tusche, Bode & Haynes* eine Aktivierung der Insula im Zusammenhang mit der Vorhersage einer positiven *Willingness to buy*. Zudem untersuchten *Knutson et al.*⁹⁸⁰ im Zuge des Themas *Repräsentation von Erwartungswerten* unter anderem auch die Bedingung *Valenz*. Hierbei konnte jedoch keine Aktivierung der Insula nachgewiesen werden.

Nachdem nun im Resümee der 2. Abstraktionsebene eine *valenzunabhängige Position* in Bezug auf die Insula eingenommen wird, stellt sich die Frage nach der eigentlichen Ursache für die einzelnen Insula-Aktivierungen. Aus diesem Grund wurden die einzelnen Untersuchungen im Rahmen der 3. *Abstraktionsebene* noch einmal genauer in Bezug auf die jeweils verwendeten Stimuli bzw. Aufgabenstellungen betrachtet, allerdings ohne konkret auf die Valenz zu achten. Durch die Ausblendung des Valenzaspektes ist über die Studien hinweg stets eine Gemeinsamkeit zu erkennen. Die Stimuli, die eine Insula-Aktivierung hervorgerufen haben, stehen in jeder Studie stellvertretend für ein hohes Maß an *Arousal*.⁹⁸¹ Unter Arousal ist hierbei eine

⁹⁷⁶ vgl. *Kosslyn, S. M. et al. (1996)*

⁹⁷⁷ Ein Erklärungsansatz ist *Anhang 16: Darstellung des Hintergrundwissens auf drei Abstraktionsebenen* und den weiteren Ausführungen zu entnehmen.

⁹⁷⁸ vgl. *Tusche, A.; Bode, S.; Haynes, J.-D. (2010)*

⁹⁷⁹ vgl. *Knutson, B. et al. (2007)*

⁹⁸⁰ vgl. *Knutson, B. et al. (2005)*

⁹⁸¹ vgl. *Anhang 16: Darstellung des Hintergrundwissens auf drei Abstraktionsebenen*

starke Erregung im Sinne einer deutlichen, signifikanten und für das Nervensystem spürbaren Aktivierung zu verstehen, die folglich intensitätsbezogen und nicht valenzbezogen ist. Die Stimuli i.V.m. positiven Emotionen, wie Liebe, stellen immer Reize dar, die eine besondere Bedeutung für die Probanden im Sinne einer hohen Intensität haben (der geliebte Partner, die eigenen Kinder, ...). Dasselbe gilt für die Studien, die negative bzw. aversive Stimuli verwenden. Bei einigen dieser Studien⁹⁸² zeigte sich sogar beim Vorliegen unterschiedlicher Intensitätsstufen eine stärkere Insula-Aktivierung verbunden mit der höheren Intensität. Dies deutet auch daraufhin, dass eine intensitätsbezogene Aktivierung vorliegt, was wiederum in Richtung *Arousalabhängigkeit* weist. Zum gleichen Schluss kann man auch über die Studie von *Olsson, Nearing & Phelps*⁹⁸³ kommen. In ihrer Studie zur sozialen Angstübertragung wurde zum einen eine Observationsbedingungen (Betrachten einer anderen Person, die einem Elektroschock ausgesetzt wird) und zum anderen eine Testbedingung (Proband bekommt selbst einen Elektroschock) untersucht. In beiden Situationen wurde eine Aktivierung der Insula festgestellt, doch beim Vergleich zwischen Test- und Observationsbedingung lag für die Testbedingung eine stärkere Aktivierung der Inselrinde vor. Zur Erklärung kann ein höher ausgeprägtes Arousal beim tatsächlichen Erleben des Elektroschocks angeführt werden.

Durch diese *arousalbezogene Perspektive* lässt sich auch das zunächst kontraintuitiv erscheinende Ergebnis der Studie von *Kosslyn et al.*⁹⁸⁴ plausibel erklären. Wie bereits weiter oben dargestellt, wurde im Rahmen dieser Studie eine Insula-Aktivierung im Zusammenhang mit der Visualisierung von aversiven Stimuli, aber keine Aktivierung bei der Betrachtung von aversiven Stimuli festgestellt. Hierfür hatten Kosslyn et al. keine Erklärung. Um dieses Ergebnis besser interpretieren zu können, muss man noch hinzufügen, dass es sich bei den Probanden um Vietnam-Veteranen handelte. Bei der Visualisierung von aversiven Stimuli waren die Probanden nicht an die Realität gebunden und konnten über ihre Erfahrungen auf diese Weise sehr hohe Arousal-Werte generieren. Hingegen waren ihre eigenen Erfahrungen bei der Perzeption von aversiven Stimuli sehr wahrscheinlich der Grund dafür, dass diese gerade kein spürbares Arousal erzeugen konnten.

Durch die Betrachtung mehrere Abstraktionsebenen kann grundlegend herausgestellt werden, dass eine Insula-Aktivierung im Sinne einer *valenzunabhängigen* und *arousalabhängigen Aktivierung* zu verstehen ist.

Passend zur bereits geschilderten heterogenen Betrachtung der Insula äußerten *Tusche, Bode & Haynes*, die im Rahmen ihrer Untersuchungen zu Verarbeitungsprozessen mit High und Low-Attention in beiden Fällen eine Insula-Aktivierung feststellten: „*However, the precise role of stimulus-related attention in mediating such automatic valuation process remains unclear.*“⁹⁸⁵ Auch *Knutson & Bossaerts* weisen auf eine Unklarheit in Bezug auf die genaue Interpretation bzw. Bedeutung der Insula

⁹⁸² vgl. Sanfey, A. G. et al. (2003); Phillips, M. L. et al. (1997)

⁹⁸³ vgl. Olsson, A.; Nearing, K. I.; Phelps, E. A. (2007)

⁹⁸⁴ vgl. Kosslyn, S. M. et al. (1996)

⁹⁸⁵ Tusche, A.; Bode, S.; Haynes, J.-D. (2010), S. 8024

hin: „... *but additional research must determine whether insula activation correlates with negative arousal, undifferentiated arousal, or any subjective experience.*“⁹⁸⁶

Die aus dem dargelegten Argumentationsstrang abgeleitete Sicht des Autoren bezogen auf die Insula fügt sich gut in die Sichtweise von *Damasio*⁹⁸⁷, welche abschließend kurz dargestellt werden soll, bevor die Interpretation der Insula-Aktivierung in der vorliegenden Studie erfolgt.

Wie schon in der ein oder anderen vorgestellten Studie sieht auch *Damasio* eine starke Beziehung zwischen Insula und *Interozeption*, der *Verarbeitung von viszeralen Reizen* und dem *somatosensorischen System*. Die genannten Funktionen bilden gemeinsam ein körpergefühlbezogenes System, d.h. es geht um das Bewusstwerden von inneren Zuständen des gesamten Körpers über verschiedene Subsysteme. Hierbei liefert unter anderem die Insula die Information, ob sich der Körper in einem Gleichgewicht befindet oder ob mögliche *Störgrößen* in Bezug auf das aktuelle Gleichgewicht bestehen. Eine Störung bzw. eine signifikante Veränderung hinsichtlich des aktuellen Gleichgewichts kann sowohl im positiven⁹⁸⁸ wie auch im negativen Sinne⁹⁸⁹ vorliegen. Eine mögliche Störung des Gleichgewichts kann daher generell als valenzunabhängig angesehen werden. Grob gesprochen meldet die Insula, wenn eine gewisse Reiz- bzw. Arousalsschwelle überschritten wird. Ist ein solcher Moment erreicht, kann sich das in sog. *Gut Feeling* (Bauchgefühl) äußern. Dieses bringt unter anderem über die Verarbeitung viszeraler Reize zum Ausdruck, dass in der Umwelt Reize existieren, die potentiell in der Lage sind, den aktuellen Gleichgewichtszustand einer Person zu verändern. Im deutlichsten Fall kann man in der Folge schnell ein flaves Gefühl im Magen bekommen bzw. hat man das Gefühl, dass sich der Magen umdreht. Intuitiverweise kann fast jeder dieses zunächst valenzunabhängige Befinden nachvollziehen. Ist man bspw. frisch verliebt und begegnet dieser Person, so verspürt man aufgrund der intensiven positiven Emotionen einen flauen Magen. Hat man auf der anderen Seite bezogen auf eine Person ein schlechtes Gewissen und wird mit dieser Person konfrontiert, so dreht sich einem davon ebenfalls der Magen im wahrsten Sinne des Wortes um.

Damasio geht davon aus, dass der insuläre Cortex, i.V.m. anderen Strukturen, die am stärksten bzw. am besten vernetzte Repräsentation des inneren Zustandes eines Organismus auf neuronaler Ebene darstellt. Für ihn ist der insuläre Cortex Teil des *Proto-Self*. Dieses beschreibt er als „... *a coherent collection of neural patterns which map, moment by moment, the state of the physical structure of the organism in its many dimensions.*“⁹⁹⁰ Bezogen auf das *Proto-Self* äußert *Damasio* weiter: „*The proto-self does not occur in one place only, and it emerges dynamically and continuously out of multifarious interacting signals that span varied orders of the nervous system. Besides, the proto-self is not an interpreter of anything. It is a reference point at each*

⁹⁸⁶ Knutson, B.; Bossaerts, P. (2007), S. 8176

⁹⁸⁷ vgl. Damasio, A. R. (1999), S. 133 ff.

⁹⁸⁸ Stimuli, die positive Emotionen auslösen

⁹⁸⁹ Stimuli, die negative Emotionen auslösen

⁹⁹⁰ Damasio, A. R. (1999), S. 154

*point in which it is.*⁹⁹¹ Damasio geht im Zusammenhang mit der Abbildung von Körpersignalen auch auf das somatosensorische System ein. Dieses kann ebenfalls mit der Aktivität der Insula verbunden werden und geht weit über die reine Verarbeitung von Berührungen oder muskulären Erlebnissen hinaus. Damasio versteht das somatosensorische System nicht als ein einfaches System, sondern als ein Verbund verschiedener Subsysteme, die dem Gehirn jeweils Signale über den Zustand unterschiedlicher körperlicher Aspekte vermitteln.⁹⁹² „... *the varied aspects of somatosensory signaling work in parallel and in fine cooperation to produce, at multiple levels of the central nervous system, from spinal cord and brain stem to the cerebral cortices, myriad maps of the multidimensional aspects of the body state at any given moment.*“⁹⁹³

Die Sicht der Insula als stark vernetzte Einheit in Bezug auf das innere Geschehen eines Organismus wird durch den Beitrag von *Augustine*⁹⁹⁴ unterstrichen, indem verschiedene Funktionen⁹⁹⁵ und neuronale Verbindungen der Insula dargestellt werden. Überdies berichten *Reynolds & Zahm*⁹⁹⁶ Verknüpfungen der Insula sowohl zu Regionen i.V.m. positiven (ventrales Striatopallidum) wie auch negativen Emotionen (Amygdala). Dies verstärkt auch noch einmal die Sicht einer generell valenzunabhängigen Aktivierung, so dass eine Insula-Aktivierung nicht nur strikt mit positiven bzw. negativen Stimuli verbunden ist, sondern vielmehr je nach Situation sowohl bei positiv stark aktivierenden Stimuli als auch bei negativ stark aktivierenden Stimuli eine Aktivierung aufweisen kann.

Mit Hilfe der beschriebenen Erkenntnisse können alle angesprochenen Studien besser eingeordnet bzw. deren Gemeinsamkeit nachvollzogen werden. Die Studien von *Hampton et al.*⁹⁹⁷ (Strategiewechsel), *Huettel et al.*⁹⁹⁸ (Ambiguität), *Rolls, McCabe & Redoute*⁹⁹⁹ (Unsicherheit) sowie alle Studien zu positiven und negativen Emotionen beinhalten alle Stimuli bzw. stellen alle Situationen dar, die aufgrund ihres erzeugten Arousals von einem Gleichgewichtszustand abweichen bzw. in der Lage sind, einen gegenwärtigen Gleichgewichtszustand zu stören, sowohl in einer positiven wie auch in einer negativen Hinsicht.

Zu guter Letzt kann nun die Aktivierung im Zusammenhang mit Sonderangebotssignalen angemessen interpretiert werden. Beim Kontrast *SA-Signal vs. kein Sa-Signal* konnte eine stärkere Aktivierung der vorderen Inselrinde festgestellt werden. Diese ist vor allem dann involviert, wenn Umwelteinflüsse (bspw. SA-Signale) existieren, die das körperbezogene innere Gleichgewicht gefährden bzw. verändern können.

⁹⁹¹ Damasio, A. R. (1999), S. 154

⁹⁹² vgl. ebenda, S. 149

⁹⁹³ ebenda, S. 149

⁹⁹⁴ vgl. Augustine, J. A. (1996)

⁹⁹⁵ z.B. *visceral sensory area, somatosensory area, multifaceted sensory area, ...*

⁹⁹⁶ vgl. Reynolds, S. M.; Zahm, D. S. (2005), S. 11764

⁹⁹⁷ vgl. Hampton, A. N. et al. (2007)

⁹⁹⁸ vgl. Huettel, S. A. et al. (2006)

⁹⁹⁹ vgl. Rolls, E. T.; McCabe, C.; Redoute, J. (2008)

Die Sonderangebotssignale sind folglich im Rahmen von Kaufangeboten in der Lage, ein relativ hohes Arousal bei den Probanden auszulösen. Entgegen einer Vermutung aus Kapitel 6.1¹⁰⁰⁰ in Bezug auf die Abnutzung der Sonderangebotswirkung kann festgehalten werden, dass SA-Signale auf neuronaler, sprich verhaltensrelevanter, Ebene immer noch verarbeitet werden. Da Sonderangebotssignale im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht nur i.V.m. einem günstigen Preis präsentiert wurden, kann über das erzeugte Arousal hinaus keine genauere valenzbezogene Schlussfolgerung gezogen werden.

Festzuhalten bleibt an dieser Stelle, dass die Kaufangebote, die ein Sonderangebotssignal beinhalteten, in der Lage waren, *Gut Feeling* auszulösen. Sie repräsentieren hier allgemein gesehen eine valenzunabhängige Gefährdung des inneren Gleichgewichts und stellen im beschriebenen Sinne *Entscheidungen aus dem Bauch heraus* dar. Werden Konsumenten mit Sonderangebotssignalen konfrontiert, so wird weniger rational darüber nachgedacht. Man tendiert eher dazu, aus dem Bauch heraus zu entscheiden.

7.2 Handlungstheoretische Interpretation

Nachdem die neuronale Interpretation für den *Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal* ausführlich dargelegt wurde, geht es im letzten Schritt der Interpretation um die Frage, inwieweit von erfassten Gehirnaktivierungen auf weiteres Handeln bzw. Verhalten geschlossen werden kann.

Im Ergebnis der neuronalen Interpretation wurde herausgestellt, dass Entscheidungen mit Sonderangebotssignalen ein spürbares Arousal erzeugen können und insofern Bauchentscheidungen repräsentieren, in denen weniger rational reflektiert und eher aus dem Bauch heraus gehandelt wird, um zu einer Entscheidung zu gelangen. Doch wie weit reicht die Aussagekraft der gefundenen neuronalen Aktivierung bzw. wie kann man mit Hilfe dieser konkreten Untersuchung Aussagen über eine generelle verhaltensbezogene Wirkung von Sonderangebotssignalen treffen? Neben diesem speziellen Anliegen gilt es auch allgemein zu klären, inwiefern man aus den Ergebnissen von fMRT-Studien zuverlässige Aussagen in Bezug auf die verhaltensbezogene Ebene treffen kann.

7.2.1 Generelle Überlegungen zur handlungstheoretischen Interpretation

Um die genannten Ziele zu erreichen, erfolgt zunächst eine *allgemeine Betrachtung des Entscheidungsprozesses*, die i.V.m. der vorliegenden Untersuchung an den entsprechenden Stellen in den *Kaufentscheidungsprozess* eingebettet wird. Dies ist insofern unabdingbar, als dass ein realistisches Verständnis in Bezug auf die Struktur der handlungstheoretischen Ebene eine entscheidende Voraussetzung für eine realistische Einschätzung der Aussagekraft von fMRT-Untersuchungen ist. Nur mittels einer realistischen Modellvorstellung über die Strukturen bzw. Teilprozesse, deren Zusammenspiel Entscheidungen bzw. Handlungen generell charakterisieren und

¹⁰⁰⁰ Kapitel 6.1 Theoretischer Hintergrund

überhaupt möglich machen, kann eingeschätzt werden, inwieweit bzw. auf welche Weise fMRT-Daten in Bezug zur handlungstheoretischen Ebene zu interpretieren sind. Die nachfolgenden Überlegungen beziehen sich sowohl auf die Verarbeitungsprozesse, die im Rahmen von Kaufentscheidungen ablaufen als auch auf mögliche Einflussfaktoren innerhalb der einzelnen Teilprozesse. Das Ziel besteht in der Abbildung der Prozesse, die von der Konfrontation mit einem Kaufangebot bis zur Entscheidung im Sinne von Kauf oder Nicht-Kauf anfallen können. Allgemein gesehen sollten sich die Ausführungen allerdings auch auf andere Arten von Entscheidungen übertragen lassen, da sie in der Lage sind, eine generelle Entscheidungsstruktur abzubilden. Aus einer Meta-Ebene gesprochen, können jegliche Arten von Reizen (Kaufangebote, Freizeitaktivitäten, berufliche Sachverhalte, ...) generell als Probleme gesehen werden, auf die der Mensch mittels seiner Entscheidungen in den betreffenden Situationen versucht, angemessen zu reagieren. In diesem Sinne variiert zwar in den speziellen Anwendungsbereichen die Information mit der man in einem bestimmten Kontext konfrontiert wird (also das was hier im konkreten Fall das Kaufangebot darstellt), aber der Ablauf hinsichtlich einer Entscheidungsfindung sollte generell nach derselben Grundlogik erfolgen. Die nachfolgend beschriebenen Prozesse im Rahmen der Entscheidungsfindung basieren auf einer Kombination der *Gedanken von Gerhard Roth*¹⁰⁰¹, *Antonio Damasio*¹⁰⁰² und *zusätzlichen Anmerkungen von Seiten des Autors*. Abgeschlossen werden diese generellen Überlegungen mit einigen Anmerkungen zur Vorstellung über die beschriebenen Prozesse im Sinne neuronaler Repräsentationen.

Ausgangspunkt der Überlegungen hinsichtlich Kaufentscheidungen ist die Konfrontation mit einem Kaufangebot. Dies stellt allgemein gesehen die Information dar, die es zu verarbeiten gilt. Diese Information kann relativ einfach sein, d.h. nur eine oder wenige Komponenten enthalten, sie kann aber genauso gut einen hohen Komplexitätsgrad aufweisen. Kaufentscheidungen stellen i.d.R. Situationen mit hoher Komplexität dar. Zum einen kann die zu verarbeitende Information in mehrere Teilkomponenten zerlegt werden, die jeweils eine eigene bzw. gemeinsame Wirkung entfalten können. Zum anderen kann eine Kaufentscheidung durch mehrere Teilprozesse gekennzeichnet werden. Bspw. besteht ein Kaufangebot grundlegend aus einem Produkt, das zum Kauf angeboten wird, und einem Preis, für den dieses Produkt zu erwerben ist. Als Teilkomponenten des Produktes können z.B. das physische Produkt selbst, der Markenname, die Verpackung oder das Design angesehen werden. In Bezug auf den Preis kann z.B. zwischen dem absoluten Kaufpreis, der Preisendung und einer speziellen Preisetikettierung (Sonderangebot, Preis-Hit, ...) unterschieden werden. Letztendlich können all diejenigen Komponenten von entscheidender Bedeutung sein, die theoretisch in der Lage sind, die Preiswahrnehmung zu beeinflussen. In Bezug auf das operative Marketing werden an dieser Stelle der Modellüberlegungen die Aspekte der *Distribution* und der *Kommunikation* zunächst vernachlässigt und am Ende der Ausführungen eingebaut, da sie bezogen auf das zu erarbeitende Modell

¹⁰⁰¹ vgl. Roth, G. (2009), S. 138 ff.

¹⁰⁰² vgl. Damasio A. R.; Tranel, D.; Damasio H. (1991), S. 219 ff.

vorgelagerte Prozesse darstellen. Sie können in diesem Sinne als Verfeinerungen in Bezug auf die Betrachtung des Modellkerns verstanden werden. Jedes der genannten Teilkomponenten bzw. Elemente stellt ein *potentiell* relevantes Signal dar, das Einfluss auf die letztendliche Entscheidung nehmen kann. Mit potentiell ist gemeint, dass jedes Signal eine Information in sich trägt, aber nicht zwangsweise in den Entscheidungsprozess mit einbezogen werden muss. Aus Gründen der Informationsüberlastung auf der einen und Kapazitätsgrenzen auf der anderen Seite werden nie bzw. fast nie alle vorhandenen Elemente in einem Entscheidungsprozess berücksichtigt. Faktisch gesehen liegen im Rahmen eines Kaufangebotes mehrere Signale in einer bestimmten Ausprägung vor, die eine wie auch immer gerichtete Wirkung auf die Kaufentscheidung entfalten können. Neben der absoluten Ausprägung ist entscheidend, wie die verschiedenen Signale wahrgenommen werden.¹⁰⁰³ Bspw. kann ein Preis absolut gesehen hoch sein, wird er jedoch nicht als hoch wahrgenommen, bringt das andere Konsequenzen mit sich als wenn dieser hoch wahrgenommen wird. Genauso kann ein Sonderangebotssignal positiv wie auch negativ wirken, je nachdem wie es wahrgenommen wird. Folglich entscheidet die Wahrnehmung der verschiedenen Elemente über die nachfolgenden Teilprozesse.

In Bezug auf die Wahrnehmung der Signale kann man logisch gesehen zwei Teilprozesse unterscheiden. Wie bereits erwähnt, ist es nicht zwingend nötig bzw. eher selten der Fall, dass man alle Signale wahrnimmt, um zu einer Entscheidung zu gelangen. Vielmehr verhält es sich so, dass aus Effizienzgründen eine Art Selektionsprozess am Anfang einer jeden Entscheidungssituation steht. Das Zielkriterium für diesen Selektionsprozess lautet *Arousal*. In diesem *ersten Schritt* geht es folglich darum, die vorhandenen Signale in relevante und irrelevante Signale bzw. Informationen zu differenzieren. Grundlegend ist an dieser Stelle, dass Signale unterschiedliche Arousalgrade erzeugen können und zudem auf diesem Kontinuum an einer bestimmten Stelle eine allgemeine Arouschwelle existiert. Jedes Signal, das diese Schwelle überschreitet, gilt als relevant und wird weiterverarbeitet. Diejenigen Signale, die nicht genügend Aufmerksamkeit bzw. Relevanz erzeugen, gelten als weniger wichtig und daher vernachlässigbar. Sie sind nicht entscheidungsrelevant.

Nachdem nun feststeht, welche Signale überhaupt wahrgenommen werden¹⁰⁰⁴, erfolgt in einem *zweiten Schritt* die Bewertung der als entscheidungsrelevant eingestufteten Signale. Im Fokus steht nun die *valenzbezogene Kategorisierung*. Hierbei werden die relevanten Signale über den Abruf von Informationen aus dem Gedächtnis genauer identifiziert und anschließend als positiv oder negativ beurteilt. Als Ergebnis dieser allgemeinen Wahrnehmungsphase besteht i.V.m. jedem relevanten Signal eine gewisse Erwartungshaltung. Als positiv eingestufte Signale versprechen Gewinn

¹⁰⁰³ Hierin kann auch eine zentrale Aufgabe des operativen Marketings gesehen werden. Da in vielen Bereichen mittlerweile technisch bzw. physisch homogene Produkte vorliegen, kann eine Differenzierung fast nur über unterschiedliche Wahrnehmungen erfolgen. Mit Hilfe verschiedener Instrumente des Marketing-Mix wird versucht, die unterschiedlichen Wahrnehmungen positiv zu beeinflussen.

¹⁰⁰⁴ Hierbei sind sowohl bewusste wie auch unbewusste Wahrnehmungen eingeschlossen.

bzw. Belohnung jeglicher Art, als negativ bewertete Signale suggerieren eine Verlust- bzw. Schmerzerwartung.

Abhängig davon wie sich die Situation nach der allgemeinen Wahrnehmungsphase darstellt, ist ein *dritter Schritt* optional möglich. Liegt im Rahmen einer konkreten Entscheidungssituation lediglich ein relevantes Signal vor, so gestaltet sich die Entscheidung sehr einfach. Diese Einfachheit kann aus den zwei generellen Strategien, die die universellen Treiber menschlichen Entscheidens bzw. Handelns beschreiben, abgeleitet werden. Dies sind zum einen die *Gain-Seeking-Strategie* und zum anderen die dazu passende *Loss-Aversion-Strategie*.¹⁰⁰⁵ Geht von dem einzigen entscheidungsrelevanten Signal eine Belohnungsantizipation aus, wird sich eine Person dem Reiz aller Voraussicht nach zuwenden. Folglich trifft die Person im speziellen Fall der Kaufentscheidung die Entscheidung, auf ein Kaufangebot einzugehen. Ergibt sich hingegen eine Verlustantizipation, so wird sich eine Person von dem betreffenden Reiz abwenden bzw. diesen meiden. Im Sinne der Kaufentscheidung lehnt die Person das Kaufangebot in der Konsequenz der negativen Erwartungshaltung ab. Gestaltet sich die Situation hingegen etwas komplizierter, so muss für eine Entscheidung in aller Regel noch ein Abwägungsprozess stattfinden. Dieser dritte Schritt ist theoretisch in Situationen erforderlich, in denen mehrere relevante Signale vorhanden sind, die entgegengesetzte Erwartungen repräsentieren. Dies wäre z.B. der Fall wenn eine als positiv bewertete Marke Teil des Kaufangebots ist und gleichzeitig ein exzessiv hoher Preis für das zu kaufende Produkt gefordert wird. In diesem Fall liegen zwei relevante Signale vor, die beide andere Erwartungshaltungen unterstützen. Es besteht folglich ein Konflikt. Ein weiteres Szenario ergibt sich, wenn eine unterschiedliche Anzahl von Signalen positive und negative Erwartungshaltungen implizieren. Hierbei ist sowohl denkbar, dass sich die Antizipation i.V.m. dem signifikantesten Signal durchsetzt und zu einer bestimmten Entscheidung führt. Genauso besteht die Möglichkeit, dass die einzelnen positiven und negativen Signale zusammengefasst werden und abschließend gegenübergestellt werden, um eine Entscheidung zu finden.¹⁰⁰⁶ Über verschiedene neurowissenschaftliche Studien ist gut belegt, dass Konfliktzentren auf neuronaler Ebene existieren. Dabei handelt es sich um Gehirnregionen, die unter anderem dann eine signifikante Aktivierung zeigen, wenn in sehr unterschiedlichen Situationen im wortwörtlichen wie auch im übertragenden Sinne Konflikte vorliegen, aber auch wenn ein erhöhter kognitiver Aufwand besteht. Als Beispiele können hier der *anteriore cinguläre Cortex* und der *dorsolaterale präfrontale Cortex* angeführt werden.¹⁰⁰⁷ Gut vorstellbar ist, dass solche Konfliktzentren immer dann aktiviert werden, wenn eine weitgehend indifferente Situation bezogen auf das Verhältnis von positiven und negativen Signalen vorliegt. Generell sollte die Aktivierung von Konfliktzentren bzw. das Vorliegen indifferenter Situationen eher seltener ge-

¹⁰⁰⁵ vgl. Kapitel 6.1 Theoretischer Hintergrund

¹⁰⁰⁶ Bereits im Rahmen von *Kapitel 7.1.2 Neuronale Interpretation für den Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal* wurde auf die Erkenntnisse von *Kahneman* und *Tversky* hingewiesen, die herausstellten, dass Menschen Verluste (Loss-Aversion) schwerer gewichten als Gewinne (Gain Seeking). Dies unterstreicht auch die Komplexität i.V.m. möglichen Abwägungsprozessen.

¹⁰⁰⁷ vgl. Kapitel 6.2 Neuronaler Hintergrund; Roth, G. (2009), S. 139 f.

ben sein bzw. sollte der Organismus i.d.R. gut an seine Umwelt angepasst sein, so dass es kaum zu Konflikten kommt. Andernfalls würden die Entscheidungsprozesse zu viel Zeit und Energie kosten. Im Zusammenhang mit Konfliktzentren ist neben einer Aktivierung auch eine Deaktivierung möglich. Dies ist mit einer Situation vergleichbar, in der sich das signifikanteste Signal gegen alle andersgerichteten Signale durchsetzt. Bspw. hat man herausgefunden, dass Lieblingsmarken neben der Erzeugung einer hohen Belohnungserwartung auch in der Lage sind, Zentren mit kognitiven Aufgaben zu deaktivieren. Die Lieblingsmarke, als Element eines Kaufangebotes, dominiert die Wahrnehmung, indem sie eine hohe positive Belohnung verspricht und gleichzeitig negative Aspekte der Kaufentscheidung, die zum kritischen Nachdenken anregen, blockiert.¹⁰⁰⁸ Trotz faktisch negativer Signale kommt es in der Folge dennoch zu einem Kauf. Dieses Phänomen wurde allerdings nur i.V.m. der Lieblingsmarke berichtet und wird als *Winner-Take-All-Effekt*¹⁰⁰⁹ bezeichnet. Starke Marken zahlen generell auf die Belohnungserwartung im Sinne positiv bewerteter Signale ein, blockieren aber keine kognitiven Kontrollzentren.¹⁰¹⁰ Schwache Marken stellen hingegen keine Belohnungserwartung in Aussicht. In diesem Fall wird die Marke gar nicht als relevantes Signal wahrgenommen, es sei denn sie ist stark mit negativen Emotionen aufgeladen.

Die letztendliche Entscheidung, ein Kaufangebot anzunehmen oder dieses abzulehnen, die je nach Situation nach zwei oder drei Teilprozessen getroffen wird, stellt den *vierten Schritt* dar.

Je nach Auslegung des Geltungsbereiches des Modells¹⁰¹¹ muss noch ein *fünfter Schritt* berücksichtigt werden. Dieser Prozess betrifft das Feedback in Bezug auf eine getroffene Entscheidung. Hierbei erfolgt eine Gegenüberstellung der erwarteten Konsequenz mit dem tatsächlich erlebten Ergebnis. Es stellt sich die Frage der Erwartungserfüllung. Dieses Feedback ist unabdingbar für nachfolgende Entscheidungen, denn jede Erfahrung wird im Gedächtnis abgespeichert und fließt insofern mit in die Grundlage für nachfolgende Entscheidungen ein. Nur auf diese Weise ist ein dynamisches umweltangepasstes Verhalten überhaupt möglich. Führt eine konkrete Entscheidung zu nicht erwarteten oder geringeren als den erwarteten Ergebnissen, hat dies insofern Konsequenzen als dass entsprechende Relevanz- bzw. Valenzeinschätzungen im Rahmen nachfolgender Entscheidungen in Bezug auf die gemachte Erfahrung angepasst werden. Neben der Wirkung des Feedbackprozesses auf die Arousal- und Valenzbewertung, ist theoretisch auch eine Korrektur hinsichtlich des Abwägungsprozesses im Fall von Konfliktsituationen vorstellbar.

¹⁰⁰⁸ vgl. Deepe, M. et al. (2005)

¹⁰⁰⁹ vgl. ebenda

¹⁰¹⁰ vgl. McClure, S. M. et al. (2004); Born, C.; Masuch, C.; Pulser, M.; Piccone, S.; Meindl, T.; Mangold, M.; Sander, B.; Reiser, M.; Pöppel, E. (2007)

¹⁰¹¹ Bezieht sich das Modell nur auf *eine konkrete Entscheidungssituation*, dann lässt sich der Entscheidungsprozess minimal als dreistufig und maximal als vierstufig darstellen. Berücksichtigt die eingenommene Perspektive auch *sich wiederholende Entscheidungen*, dann ist auch der 5. Schritt ein relevanter Teilprozess, der sich auf den gesamten Entscheidungsprozess auswirkt.

Da Abbildung 100 primär dazu dient, den komplexen Entscheidungsprozess in seine grundlegenden Teilprozesse zu zerlegen, erfolgt im Sinne der Anschaulichkeit die Darstellung eines sequentiellen Ablaufmodells. Realistischerweise muss man jedoch bedenken, dass diese grundlegenden Prozesse nicht nur für ein Signal durchgeführt werden, sondern dass je nach Situation prinzipiell mehrere Signale parallel verarbeitet und anschließend evtl. noch integriert werden müssen. Zudem könnten sich teilweise auch die einzelnen Teilprozesse überlappen.

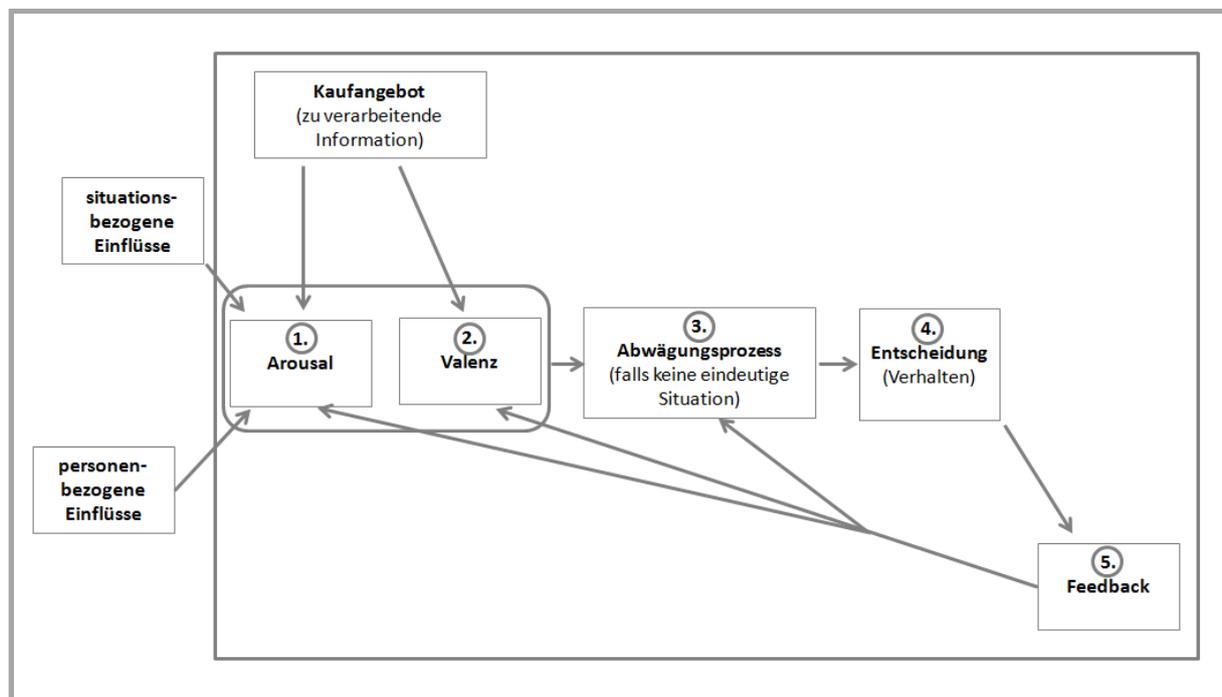


Abbildung 100: Generelle Modellüberlegungen hinsichtlich des Kaufentscheidungsprozesses

Um die theoretische Komplexität von Kaufentscheidungen angemessen darzustellen, fehlt noch eine äußerst relevante Komponente, die bisher noch nicht angesprochen wurde. Es handelt sich hierbei um dem eigentlichen Entscheidungsprozess vorgelagerte Einflussgrößen, die neben den faktischen Signalen selbst mit dafür verantwortlich sind, welche Bedeutung bzw. Relevanz den einzelnen Signalen beigemessen wird. Sie können die, weiter oben als zentrales Element herausgestellte, Wahrnehmung der einzelnen Signale stark beeinflussen. In Bezug auf Abbildung 100 gilt es folglich noch den letzten Baustein in Form der Berücksichtigung *personenbedingter* und *situationsbedingter Einflussfaktoren* zu thematisieren.

Zu den personenbedingten Faktoren kann alles gezählt werden, was theoretisch einen Einfluss auf die wahrnehmungsbezogene Auswahl der, in einer Situation vorhandenen, Signale hat und direkt mit Eigenschaften der betreffenden Person zusammenhängt. Es kann bspw. entscheidungsrelevant sein, in welcher Stimmung sich die betreffende Person befindet. Nach dem Konzept der *mood congruity*¹⁰¹² kann eine positive Grundstimmung die Fokussierung auf positive Signale einer Entscheidungssituation nach sich ziehen, während negative Signale ausgeblendet werden. Selbiges gilt für den umgekehrten Fall. Auch Vorwissen, z.B. durch Werbung oder

¹⁰¹² vgl. Bower, G. H. (1981)

eigene Recherchen, persönliches Involvement, Preis- und Markenbewusstsein, Einkaufshäufigkeit, Käufertyp und finanzielle Mittel stellen Einflussfaktoren dar, die den Fokus der Wahrnehmung auf bestimmte Signale richten können und insofern in der Lage sind, das mit ihnen verbundene Arousal je nach vorliegender Eigenschaftsausprägung zu verändern.

In Bezug auf die Situation kann es generell einen Unterschied machen, durch welchen speziellen Kauftyp eine konkrete Kaufentscheidung charakterisiert ist. So liegt das Augenmerk bei impulsiven Käufen auf anderen Signalen als im Rahmen von habitualisierten oder extensiven Käufen. Denkbar ist auch, dass der Vertriebsort bzw. die Vertriebsart eine unterschiedliche Wahrnehmung von Signalen mit sich bringt. So ist man bspw. beim Einkauf in einem Outlet-Center i.d.R. weniger auf den absoluten Preis fixiert, als wenn man in einem regulären Store Kaufentscheidungen treffen muss. I.V.m. Outlet-Centern geht man generell von einem geringeren Preisniveau aus und achtet daher weniger auf die absoluten Preise. Der Preis ist zwar unter anderem ein Grund für das Besuchen von Outlet-Centern, aber in den konkreten Kaufentscheidungen wird diesem Signal weniger Beachtung geschenkt als im Rahmen einer regulären Kaufentscheidung. Auch der Zeitfaktor kann eine Kaufentscheidung signifikant einrahmen.

Festgehalten werden kann zunächst einmal, dass die angeführten Überlegungen nicht erschöpfend sind. Sie sind allerdings gut dazu geeignet, die generelle Komplexität von Kaufentscheidungen abzubilden. Theoretisch besteht eine relativ große Zahl von potenziellen Signalen. Zudem besteht der Entscheidungsprozess aus mehreren partiell rückgekoppelten Teilprozessen, die sowohl parallel wie auch sequentiell ablaufen können. Im Rahmen jedes Teilprozesses können überdies sowohl unbewusste wie auch bewusste Komponenten beteiligt sein. Des Weiteren existiert in Bezug auf vorgelagerte Prozesse eine große Bandbreite an möglichen Einflussfaktoren, die entscheidungsrelevant sein können. Letztendlich sind ohne ihre Berücksichtigung keine gehaltvollen handlungstheoretischen Interpretationen von Kaufentscheidungen im Speziellen und Entscheidungen im Allgemeinen möglich. Dies gilt nicht nur im Zusammenhang mit neurowissenschaftlicher Forschung, sondern allgemein in Bezug auf jegliche Art von Forschung. Im Endeffekt ist die Erklärung einer Entscheidung bzw. die Herausstellung der Wirkung oder Nicht-Wirkung eines speziellen Signals nur vor dem Hintergrund der Situation möglich, in die es eingebettet ist.

Nachdem die grobe Zerlegung des Entscheidungsprozesses in Teilprozesse und unterschiedliche Signale erfolgt ist, geht es abschließend darum, einen konkreteren Bezug zur neuronalen Ebene zu knüpfen. In diesem Sinne ist es angebracht, kurz einige Gedanken hinsichtlich neuronaler Repräsentationen auszuführen.

Im Rahmen einiger wissenschaftlicher Vorträge begegnet man dem Entscheidungsprozess auf neuronaler Ebene in Form eines stark vereinfachten Kausalmodells, wie Abbildung 101 zu entnehmen ist. Hiernach repräsentiert die *Insula* alle negativen Einflüsse im Sinne einer Verlustantizipation und der *Nucleus accumbens* alle positiven Aspekte einer Kaufentscheidung im Sinne einer Belohnungsantizipation. Zwischen beiden vermittelt der *anteriore cinguläre Cortex* als Konfliktzentrum und im

medialen präfrontalen Cortex wird dann die Entscheidung getroffen bzw. das entsprechende Verhalten ausgelöst (Exekutionskontrolle).

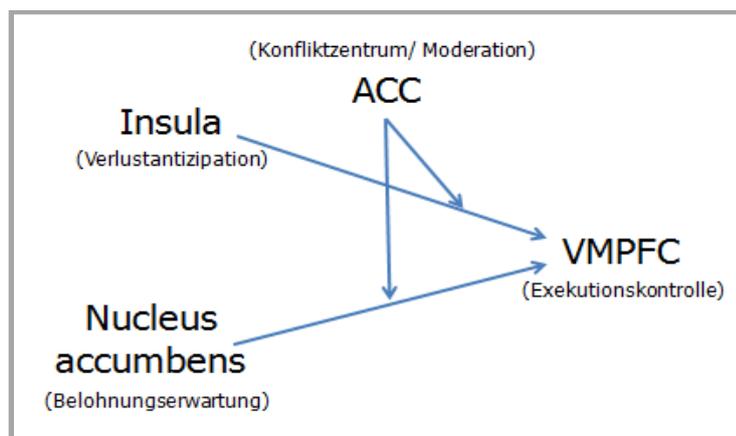


Abbildung 101: Zu stark vereinfachtes Modell hinsichtlich einer neurophysiologischen Erklärung von Kaufentscheidungen

Die beschriebene Vorstellung kann aus verschiedenen Gründen kritisch betrachtet werden. Zum einen wurde bereits im Rahmen der neuronalen Interpretation ausführlich die Bedeutung der anterioren Insula hergeleitet und im Ergebnis generell eine Valenzunabhängigkeit argumentiert. Insofern ist schon an dieser Stelle die Bedeutung einer der vier Komponenten des Modells generell fraglich. Zum anderen wurde ebenfalls der Gedanke einer Kombination von parallelen und sequentiellen Prozessen und auch ein Rückkopplungseffekt angesprochen. Dies wird in Abbildung 101 nicht berücksichtigt. *Singer* führt als Argument gegen diese einfache Struktur i.V.m. Entscheidungsprozessen das *Bindungsproblem* an: „Das Bindungsproblem resultiert aus der distributiven Organisation des Gehirns und dem Fehlen eines singulären Koordinationszentrums. Die Ergebnisse der vielen, gleichzeitig ablaufenden Sinnesfunktionen werden parallel an die ebenfalls zahlreichen exekutiven Zentren weitergegeben, ohne dass vorher alle Informationen an einem Ort zusammengeführt würden.“¹⁰¹³ „Es gibt keinen Ort an dem alles zusammenläuft und interpretiert wird, wo entschieden und geplant wird, wo der Homunculus zu finden wäre, der „Ich“ sagt. Vielmehr finden wir eine Fülle verschiedener Areale, die alle nur bestimmte Teilfunktionen erfüllen und aufs engste miteinander vernetzt sind.“¹⁰¹⁴

Genau wie die generellen Überlegungen zum Entscheidungsprozess dienen auch die Argumente zur neuronalen Repräsentation dazu, die Situation realistisch darzustellen. Dies bedeutet im konkreten Fall von Kaufentscheidungen, die Komplexität aus verschiedenen Perspektiven abzubilden. Es ist nicht davon auszugehen, dass lediglich vier fixe Gehirnareale an Kaufentscheidungsprozessen beteiligt sind. Realistischer ist die Vorstellung, dass mehrere Gehirnareale in die verschiedenen Teilprozesse involviert sind. *Singer* ist der Überzeugung, dass es keine statischen Kontrollzentren gibt, sondern dass sich die einzelnen Prozesse vielmehr dynamisch gestalten.

¹⁰¹³ *Singer*, W. (2003), S. 42

¹⁰¹⁴ ebenda, S. 41

7.2.2 Handlungstheoretische Interpretation des Kontrastes SA-Signal vs. kein SA-Signal

Nachdem die Ausgangssituation bezüglich einer handlungstheoretischen Interpretation anschaulich dargelegt wurde, geht es in einem letzten Schritt darum, die vorliegende fMRT-Untersuchung in Bezug auf die handlungstheoretische Ebene zu interpretieren. Aus diesem Grund wird das Augenmerk zunächst kurz auf die Aussagekraft von isolierten Kontrasten gelenkt und anschließend auf den im Fokus stehenden *Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal* gerichtet.

Da sich die fMRT-Ergebnisse immer auf einen konkreten Kontrast beziehen, liegt eine begrenzte Aussagekraft in Bezug auf die handlungstheoretische Interpretation vor. Lassen sich signifikante Aktivierungen im Sinne isolierter Effekte verzeichnen, sind sie lediglich in der Lage, Komponenten spezieller Teilprozesse abzubilden. Insofern kann man sie auch als eindimensionale Informationen in einer mehrdimensionalen Entscheidungssituation verstehen.

Beim betrachteten Kontrast fällt es schwer, etwas über die neuronale Interpretation Hinausgehendes, allein aus der Aktivierung der anterioren Insula, abzuleiten. Dies liegt unter anderem daran, dass der *Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal* einen sehr allgemeinen Kontrast in Bezug auf die Wirkung von Sonderangebotssignalen darstellt. Generell unterscheiden sich die Stimuli der beiden Bedingungen nur dadurch, dass bei den Kaufangeboten der einen Bedingung ein SA-Signal eingeblendet ist und in der anderen Bedingung nicht. Alle anderen Stimuluskomponenten sind in den beiden Bedingungen vergleichbar, d.h. in beiden Bedingungen sind alle Preise, alle Produktmengen und sowohl gekaufte wie auch nicht gekaufte Angebote enthalten. In diesem Sinne zeigt das Ergebnis eine robuste, weil über mehrere Komponenten aggregierte, Aktivierung für den Fall, dass ein Sonderangebotssignal in einem Angebot enthalten ist. Dennoch kann unter anderem aufgrund der Aggregation der verschiedenen Komponenten innerhalb des allgemeinen Kontrastes nicht konkret auf eine verhaltensbezogene Ebene geschlossen werden. Im speziellen Fall des betrachteten Kontrastes kommt hinzu, dass es um die generelle Wirkung eines Sonderangebotssignals geht und der konkrete Verhaltensbezug nicht im Vordergrund steht.

Die zuvor beschriebenen Sachverhalte, die die Komplexität einer Handlung bzw. Entscheidung aus verschiedenen Perspektiven darstellen, und auch das Bewusstsein über die Einschränkungen i.V.m. fMRT-Kontrasten machen deutlich, dass man mit *einzelnen fMRT-Ergebnissen alleine* nur wenig plausibel zu einer handlungstheoretischen Interpretation beitragen kann. Generell sind zwei Strategien erwägenswert, um die Ausgangslage in Bezug auf die handlungstheoretische Interpretation allgemein zu verbessern. Wie bereits erörtert, stellen Kaufentscheidungen einen komplexen Prozess dar. Sonderangebotssignale repräsentieren nur einen Teil bzw. ein Signal im Rahmen dieses komplexen Prozesses. Was würde es bspw. bedeuten, wenn sich im Zuge einer fMRT-Untersuchung ergibt, dass SA-Signale positive Emotionen erzeugen? Generell könnte in diesem Fall gefolgert werden, dass durch die positiven Emotionen i.V.m. einem SA-Signal die Wahrscheinlichkeit steigt, dass ein Kaufange-

bot angenommen wird. Besagte positive Emotionen können Kaufentscheidungen beeinflussen, müssen dies aber nicht. *Spezifische Kontraste*¹⁰¹⁵ innerhalb einer Untersuchung können dabei behilflich sein, genauere Aussagen zu treffen. Damit sind Kontraste gemeint, die eine Kombination von Ausprägungen verschiedener Komponenten abbilden und im Vergleich zum *Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal* weniger allgemein sind. Interessante Kontraste im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sind z.B. der Kontrast *gekauft + SA-Signal vs. gekauft + kein SA-Signal* oder auch der Kontrast *günstiger Preis + SA-Signal vs. teurer Preis + SA-Signal*. Diese und andere spezifischen Kontraste wurden zwar betrachtet, ergaben allerdings jeweils keine signifikanten Aktivierungen bzw. Deaktivierungen. Der Grund hierfür ist vor allem in der geringen Anzahl von Stimuli für die verglichenen Bedingungen zu sehen.¹⁰¹⁶ Aufgrund des insgesamt komplexen Designs (2x3x2) bleiben am Ende nicht genug Beobachtungen, um Unterschiede hinsichtlich der zu vergleichenden Bedingungen im Rahmen der spezifischen Kontraste herauszustellen. Da die Analyse im Rahmen der fMRT auf der Subtraktionslogik basiert¹⁰¹⁷, ist man auf die Arbeit mit isolierten Effekten angewiesen. Dies bedingt, dass man i.d.R. mit einfachen Designs arbeitet. Die zweite Strategie bezieht sich anders als die Erstgenannte nicht nur auf eine konkrete fMRT-Untersuchung, sondern versucht die Ergebnisse eines *Bündels von Untersuchungen* zusammenzuführen, um eine Brücke zur Verhaltensebene zu schlagen. Hierbei gilt es zunächst den relevanten Gesamtprozess aufzuteilen, um dann systematisch die einzelnen Teilprozesse bzw. Einflussmöglichkeiten über mehrere Studien und verschiedene isolierte Kontraste zu analysieren. Ziel dieser Vorgehensweise ist es, die einzelnen Teilerkenntnisse zu verbinden, um auf diese Weise eine handlungstheoretische Interpretation vornehmen zu können. Da die vorliegende Untersuchung nicht Teil eines Bündels zusammenhängender Untersuchungen ist, hilft hier auch diese Strategie nicht weiter.

Wie im vorliegenden Fall kann es durchaus möglich sein, dass hinsichtlich des Versuchs einer handlungstheoretischen Interpretation weder die erste noch die zweitgenannte Strategie realisierbare Optionen darstellen. Sieht man eine einzelne fMRT-Untersuchung allerdings als Ganzes, so besteht oftmals die Möglichkeit, das Ergebnis der neuronalen Interpretation mit weiteren Daten zu verknüpfen. Im Zuge einer Untersuchung werden i.d.R. neben den fMRT-Daten noch zusätzliche Daten generiert, auf die man anschließend zurückgreifen kann. Bspw. werden i.V.m. Aufgabenstellungen, z.B. kaufen und nicht kaufen, auch entsprechende Verhaltensdaten im Verlauf der fMRT-Untersuchung erzeugt. Des Weiteren können im Anschluss an die Untersuchung noch abschließende Befragungen durchgeführt werden. Für die vorliegende Untersuchung liegen derartige *Verhaltensdaten* vor¹⁰¹⁸. Es wurde protokolliert, welche Kaufangebote gekauft bzw. angenommen wurden und welche Angebote

¹⁰¹⁵ im Sinne von Interaktionseffekten

¹⁰¹⁶ vgl. Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

¹⁰¹⁷ vgl. Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

¹⁰¹⁸ vgl. Kapitel 6.5.2 Verhaltensdaten

abgelehnt wurden. Zusätzlich wurden auch die jeweiligen Reaktionszeiten festgehalten.

Betrachtet man die Sonderangebote, die nur ein *einzelnes Produkt* zum Gegenstand hatten, in den drei Preisstufen separat, so kann zunächst berichtet werden, dass bei einem günstigen Preis 69,7%, bei einem normalen Preis 31,8% und bei einem teuren Preis 15,8% der Angebote ausgewählt wurden. Vergleicht man nun die prozentualen Käufe innerhalb der drei Kategorien mit den korrespondierenden regulären Angeboten, so kann nur i.V.m. einem günstigen Preis ein positiver Effekt festgestellt werden (egS vs. egN: +8%). Für Angebote mit einem normalen oder teuren Preis gilt dies nicht. Hier liegt ein negativer Effekt vor. Prozentual gesehen werden weniger Käufe getätigt als wenn es sich um ein reguläres Kaufangebot handelt (ca. -6,5%). Probanden durchschauen bei Einzelproduktangeboten anscheinend eher, wenn das Sonderangebotssignal und der Preis nicht korrespondieren. Bei Einblendung des Sonderangebotssignals haben die Probanden zudem anscheinend etwas genauer hingeschaut, was sich in generell höheren Response-Zeiten niederschlägt.

Bei den Kaufangeboten in denen *mehr als ein Produkt* dargeboten wurde, ist es den Probanden schwerer gefallen bzw. etwas seltener gelungen, eine *gute* Entscheidung zu treffen. Dies ist dadurch zu erklären, dass man den Preis nicht mehr nur in Relation zu einem Produkt setzen muss, sondern prinzipiell in Relation zu zwei, drei oder vier Produkten. Dieser Vorgang gestaltet sich definitiv schwieriger bzw. bringt mehr Arbeitsaufwand mit sich¹⁰¹⁹, was sich auch in den Response-Zeiten zeigt. In allen drei Preisstufen werden bei den Kaufangeboten mit mehreren Produkten und Sonderangebotssignal ca. 2% mehr Angebote *gekauft* als bei Angeboten ohne Sonderangebotssignal. Allerdings steht dies nur in der Kategorie mit dem günstigen Preis für eine gute Entscheidung. In den beiden anderen Preiskategorien werden demnach im Schnitt etwas öfter *schlechte Angebote* angenommen. Dies liegt daran, dass das Angebot nun schwerer zu durchschauen ist. In dieser Situation ist es schwieriger, Preis und Produktmenge in Beziehung zu setzen. Im Schnitt treffen die Probanden in diesen beiden Kategorien etwas schneller eine Entscheidung, wenn ein Sonderangebotssignal vorhanden ist. Dies spricht auch dafür, dass das jeweilige Kaufangebot in diesen Kategorien schwer einzuschätzen ist und daher an einem bestimmten Punkt zum Teil auf das Sonderangebotssignal bzw. das damit verbundene Bauchgefühl *gehört* wird, weshalb die Reaktionszeit in diesen beiden Kategorien etwas kürzer ist als in den vergleichbaren Kategorien ohne Sonderangebotssignal. Einzeln betrachtet werden im Rahmen der Produktpaketsituation bei einem günstigen Preis 59,8%, bei einem normalen Preis 36,8% und bei einem teuren Preis 18,2% aller Sonderangebote gekauft.

Insgesamt wurden durchschnittlich ca. 39% aller Angebote mit Sonderangebotssignal gekauft, hingegen in ca. 61% der Fälle ein solches Kaufangebot abgelehnt. Die Mehrheit der Ereignisse in denen ein Sonderangebotssignal präsent war, wurde folglich nicht gekauft. Zunächst entsteht der Eindruck, dass eine negative Wirkung von Sonderangebotssignalen ausgeht. Dieser Eindruck kann allerdings revidiert werden,

¹⁰¹⁹ vgl. Kapitel 6.6 Interpretation

wenn man bedenkt, dass auch im Rahmen der regulären Kaufangebote ein fast identisches Verhältnis vorliegt.

Zusammenfassend kann für die Verhaltensdaten festgehalten werden, dass ein Sonderangebotssignal in der Einzelproduktsituation nur i.V.m. einem günstigen, also korrespondierenden, Preis zu einer höheren Kaufrate führt. Die Probanden durchschauen diese Entscheidungssituation besser als innerhalb der Produktpaketsituation und treffen somit bessere Entscheidungen. Dies zeigt sich auch darin, dass im Falle von Einzelproduktangeboten bei normalen und teuren Preisen weniger Sonderangebote als reguläre Angebote gekauft wurden. Im Rahmen der Produktpaketsituation, in der sich die Entscheidungssituation allgemein unübersichtlicher gestaltet, werden die Kaufangebote schlechter als das erkannt was sie sind. Daher werden im Vergleich zur Einzelproduktsituation deutlich weniger Sonderangebote mit einem günstigen Preis ausgewählt (-9,9%) und mehr Sonderangebote gekauft, wenn sie mit einem normalen (+5%) oder teuren Preis (+2,5%) verbunden sind. Insgesamt werden im Zusammenhang mit Produktpaketen häufiger schlechte Entscheidungen getroffen. In Bezug zur handlungstheoretischen Interpretation kann herausgestellt werden, dass sich die Kaufwahrscheinlichkeit durch die Verwendung von Sonderangebotsignalen erhöht, insofern in transparenten Kaufsituationen (ein Preis i.V.m. einem Produkt) mit einem günstigen, also zum Signal passenden, Preis gearbeitet wird. Im Rahmen von intransparenten Situationen (ein Preis i.V.m. mehreren Produkten) werden öfter schlechte Entscheidungen getroffen. Werden Produktpaketangebote mit Sonderangebotssignalen versehen, steigt hier generell die Kaufwahrscheinlichkeit.

8 Fazit

Mit der vorliegenden Arbeit wurde das allgemeine Ziel bestehend aus einem tieferen Verständnis hinsichtlich der funktionellen Magnetresonanztomographie (fMRT) und ihrer Anwendung im Bereich des Marketings verfolgt. Als übergeordnetes Ziel kann in diesem Zusammenhang die Herausstellung der Leistungsfähigkeit der fMRT angesehen werden.

Im Sinne der allgemeinen Zielerreichung sollte durch die ausführliche Bearbeitung der unterschiedlichen Sachverhalte im Rahmen der Kapitel 2 bis 7 das Verfahren der fMRT ganzheitlich abgebildet werden, um die Transparenz in Bezug auf diesen schwer zugänglichen Bereich zu erhöhen. Insofern stellen die bisherigen Ausführungen die Basis für die Auseinandersetzung mit dem übergeordneten Ziel dar. Dieses gilt es über die Darstellung der eigenen Position zu erreichen. Im Zuge der Einleitung wurde bereits auf das Spannungsfeld hinsichtlich der Beurteilung der fMRT hingewiesen. Da sich die eigene Position aus den Stellungnahmen zu den einzelnen Positionen ableiten lässt, wird in Kapitel 8.1 auf die vier Positionen des Spannungsfeldes eingegangen. Anschließend wird in Kapitel 8.2 die eigene Position explizit dargestellt und ein kurzer Ausblick gegeben.

8.1 Stellungnahme zum Spannungsfeld

8.1.1 Anmerkungen zum Gedankenlesen

Die positivste Position hinsichtlich der Aussagekraft der fMRT stellt in Aussicht, dass man mittels der Ergebnisse von fMRT-Untersuchungen in der Lage ist bzw. in naher Zukunft in der Lage sein wird, Gedanken zu lesen. Die Möglichkeit des Gedankenlesens wird hierbei zum einen mit Studien verbunden, die sich inhaltlich auf verschiedene mentale Prozesse beziehen. Zum anderen erscheint die Idee des Gedankenlesens über die Darstellung von Studien realer, die durch eine Kombination von fMRT-Daten und spezieller lernfähiger Mustererkennungssoftware eine erstaunliche Leistungsfähigkeit zeigen. Im Zuge der Einleitung wurde bereits kurz auf einige Studienergebnisse eingegangen, die als Grundlage für die beschriebene Position herangezogen werden. Im Zuge dieser Stellungnahme gilt es zunächst, die genannten Studien etwas genauer zu betrachten, um anschließend ein Fazit in Bezug auf ihre Aussagekraft zu ziehen. Im Anschluss an die Ausführungen zu den einzelnen Studien werden noch weitere Aspekte hinsichtlich der Möglichkeit des Gedankenlesens aufgegriffen.

*O'Craven & Kanwisher*¹⁰²⁰ untersuchten ursprünglich, ob sich die Gehirnaktivierungen im Zusammenhang mit Vorstellungen (imagery) von denjenigen unterscheiden, die sich bei der konkreten Betrachtung (perception) ergeben. Um dies herauszustellen, wurden die Probanden zum einen mit Bildern verschiedener bekannter Gesichter konfrontiert. Zum anderen wurden ihnen Bilder von unterschiedlichen Plätzen auf

¹⁰²⁰ vgl. O'Craven, K. M.; Kanwisher, N. (2000)

ihrem Unicampus gezeigt. Die beiden relevanten Stimuluskategorien waren folglich Gesichter und Orte. Im Sinne des Untersuchungsziels wurde die Gehirnaktivität sowohl aufgezeichnet, wenn die einzelnen Bilder präsentiert wurden als auch wenn die Probanden aufgefordert wurden, sich an die einzelnen Gesichter und Orte zu erinnern. Im Ergebnis konnte herausgestellt werden, dass für die Verarbeitung von Gesichtern eine andere Gehirnregion (fusiform face area bzw. FFA) zuständig ist als für die Verarbeitung von Orten (parahippocampal place area bzw. PPA). Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Aktivierungsstärke in den kategoriebezogenen Gehirnarealen (FFA und PPA) bei der konkreten Betrachtung stärker war als im Fall des Erinnerns.

Zusätzlich gelang im Rahmen einer ergänzenden Untersuchung in 85% der Fälle ohne Kenntnis der Stimuluskategorie („*a data coder blind to the order of the items*“¹⁰²¹) allein auf Basis der erzeugten fMRT-Daten eine korrekte Zuordnung der individuellen Vorstellungsdurchgänge zu einer der beiden Stimuluskategorien. Die Autoren beschreiben die Bedeutung des letzten Ergebnisses folgendermaßen: „*Our data is the first to show that the content of a single thought can be inferred from its fMRI signature alone. This finding demonstrates (...) the surprisingly clear correspondence between the fMRI signal on a particular trial and the internal mental event that occurred on that same trial.*“¹⁰²² Dieses Ergebnis ist in Bezug auf die Position des Gedankenlesens von Interesse, da es zum einen inhaltlich um die Möglichkeit der Unterscheidung zwischen zwei Vorstellungsinhalten (Gesichter vs. Orte) geht. Zum anderen wird in Aussicht gestellt, dass diese Differenzierung über die Betrachtung der Aktivierungsdaten möglich ist.

Ist damit das Tor zum Gedankenlesen aufgestoßen? Normalerweise werden die Aktivierungsdaten der unterschiedlichen Bedingungen aufgrund der schwachen Signale über mehrere Messdurchgänge erfasst. Die Probanden werden daher im Laufe eines Experiments wiederholt mit Stimuli derselben Kategorie konfrontiert (multitrial event-related fMRI).¹⁰²³ Das letzte Ergebnis zeigt, dass auch die Analyse im Zusammenhang mit einzelnen Stimuli (single-trial fMRI) gelingt. Die Aktivierungen in der FFA und PPA können auch für einzelne Events relativ zuverlässig mit den beiden Kategorien verbunden werden. Dies ist positiv zu bewerten, da es generell die Güte von fMRT-Daten stärkt. Auf die Möglichkeit des Gedankenlesens kann aufgrund dieses Ergebnisses allerdings nicht geschlossen werden. Die Untersuchung von O’Craven & Kanwisher beinhaltet zwei Studien. In der ersten Studie ging es um die Herausstellung der generellen Aktivierungen hinsichtlich der beiden Stimuluskategorien und hinsichtlich der Betrachtung und der Vorstellung der beiden Kategorien. Das Ergebnis von besonderem Interesse für den Aspekt des Gedankenlesens ist auf eine zusätzliche Untersuchung zurückzuführen, an der jedoch nicht alle ursprünglichen Versuchspersonen teilnahmen. Lediglich drei Probanden aus der ursprünglichen Stichprobe wurden betrachtet. Bei den drei Personen handelte es sich um diejenigen, die im Zuge der ursprünglichen Untersuchung die stärksten Aktivierungen im Zusam-

¹⁰²¹ O’Craven, K. M.; Kanwisher, N. (2000), S. 1017

¹⁰²² ebenda, S. 1019

¹⁰²³ vgl. Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

menhang mit den beiden Vorstellungsbedingungen aufwiesen. Im Zuge der zweiten Untersuchung sollten sie sich erneut verschiedene Ort und Gesichter vorstellen. Dieses Mal ging es zwar um andere Gesichter und Orte, doch für diese drei Personen waren bereits im Rahmen der ersten Untersuchung hohe Aktivierungswerte in den stimuluskorrespondierenden Gehirnregionen (FFA und PPA) festgestellt worden. Wenn die fMRT-Daten eine gewisse Reliabilität aufweisen, sollte es möglich sein, die Ergebnisse aus der ersten Untersuchung durch die Ergebnisse in der zweiten Untersuchung zu replizieren. Warum sollten die drei Probanden mit den höchsten Aktivierungsdaten aus der ersten Untersuchung nicht erneut dieselben Aktivierungen in Bezug auf dieselbe Aufgabenstellung im Rahmen der zweiten Untersuchung zeigen? Im nicht überraschenden Ergebnis konnte in 85% der Fälle ein Event über die Betrachtung der Aktivierung in der FFA und der PPA der passenden Stimuluskategorie zugeordnet werden. Im Ergebnis kommt eine gewisse Reliabilität zum Ausdruck, es wird allerdings auch deutlich, dass trotz der fast optimalen Ausgangssituation (dieselben Probanden, dieselbe Aufgabe, allerdings nicht die identischen Stimuli) nicht von einer perfekten Beziehung zwischen neuronalen Aktivierungsdaten und zugrundeliegendem Prozess ausgegangen werden kann. Die Stimuluskategorie konnte zwar sehr oft richtig bestimmt werden, allerdings nicht in allen Fällen. Es wurden nur die Probanden herangezogen, die im Vorfeld der zweiten Untersuchung die höchsten Aktivierungen zeigten. Dennoch gelingt eine korrekte Differenzierung zwischen der Vorstellung von Gesichtern und Orten nur in 85% der Fälle. Angemerkt sei an dieser Stelle auch, dass es sich bei der Unterscheidung der beiden Kategorien um relativ allgemeine Kategorien handelt, die sich inhaltlich gut voneinander unterscheiden lassen. Des Weiteren ist die FFA, eine der wenigen wenn nicht sogar die einzige Gehirnregion, die eine spezifische Objektverarbeitung (Verarbeitung von Gesichtern) repräsentiert. Das Ergebnis bringt zwar die starke Verbindung zwischen über die fMRT gewonnenen Gehirnaktivierungen und den zugrunde liegenden Prozessen zum Ausdruck, doch als ein Beispiel für das Lesen von Gedanken sollte dieses Ergebnis nicht angeführt werden.

In einer weiteren fMRT-Studie setzten sich *Baumgartner et al.*¹⁰²⁴ mit der neuronalen Grundlage des Haltens und Brechens eines bereits gegebenen Versprechens auseinander. Um die Fragestellung zu erörtern, nahmen die Probanden an einem Vertrauensspiel teil. Hierbei gab es einen Investor, der das ihm zur Verfügung stehende Geld (zwei Geldeinheiten) bei einem Vermögensverwalter investieren konnte, und einen Vermögensverwalter, der dem Investor im Vorfeld ein Versprechen hinsichtlich einer Auszahlung gab und nach Erhalt des Investitionsbetrags entweder sein Versprechen halten oder brechen konnte. Vertraut der Investor seine zwei GE dem Verwalter an, so wird der investierte Betrag verfünffacht (10 GE). Der Verwalter muss im Vorfeld einer Investition das Versprechen geben, diesen Betrag mit dem Investor zu teilen (5 GE: 5 GE). Im Rahmen des Versprechens gibt der Verwalter auch an, wie sehr er sich an die geregelte Auszahlung also sein Versprechen halten will (immer, meistens, manchmal, nie). Hierbei ist die eigene Einschätzung des Vermögensver-

¹⁰²⁴ vgl. Baumgartner, T. et al. (2009)

walters dafür ausschlaggebend, ob investiert wird. Nachdem der Verwalter im Falle einer Investition 10 GE erhalten hatte, stellte sich für ihn die Frage des Haltens (5 GE: 5 GE) oder des Brechens seines Versprechens (0 GE: 10 GE) gegenüber dem Investor. Im Zuge dieses fMRT-Experiments waren nur die Aktivierungen des Vermögensverwalters interessant. Daher ergaben sich als Bedingungen folgende drei Phasen: der Proband macht in seiner Rolle als Vermögensverwalter ein Versprechen (Phase des Versprechens), der Proband antizipiert, inwiefern das eigene Versprechen das Vertrauen des Investors nach sich zieht (Phase der Antizipation) und der Proband entscheidet, ob er sich an sein Versprechen hält oder ob er es bricht (Phase der Entscheidung). Die Entscheidung des Probanden kommt durch die Auszahlung zum Ausdruck. Im Fokus der Untersuchung stand nun die Frage, ob es anhand der Aktivierungsmuster innerhalb der Versprechens- oder der Antizipationsphase möglich ist, ehrliche Vermögensverwalter von Betrüger zu unterscheiden. Auf der Verhaltensebene im Zuge der Versprechensphase unterschieden sich die Betrüger von den ehrlichen Probanden nicht, da beide dasselbe Versprechen mit einer hohen Selbsteinschätzung gaben. In Bezug auf die zentrale Fragestellung konnte allerdings herausgestellt werden, dass das Brechen des Versprechens durch ein spezielles Aktivierungsmuster (anteriore Insula, ACC, inferiorer frontaler Gyrus) während der Phase des Versprechens und der Antizipation vorhergesagt werden konnte. Dieses Ergebnis unterstützt die Relevanz von Aktivierungsdaten, geht es doch generell um das Verstehen und Erklären von Verhalten. Verhaltensdaten im Vorfeld der Entscheidung alleine zeigten keinen Anhaltspunkt hinsichtlich der Entlarvung eines Betrügers. Das beschriebene Aktivierungsmuster ist hingegen in der Lage, negative Intentionen im Vorfeld einer wortbrechenden Handlung zu detektieren.

Doch kann mit Hilfe dieser fMRT-Studie und seines Ergebnisses auf die Möglichkeit des Gedankenlesens geschlossen werden? Generell kann festgehalten werden, dass im Rahmen dieser Untersuchung keine Prognose berechnet wurde. Für die Aufdeckung der Gehirnaktivierungsdaten war die Kategorisierung in ehrliche und unehrliche Vermögensverwalter durch deren Handlung zentral. Baumgartner et al. haben nicht die ehrlichen und unehrlichen Probanden durch die Aktivierungsdaten identifiziert, was einer Prognose gleichen würde. Es konnten zwar neuronale Unterschiede herausgestellt werden, doch für die Generierung dieses Ergebnisses war die vorherige Kenntnis, ob ein Proband sein Versprechen gehalten oder es gebrochen hatte, unabdingbar. Im Endeffekt haben sie auf Basis des in der Entscheidungsphase gezeigten Verhaltens untersucht, ob beide Gruppen unterschiedliche Gehirnaktivierungen aufweisen. Des Weiteren kann nicht mit Gewissheit gesagt werden, dass alle unehrlichen Probanden dasselbe Aktivierungsmuster zeigen, da im Zusammenhang mit der statistischen Gruppenanalyse die Aktivierungen als signifikant ausgegeben werden, die über die meisten Probanden stabil sind. Letztlich ist das Ergebnis dieser fMRT-Untersuchung zwar durchaus interessant, doch auch hier kann aufgrund der Ergebnisse nicht auf das Phänomen des Gedankenlesens geschlossen werden.

Haynes et al.¹⁰²⁵ beschäftigten sich mit der Frage, ob man Intentionen im Sinne verborgener Handlungsabsichten durch Aktivierungsmuster im Gehirn abbilden kann. Im Zuge eines fMRT-Experiments sollten sich Personen diesbezüglich dafür entscheiden, ob sie nachfolgend eingeblendete Zahlen addieren oder subtrahieren. Sie sollten frei zwischen diesen zwei möglichen Aufgaben wählen, also eine Handlungsabsicht fassen. Ihre Handlungsabsicht sollten sie jedoch nicht äußern. Erst nach einer kurzen zeitlichen Verzögerung wurden zwei Zahlen präsentiert, die es je nach ihrer Intention entweder zu addieren oder zu subtrahieren galt. Um ihrer Entscheidung bzw. Handlung und damit auch ihrer Intention Ausdruck zu verleihen, sollten sie einen von vier Ergebniswerten (Addition korrekt, Subtraktion korrekt, zwei falsche Ergebnisse) auswählen. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass vor allem durch Gehirnaktivierungen im medialen Bereich des präfrontalen Cortex im Verlaufe der zeitlichen Verzögerung darauf geschlossen werden konnte, dass eine Versuchsperson eine Absicht hinsichtlich einer der beiden zur Auswahl stehenden Aufgaben gefasst hatte. Zur Erreichung des Ergebnisses wurde mit einem Mustererkennungsverfahren gearbeitet. Durch dieses Verfahren konnten den beiden Auswahloptionen unterschiedliche räumliche Aktivierungsmuster zugeordnet werden, was letztlich dazu führte, dass in ca. 70% der Fälle die Intention zur Addition oder Subtraktion korrekt bestimmt werden konnte. Diese Ergebnisse nähern die Vorstellung des Gedankenlesens, da es im Rahmen dieser Untersuchung zu einem gewissen Grad gelingt, verborgene Intentionen aus der Aktivierung im medialen präfrontalen Cortex aufzudecken.

Ist dies ein Indiz für die Möglichkeit Gedanken zu lesen? Zunächst einmal ist herauszustellen, dass das analytische Vorgehen in Form der Kombination der fMRT-Daten und Mustererkennungsverfahren generell vielversprechend ist. Haynes et al. setzten ein multivariates¹⁰²⁶ Mustererkennungsverfahren ein, um zum einen räumliche Aktivierungsmuster aufzuspüren, die bei der Unterscheidung zwischen der Intention, zwei Zahlen zu addieren bzw. zwei Zahlen zu subtrahieren, hilfreich sind. Zum anderen sollten die generierten Aktivierungsmuster hinsichtlich ihrer Zuordnungsgüte getestet werden. Im ersten Schritt muss die Software darauf trainiert werden, welches Aktivierungsmuster mit welcher Intention (Addition bzw. Subtraktion) verbunden ist. Nach dieser Trainingsphase verfügt das Erkennungsverfahren quasi über die ersten Erfahrungen hinsichtlich neuronaler Aktivierungsmuster. Im zweiten Schritt gilt es zu überprüfen, wie gut man auf Basis der eingespeicherten Aktivierungsmuster in der Lage ist, zwischen der Intention zur Addition und zur Subtraktion zu unterscheiden. Dazu werden neue Aktivierungsdaten mit den gespeicherten Aktivierungsmustern verglichen, um über den Vergleich eine korrekte Zuordnung zu den beiden Intentionen vorzunehmen. Zur Erschließung der räumlichen Aktivierungsmuster und zur Überprüfung der Güte dieser Muster wurden jeweils unterschiedliche Daten-Sets

¹⁰²⁵ vgl. Haynes, J.-D. et al. (2007)

¹⁰²⁶ Im Gegensatz zur univariaten Analyse, die sich auf die Analyse einzelner Hirnregionen (einzelne Voxel) beschränkt, können im Rahmen der multivariaten Analyse Aktivierungen in unterschiedlichen Regionen des Gehirns gleichzeitig registriert werden. Die Aktivierung mehrerer Voxel bildet in diesem Fall ein räumlich spezifisches Muster, das einen bestimmten Geisteszustand repräsentiert (bspw. Intention zur Subtraktion).

verwendet. Im Endeffekt konnte demonstriert werden, dass man im Falle einer relativ trivialen Auswahlentscheidung, in der es um die Entscheidung zwischen zwei einfach strukturierten Optionen ging, aus spezifischen Aktivierungsmustern die Absicht in Bezug auf eine der beiden Optionen vorhersagen kann. Bei dem Versuch der Zuordnung stellt sich generell die Frage der Trefferquote, also die Frage, wie oft es ein Verfahren schafft, die Hirnaktivierungen richtig zuzuordnen. Die höchste Trefferquote im Fall von Haynes et al. liegt bei ca. 70%. In 70% der Fälle gelingt folglich die Unterscheidung zwischen der Absicht zu Addieren und zu Subtrahieren. Diese Trefferquote liegt unbestreitbar über einer zufälligen Trefferquote (50%). Eine Prädiktion der nachfolgenden Entscheidung gelingt in diesem Sinne zu einer gewissen Güte, aber nicht perfekt. Ob dies ein Beweis für die Möglichkeit des Gedankenlesens ist, bleibt fraglich. Es wurden unabhängige Datensets für die Trainings- und die Testphase verwendet. Für die einzelnen Stimuluskategorien lassen sich zudem über die Verwendung eines Mustererkennungsverfahrens feinere Aktivierungsmuster herausstellen, die als Zuordnungskriterium dienen sollen. Im Gegensatz dazu wird im Zuge der fMRT-Standardanalyse danach gefragt, in welcher Region die höchste Aktivierung vorliegt und was dies bedeutet. Durch die Erfassung räumlicher Aktivierungsmuster nähert man sich der Idee neuronaler Netzwerke an. Allerdings stammen alle Daten von denselben Personen. Aussagekräftiger wäre es, wenn die Daten einer Stichprobe für das Training der Software verwendet worden wären und sich die generierten Aktivierungsmuster bei der Zuordnung der Aktivierungen einer anderen Stichprobe als nützlich erwiesen hätten. Selbst im vorliegenden Fall, dass alle Daten aus derselben Stichprobe stammen, kann nur eine Zuordnungsquote von 70% vermeldet werden. Außerdem geht es um die Unterscheidung zwischen zwei Optionen, nicht um die Abbildung komplexer Gedanken.

Die nachfolgenden zwei Studien gingen einen Schritt weiter als Haynes et al., indem sie mit einer Kombination von fMRT-Daten und lernfähiger Decodierungssoftware arbeiteten. Das Untersuchungsinteresse von *Nishimoto et al.*¹⁰²⁷ betraf die Möglichkeit, visuelle Erfahrungen über Gehirnaktivierungen zu rekonstruieren. Die Erhebung bestand sowohl aus einer Trainings- wie auch aus einer Testphase. Im Zuge der Trainingsphase wurden den Probanden verschiedene Filme gezeigt und gleichzeitig ihre Gehirnaktivierungen im okzipitalen visuellen Cortex aufgezeichnet. Die erhobenen Daten wurden anschließend in einen Computeralgorithmus eingelesen, der lernt, die Aktivierungsmuster mit den dazugehörigen Bildern zu verbinden. Die Trainingsphase stellte folglich die Basis für die nachfolgende Testphase dar. In der Testphase wurden die Probanden mit neuen Filmsequenzen konfrontiert. In diesem Zusammenhang wurden ebenfalls die Aktivierungen in den bereits fokussierten Gehirnregionen des visuellen Cortex erfasst. Basierend auf den zuvor erlernten Verknüpfungen, errechnete der Computer die beste Schätzung dessen, was die Probanden zu Gesicht bekommen hatten. Diese Schätzung bzw. Rekonstruktion des Gesehenen wurde über den Rückgriff auf einen Pool aus 18 Millionen Sekunden willkürlich ausgewähl-

¹⁰²⁷ vgl. Nishimoto, S. et al. (2011)

tem Filmmaterial ermöglicht. Kriterium bei der Suche nach geeigneten Filmsequenzen war, dass sie den zuvor gelernten Hirnaktivitätsmustern am ehesten entsprechen sollten. Letztlich wurden jeweils die hundert am besten passenden Szenen vom Computer verschmolzen. Unter Berücksichtigung der fMRT-Daten konnten unscharfe Filmsequenzen erzeugt werden, die den gezeigten Sequenzen relativ nah kamen. Das Besondere am Studienergebnis war, dass es zum ersten Mal gelang, bewegte Bilder über die zeitlich vergleichsweise niedrig aufgelösten fMRT-Daten in einem gewissen Maße zu rekonstruieren.

Vergleichbar mit der Untersuchung von Nishimoto et al. ging es auch bei Schoenmakers et al.¹⁰²⁸ um den Versuch, visuelle Wahrnehmungen über die explizite Analyse visueller Areale auszulesen. Die Forscher arbeiteten ebenfalls mit einer Kombination aus hochauflösenden Hirnscans und einer speziellen lernfähigen Auswertungssoftware. Im Gegensatz zu Nishimoto et al. beschäftigten sie sich jedoch mit der Rekonstruktion von einzelnen Buchstaben (B, R, A, I, N und S), die ein Proband gerade liest. Wie bei Nishimoto et al. wurden die erhobenen Aktivierungsdaten in ein Trainingsdatenset und ein Testdatenset aufgeteilt. Im Zuge der Trainingsphase konnte die Software gezielt darauf programmiert werden, die einzelnen Aktivierungen bestimmten gesehenen Pixeln zuzuordnen. In der Testphase wurde dann versucht, gesehene Buchstaben auf der Grundlage neuer Aktivierungen adäquat zu rekonstruieren. Im Ergebnis konnte allein anhand der Hirnaktivität in den meisten Fällen ermittelt werden, welche handschriftlichen Buchstaben die Probanden gerade gelesen hatten.

Beide Untersuchungen behandeln eine ganz andere Art von Fragestellung als die zuvor dargestellten Studien. Es geht nicht wirklich um das Thema Gedankenlesen, wie in den anderen Studien kommuniziert, sondern vielmehr um den Versuch, visuelle Wahrnehmungen in Form verschiedener Filme bzw. einzelner Buchstaben über die explizite Analyse visueller Areale zu rekonstruieren. Es existieren bereits sehr viele Erkenntnisse hinsichtlich der Verarbeitung sensorischer Reize. Der Prozess der visuellen Wahrnehmung ist mittlerweile gut erforscht, so dass heute bereits ziemlich präzise bestimmt werden kann, welche visuellen Informationen welcher Aktivität im Sehzentrum entsprechen. In Kombination mit lernfähigen Mustererkennungsverfahren können daher in diesem Bereich erstaunliche Ergebnisse erzielt werden. Diese Leistungsfähigkeit darf allerdings nicht mit dem Lesen von Gedanken gleichgesetzt werden. Zwischen der Verarbeitung sensorischer Reize und dem Lesen von Gedanken besteht ein großer Unterschied. Im Vergleich zu komplexen Gedanken liegen weniger Freiheitsgrade vor, was die zugrunde liegende Struktur sensorischer Verarbeitung überschaubarer macht. Dennoch stützen beide Untersuchungen zum einen generell die Aussagekraft von fMRT-Daten. Zum anderen zeigen sie, dass die Messung von Gehirnaktivität wichtige Einsichten in verschiedene kortikale Repräsentationen erlaubt bzw. in der Zukunft erlauben wird.

¹⁰²⁸ vgl. Schoenmakers, S. et al. (2013)

Ergänzend zu den bereits diskutierten fMRT-Studie wird an dieser Stelle noch auf ein paar weitere Aspekte eingegangen, die bei der Antwort auf die Frage nach der Möglichkeit, Gedanken zu lesen, Berücksichtigung finden sollen.

Den Anfang macht die generelle Betrachtung des BOLD-Signals, also des Signals auf dessen Basis Gedankenlesen ermöglicht werden soll. Wie in Kapitel 5 dargestellt wurde, handelt es sich beim BOLD-Signal nicht um eine direkte Messung von Gehirnaktivität.¹⁰²⁹ Gehirnaktivität wird hierbei über indirekte Begleiterscheinungen in Form der Sauerstoffsättigung im Blut indiziert. Wie bereits im Zusammenhang mit den fMRT-Studien gezeigt werden konnte und wie auch im weiteren Verlauf dieses Kapitels noch zu zeigen ist, wird definitiv die Meinung vertreten, dass sich das BOLD-Signal zur Messung von Gehirnaktivität eignet. Allerdings bestehen hinsichtlich der Information, die im gemessenen BOLD-Signal zum Ausdruck kommt, und im Zusammenhang mit der Interpretation eines Gehirnschans auch Grenzen. In Bezug auf das Thema Gedankenlesen mittels fMRT-Daten spiegelt folgende Analogie die eigene Sicht: *„Vom Ausmaß der Durchblutung auf komplexe Leistungen zu schließen, ist genau so, als wenn man von der Durchblutung im Muskel auf die Qualität einer Kür beim Eiskunstlauf schließen wollte.“*¹⁰³⁰

In Bezug auf die Analogie und die nachfolgenden Aspekte muss kurz darauf eingegangen werden, was eigentlich unter dem Begriff des Gedankenlesens mittels Gehirnschans verstanden werden kann. Hierbei kann ein einfaches Gedankenexperiment weiterhelfen. Ein Proband wird in einem Magnetresonanztomographen platziert und bspw. darum gebeten, an etwas Schönes aus seiner Kindheit zu denken. Während der Proband der Anweisung folgt, wird seine Gehirnaktivität aufgezeichnet. Einmal abgesehen von der Realisierung der beschriebenen Untersuchung ist nun die entscheidende Frage, ob mittels des generierten Gehirnschans mit farblicher Markierung der aktivierten Regionen darauf geschlossen werden kann, an wen oder was der Proband gedacht hat. Gedanken können aus verschiedenen Elementen bestehen. Denkt man z.B. an einen warmen Sommernachmittag im Park, so beinhaltet der Gedanke evtl. eine Person, mit der man im Park war, das Gezwitscher von Vögeln, die angenehme Wärme durch die hellstrahlende Sonne und noch weitere Details. Konkrete Gedanken, wie auch andere kognitive und emotionale Prozesse, werden nicht nur durch die Aktivierung eines Gehirnareals repräsentiert. Außer der FFA (für die Verarbeitung von Gesichtern) ist keine separate Gehirnregion bekannt, die nur im Zusammenhang mit einem konkreten Begriff oder Gedanken (Hund, Ferrari, ...) eine Aktivität zeigt. Andernfalls würde das Gehirn nicht ausreichen, um alle möglichen Gedanken zu denken. Die Leistungsfähigkeit und somit auch der neuronale Code steckt in der Vernetzung unterschiedlicher Gehirnregionen, die in ihrer Einheit die konkreten Inhalte transportieren. Gedanken beinhalten folglich eine gewisse Komplexität. Schon bei simplen Gedanken gibt es bereits Schwierigkeiten. Denkt man bspw. an einen geliebten Menschen, so finden sich im Ergebnis einer fMRT-Aufnahme sehr wahrscheinlich Aktivierungen in Gehirnbereichen, die mit positiven

¹⁰²⁹ vgl. Kapitel 5.1.2 Signalentstehung

¹⁰³⁰ <http://www.spektrum.de/news/mehr-als-tausend-worte/968694>

Emotionen assoziiert werden. Ob es sich bei der Person allerdings um einen Mann oder eine Frau handelt, kann man aus diesem Gehirnscan nicht herausfiltern. Die Begrenztheit der Auflösung von fMRT-Ergebnissen lässt sich über eine bereits in Kapitel 2¹⁰³¹ vorgestellte fMRT-Studie darstellen. In einer Untersuchung von *Erk et al.*¹⁰³² ging es um die Herausstellung neuronaler Unterschiede hinsichtlich der Wahrnehmung verschiedener Autotypen (Kleinwagen vs. Limousine vs. Sportwagen). Vor allem im Vergleich Sportwagen vs. Kleinwagen zeigten sich Aktivierungsunterschiede im Bereich des ventralen Striatum und des orbitofrontalen Cortex (OFC), welche beide dem Belohnungssystem zugeordnet werden. Diese Beobachtung steht im Einklang mit der Theorie, die davon ausgeht, dass Sportwagen im Vergleich eine höhere kulturelle Wertigkeit aufweisen und daher belohnungsversprechende Reize darstellen. Genau dies, also die Bedeutung der unterschiedlichen Autotypen, ist den Gehirnscans zu entnehmen. Festzuhalten bleibt, dass es auf Basis der unterschiedlichen kulturellen Bedeutungen gelingt einen Unterschied zwischen den beiden Autotypen abzubilden. Aufgrund der Verwendung der Subtraktionsmethode berichten die fMRT-Standardanalysen im Ergebnis die deutlichsten Unterschiede zwischen zwei Bedingungen, d.h. aber nicht, dass durch dieses Vorgehen die charakteristischen Aktivierungsmuster eines konkreten Stimulus offen gelegt werden. Aufgrund eines Gehirnscans zwischen der Wahrnehmung eines Porsches und eines Ferraris zu differenzieren, ist eher unrealistisch, da sie eine ähnliche statusbezogene Bedeutung mit sich bringen. fMRT-Daten beinhalten definitiv eine interpretierbare Information, doch die inhaltliche Auflösung der Gehirnscans unterliegt im Hinblick auf die Darstellung von Details in beschriebener Weise einer gewissen Begrenzung. Die Vorstellung des Gedankenlesens mit Hilfe von fMRT-Daten wird folglich nicht bekräftigt.

Ein weiteres Argument gegen die Möglichkeit des Gedankenlesens erwächst aus der biologischen Komplexität neuronaler Aktivität, welche in Kapitel 3¹⁰³³ im Detail thematisiert wurde. Die Ausführungen beschränken sich zwar aus Gründen der Einfachheit und Angemessenheit auf Abläufe zwischen zwei Nervenzellen, doch bereits im Rahmen dieser Auflösung ist die generelle Komplexität neuronaler Aktivität zu erkennen. Wäre das Lesen von Gedanken möglich, so würde man bspw. in Bezug auf Entscheidungsverhalten die einzelnen Gedankenschritte bzw. Teilprozesse mit den entsprechenden Gewichtungen abbilden können. Denkt man an den Entscheidungsprozess, der dem Kauf eines Produktes zugrunde liegt¹⁰³⁴, so müsste es gelingen, die einzelnen Informationsverarbeitungsprozesse transparent zu machen. Dabei geht es um Prozesse wie: Welche Signale eines Kaufangebotes werden berücksichtigt? Wie werden die einzelnen Signale bewertet? Wie werden gegensätzliche Bewertungen verrechnet? Biologisch gesehen spielen sich die einzelnen Teilprozesse in neuronalen Netzwerken ab. Innerhalb dieser Netzwerke werden einzelne Neuronen über Synapsen miteinander verbunden und übertragen an ihnen Informationen. Es

¹⁰³¹ vgl. Kapitel 2.2.2.2 Neuromarketing im engeren Sinne

¹⁰³² vgl. Erk, S. et al. (2002)

¹⁰³³ vgl. Kapitel 3.2 Die funktionelle Einheit des Gehirns

¹⁰³⁴ vgl. Kapitel 7.2.1 Generelle Überlegungen zur handlungstheoretischen Interpretation

gibt sowohl chemische wie auch elektrische Synapsen. Chemische Synapsen sind flexibler, da Informationen von unterschiedlichen Synapsen integriert werden um eine nachfolgende Nervenzelle ausreichend stark zu depolarisieren. Es können zum einen aktivierende Synapsen und zum anderen hemmende Synapsen beteiligt sein. Im Sinne der Integration kommt es zu einer synaptischen Verzögerung, die es ermöglicht, verschiedene hemmende und erregende Informationen einfließen zu lassen. Hierbei werden hemmende und aktivierende Synapsen nicht Eins-zu-Eins verrechnet. Aufgrund ihrer Nähe zum Ort der Aktionspotenzialentstehung entfalten hemmende Synapsen im Vergleich eine stärkere Wirkung. Im Zusammenhang mit chemischen Synapsen ist für die Weiterleitung einer Information auf die nachfolgende Nervenzelle die Beziehung zwischen Neurotransmittern und Rezeptoren entscheidend. Die Bedeutung einer konkreten Synapse, im Sinne einer anregenden oder hemmenden Wirkung, steckt hierbei in den Rezeptoren. Je nachdem mit welchem Rezeptor eine postsynaptische Membran versehen ist, entfalten die vor Ort befindlichen Neurotransmitter eine entsprechende Wirkung. Derselbe Neurotransmitter bewirkt an einigen Synapsen eine Aktivierung, an anderen Synapsen eine Hemmung. Elektrische Synapsen sind im Gegensatz zu chemischen Synapsen nicht flexibel, dafür aber schneller. Hier erfolgt quasi eine direkte Übertragung des elektrischen Impulses auf die nachfolgende Zelle, ohne dass chemische Substanzen beteiligt sind. Im Gehirn gibt es beide Arten von Synapsen, allerdings gehört die überwiegende Anzahl den chemischen Synapsen an. Zu guter Letzt darf hinsichtlich der Gesamtperspektive nicht vergessen werden, dass die verschiedenen Prozesse von der Reizaufnahme bis zur Entscheidung aus komplexen Neuronennetzen bestehen und nicht nur aus der Verbindung zwischen zwei Nervenzellen. Zudem laufen die meisten Prozesse im Millisekunden-Bereich ab, wodurch die detaillierte Erfassung der Prozesse nicht einfacher wird. Bezieht man in Hinblick auf Entscheidungen neben der theoretischen Prozesskomplexität auch die grundlegende biologische Komplexität mit in die Betrachtung ein, so erscheint die Vorstellung diese komplexen Prozesse detailliert über fMRT-Daten abbilden zu können, um daraus die Gedanken zu lesen, wenig realistisch.

Aufgrund der Ausführungen zur Position des Gedankenlesens über fMRT-Daten sollte deutlich geworden sein, dass diese Position nicht vertreten wird. Wenn man davon sprechen möchte, was aktuell möglich ist, so kann festgehalten werden, dass man in einem gewissen Rahmen zwischen groben Kategorien unterscheiden kann (Vorstellung von Gesichtern vs. Orten). Über Details (Welche Person hat man sich vorgestellt? War es ein Mann oder eine Frau? An welchem Ort wurde gedacht?) kann anhand von Gehirnaktivierungen allerdings nichts ausgesagt werden. Betrachtet man noch einmal kurz die Studienergebnisse von Haynes et al., in der es mit einer 70% Trefferquote gelingt, die verborgene Handlungsabsicht (Addition oder Subtraktion) auf der Grundlage von gelernten Aktivierungsmustern korrekt zuzuordnen, so bleibt resümierend festzuhalten, dass „vermeintliches Gedankenlesen“ selbst bei einer, im Vergleich zu komplexen Gedanken, einfachen Unterscheidung nur zu einem gewissen Grad möglich ist.

Im Rahmen der Auseinandersetzung mit verschiedenen fMRT-Studien wurde auch auf Untersuchungen eingegangen, die über die Anwendung lernfähiger Mustererkennungsverfahren eine hohe Leistungsfähigkeit erreichen. Zentral für den zielführenden Einsatz von Mustererkennungsverfahren sind zwei Dinge. Auf der einen Seite muss vorausgesetzt werden, dass auch die feinsten Unterschiede zwischen zwei Inhalten über die fMRT-Daten, genauer über ein jeweils charakteristisches Aktivierungsmuster, abbildbar sind. Für den Bereich der sensorischen Verarbeitung zeigen die Studien von Nishimoto et al. und Schoenmakers et al. was gegenwärtig möglich ist. In diesem Bereich ist das Potential erkennbar. Die Frage hierbei ist nur, welche Auflösung erreicht werden kann. Hinsichtlich komplexer Gedanken scheint dies eher unrealistisch. Im Vergleich zur Verarbeitung visueller Informationen sind die zugrunde liegenden Prozesse und Verbindungen kaum verstanden. Zudem sind dem Verstand kaum Grenzen gesetzt, was höhere Freiheitsgrade mit sich bringt und somit die Erfassung des konkreten Aktivierungsmusters stark erschwert. Auf der anderen Seite ist das eingesetzte Verfahren nur so gut, wie es trainiert wurde. Sprich zum Gedankenlesen muss das Verfahren mit den Aktivierungsmustern aller Gedanken gefüttert worden sein, damit es diese überhaupt wiedererkennen kann. Im Zuge des Trainings muss folglich eine Art Gedankenwörterbuch erstellt werden, das gemessene Gehirnaktivierungen konkreten Einträgen in diesem Wörterbuch zuordnet. Bereits in Bezug auf die Gedanken einer Person erscheint es äußerst unwahrscheinlich ein derartiges Wörterbuch erstellen zu können. Die Situation verbessert sich nicht, wenn mehrere Personen in die Betrachtung eingeschlossen werden. Theoretisch haben unterschiedliche Personen unterschiedliche Gedanken bzw. kann sich derselbe Gedanke je nach Person anders darstellen. Bedenkt man, dass sich im Zusammenhang mit unterschiedlichen Gedanken auch unterschiedliche Emotionen verbinden lassen, übersteigt diese Komplexität die Vorstellungskraft.

Die beschriebenen Studien kommen teilweise zu bemerkenswerten Ergebnissen und zeigen auf ihre Art, wozu die Analyse von fMRT-Daten herangezogen werden kann. Doch das Lesen von Gedanken anhand der Gehirnaktivierungen ist nicht in greifbarer Nähe. Daraus folgt, dass die skeptische Haltung innerhalb der breiten Bevölkerung gegenüber den Auswirkungen des Einsatzes der fMRT unbegründet ist. Die Gefahr des gläsernen Konsumenten droht eher durch den unbedachten Umgang mit dem Internet, sozialen Netzwerken, mobilen Anwendungen und den entsprechenden Endgeräten.

8.1.2 Anmerkungen zur generell kritischen Position hinsichtlich der fMRT

Im Gegensatz zur ersten Position, die von der Möglichkeit Gedanken zu lesen spricht, stellt diese grundlegend kritische Position die Güte des Messverfahrens über verschiedene Ansatzpunkte generell in Frage. Der komplexe Prozess im Zusammenhang mit der fMRT wird hierbei in die verschiedenen Teilprozesse zerlegt, in den einzelnen Teilbereichen detailliert aufgearbeitet und anschließend grundlegend kritisiert. Ansatzpunkte der Kritik finden sich auf verschiedenen Ebenen. Beispielhaft werden einige Kritikpunkte aufgeführt.

Wie bereits in der Einleitung dargestellt, besteht eine generelle Kritik in Bezug auf die biologische Basis der fMRT. Diese Kritik ist an die Studienergebnisse von *Schummers, Yu & Sur*¹⁰³⁵ angelehnt. Sie machten in Bezug auf visuelle Gehirnareale von Frettchen die Beobachtung, dass neben Neuronen auch Gliazellen mitverantwortlich für den Sauerstoffbedarf an aktivierten Gehirnregionen sind.

Gehirnaktivität wird im Zuge der fMRT über das gemessene BOLD-Signal erfasst.¹⁰³⁶ Dieses Signal beruht auf der Sauerstoffsättigung des Blutes. Gehirnbereiche werden dann als signifikant aktiviert ausgewiesen, wenn an diesen Stellen mehr sauerstoffreiches als sauerstoffarmes Blut vorhanden ist. Es konnte geklärt werden, dass dies immer dann der Fall ist, wenn im Zusammenhang mit Gehirnaktivität eine Überversorgung der betroffenen Areale mit sauerstoffreichem Blut erfolgt. Genau anhand dieses Sauerstoffüberschusses wird ein Rückschluss auf aktive Gehirnbereiche gezogen. Lange Zeit wurden die Nervenzellen exklusiv als funktionelle Einheiten des Gehirns angesehen. Den Gliazellen wurde diesbezüglich keine Beteiligung zugesprochen. Sie galten lediglich als Stützzellen, die für die anatomische Stabilität des Neuronensystems verantwortlich waren. Mit der Funktionalität der Nervenzellen oder gar mit Gehirnaktivität wurden sie nicht assoziiert.

Würden die bisherigen Äußerungen den aktuellen Kenntnisstand widerspiegeln, so wäre die Beobachtung von Schummers, Yu & Sur tatsächlich in der Lage, die Messung der Gehirnaktivität über das BOLD-Signal, und somit die generelle Messgrundlage, in Frage zu stellen. Mittlerweile hat sich allerdings das Verständnis in Hinblick auf die Gliazellen deutlich verbessert. Im Rahmen von Kapitel 3¹⁰³⁷ konnten in diesem Zusammenhang bereits einige neuere Erkenntnisse dargelegt werden. Unter anderem konnte festgestellt werden, dass Neurone unspezifischer reagieren als Gliazellen. Gliazellen zeigen folglich spezifischere Reaktionen. Dies führt zu der Annahme, dass neuronale Aktivität die allgemeine Basis für die Auslösung einer spezielleren gliabezogenen Reaktion darstellt. Dies passt auch zu der Erkenntnis, dass die Aktivität der Gliazellen an neuronale Aktivität angepasst ist. Sind Neuronen in einer bestimmten Region aktiv, so gilt dies gleichermaßen für die Gliazellen innerhalb desselben Bereichs. Es gibt verschiedene Hinweise darauf, dass Gliazellen neuronale Aktivität in Bezug auf ihre Dauer und Stärke modulieren. Im Zusammenhang mit Gliazellen wird weiter angenommen, dass diese, anders als Nervenzellen, nicht zwangsweise in Form eines großen Netzwerkes agieren. Vielmehr stellt sich die Situation so dar, dass Gliazellen mit einer begrenzten Anzahl sie umgebender Neurone verbunden sind und sich auf diese in beschriebener Weise auswirken können.

Es kann festgehalten werden, dass Gliazellen neben der Stützfunktion noch in verschiedene andere Aufgaben involviert sind. Es gibt im Ergebnis zwar ein erweitertes Verständnis hinsichtlich der Gliazellen, die einzelnen Funktionsbereiche sind allerdings noch unvollständig aufgeklärt. Nach dem aktuellen Wissensstand sind Gliazellen nicht die ursächlichen Treiber von Gehirnaktivität. Ihre Aktivität ist vielmehr an neuronale Aktivität gekoppelt. Neuronale Aktivität ist hiernach der zugrunde liegende

¹⁰³⁵ vgl. Schummers, J.; Yu, H.; Sur, M. (2008)

¹⁰³⁶ vgl. Kapitel 5.1.2 Signalentstehung

¹⁰³⁷ vgl. Kapitel 3.2.4 Die Gliazellen

Prozess, durch den Gehirnaktivität beschrieben werden kann. Allerdings sind die Gliazellen sehr stark mit der Modulation der neuronalen Aktivität verbunden. Sie verstärken bzw. schwächen die neuronale Aktivität. In der Quintessenz kann weiterhin davon ausgegangen werden, dass die Nervenzelle die grundlegende funktionelle Einheit des Gehirns repräsentiert, sie jedoch in ihrer Funktionalität stärker als bisher gedacht durch die Gliazellen unterstützt wird. Auch im Zusammenhang mit Gliazellenaktivität wird Energie benötigt. Da ihre Aktivität zum einen an neuronale Aktivität gekoppelt ist und zum anderen räumlich eng an die korrespondierenden Nervenzellen gebunden ist, ist es nicht verwunderlich, dass auch Gliazellen ihren Beitrag zum Sauerstoffbedarf i.V.m. Gehirnaktivität leisten. Das BOLD-Signal kann folglich immer noch als geeigneter Indikator für Gehirnaktivität angesehen werden.

In Bezug auf die generelle Datenerhebung wird oft der Einwand geäußert, dass die Erhebungssituation sehr unnatürlich und somit die Aussagekraft der Ergebnisse sehr fraglich ist. Zum einen liegen die Probanden in einer relativ engen Röhre (MR-Scanner) in einem externen Magnetfeld. Ihr Kopf befindet sich innerhalb einer Kopfspule¹⁰³⁸ und wird durch kleine Kissen, die den Zwischenraum ausfüllen, einigermaßen gut fixiert, so dass die Wahrscheinlichkeit von Kopfbewegungen minimiert wird. An der Oberseite der Kopfspule sind Video-Goggles¹⁰³⁹ montiert, die für jeden Probanden derart eingestellt werden, dass sie visuelle Stimuli wahrnehmen können und mit entsprechenden Handgeräten¹⁰⁴⁰ einer konkreten Aufgabe in Bezug auf die präsentierten Stimuli nachgehen können. Zum anderen stellen fMRT-Studien mit einer Dauer von bis zu einer Stunde nicht die Ausnahme dar. Aufgrund der schwachen Signale müssen ausreichend Messwiederholungen vorgenommen werden.¹⁰⁴¹ Je nachdem wie komplex das experimentelle Design gestaltet ist, lassen sich Erhebungszeiten von bis zu einer Stunde nicht vermeiden. Bei einfacheren Designs liegen weniger Kategorien vor, was den zeitlichen Erhebungsaufwand verkürzen kann. Während die Personen im Scanner liegen und eine konkrete Aufgabe bewältigen, ist ein für MR-Scanner typisches Klopfgeräusch wahrnehmbar.¹⁰⁴² Je stärker der verwendete Scanner ist, desto lauter wird dieses Geräusch.

Die beschriebene Situation ist dem Messverfahren geschuldet und kann grundlegend nicht verändert werden. Eine fMRT-Messung braucht aus beschriebenem Grund eine gewisse Zeit. Die angesprochenen Klopfgeräusche entstehen im Endeffekt durch die Gradientenspulen, die für die Generierung räumlicher Informationen unabdingbar sind. Dem Geräuschpegel kann zum einen mittels verschiedener Ohrstöpsel begegnet werden. Zum anderen werden 1,5T-Scanner oder maximal 3T-Scanner eingesetzt, bei denen der Geräuschpegel nicht so hoch ist, so dass man sich nach einer kurzen Zeit daran gewöhnt und davon nicht weiter beeinflusst wird. Über eine ausführliche Experimentalbeschreibung und anschließende Nachfragemöglichkeiten wird der Erhebungsverlauf für die Probanden so transparent wie möglich gemacht, ohne

¹⁰³⁸ vgl. Abb. 54: Die Kopfspule

¹⁰³⁹ vgl. Abb. 89: Video-Goggles, angebracht auf der oberen Hälfte der 2-teiligen Kopfspule

¹⁰⁴⁰ vgl. Abb. 90: Response-Devices (Vier-Finger-Handgeräte)

¹⁰⁴¹ vgl. Kapitel 5.3.1 Signal und Rauschen

¹⁰⁴² vgl. Kapitel 4.3 Der MR-Scanner

allerdings den genauen Forschungshintergrund preiszugeben, um Missverständnissen vorzubeugen. Des Weiteren beinhalten einige fMRT-Studien auch Trainingsphasen, um die Probanden an die Erhebungssituation zu gewöhnen. Da sich die beschriebene Erhebungssituation auf einzelne Personen, die noch nie in einem MR-Scanner gelegen haben, in unterschiedlicher Form auswirken kann, wird generell auf Probandenpanels zurückgegriffen. Sie beinhalten Probanden, die bereits mindestens an einer Erhebung teilgenommen haben und somit keine besonderen Reaktionen in Bezug auf die Erhebungssituation zeigen. Zudem handelt es sich um Personen, die hinsichtlich verschiedener Sicherheitsaspekte unbedenklich sind. Unerfahrene Probanden fühlen sich in der ungewohnten Situation evtl. unwohl. In der Folge kommt es häufiger zu Kopfbewegungen während der Erhebung, was die Datenlage je nach Ausmaß der Kopfbewegungen verschlechtert bzw. komplett zum Ausschluss der Daten führen kann. I.d.R. wird mit erfahrenen Probanden gearbeitet, dennoch können auch unerfahrene Probanden an fMRT-Experimenten teilnehmen. Die Probandenpanels werden regelmäßig durch Probanden vergrößert, die zum ersten Mal teilnehmen, aber keine Schwierigkeiten mit der Erhebungssituation selbst haben. Im Endeffekt werden die Probanden nicht durch die Erhebungssituation beeinträchtigt. Sollte dies doch einmal der Fall sein, kommt es in der Folge zu schlechten Daten und zum Fallausschluss.

Ein weiterer Kritikpunkt besteht darin, dass für eine statistische Analyse der fMRT-Daten eine Vorverarbeitung der Rohdaten unabdingbar ist. Allein auf Basis der Rohdaten ist nicht an eine sinnvolle Analyse zu denken. Dieser Sachverhalt ist auf der einen Seite dem generell schwachen Signal und den gleichzeitig vorhandenen Störgrößen und auf der anderen Seite der Erhebungssystematik¹⁰⁴³ im Zusammenhang mit der Ergebnisdarstellung¹⁰⁴⁴ geschuldet. Durch die einzelnen Vorverarbeitungsschritte sollen die voxelbezogenen Aktivierungswerte nicht verändert werden. Zum einen besteht das Ziel darin, dass die Daten einer Person in Bezug auf einen konkreten Voxel immer dieselbe Gehirnregion repräsentiert und dass die Signalwerte für unterschiedliche Voxel denselben Zeitpunkt widerspiegeln. Zum anderen geht es darum, die bestmögliche Ausgangssituation für die statistische Datenanalyse zu gewährleisten. Die Datenvorverarbeitung stellt definitiv einen kritischen Punkt dar. Allerdings bestehen mittlerweile relativ bewährte und nachvollziehbare Handhabungen.¹⁰⁴⁵

Hinsichtlich der statistischen Datenanalyse gibt es ebenfalls kritische Stimmen. Ein Beispiel ist die Studie von *Bennett et al.*¹⁰⁴⁶, welche teilweise als Argument gegen die Aussagekraft von fMRT-Daten angeführt wird. Diese relativ bekannte Untersuchung stellt ein gutes Beispiel für das Problem des multiplen Testens in Bezug auf fMRT-Daten dar. Im Rahmen der Untersuchung konnte gezeigt werden, dass es möglich

¹⁰⁴³ Zum einen erfolgt eine Multi-Slice-Messung. Zum anderen werden im Zuge der Erhebung die Signalveränderungen für jeden einzelnen Voxel erfasst.

¹⁰⁴⁴ Die erhobenen Daten werden im Zuge der Ergebnisdarstellung so behandelt, als wären sie zum selben Zeitpunkt erhoben worden

¹⁰⁴⁵ vgl. Kapitel 5.3.2 Vorverarbeitung der Daten

¹⁰⁴⁶ vgl. Kapitel 5.4.3 Spezielle Herausforderungen hinsichtlich der fMRT-Datenanalyse

ist, auch bei einem faktisch toten Lachs Gehirnaktivierungen zu detektieren. Dieses Ergebnis spricht in der Tat nicht für die Arbeit mit fMRT-Daten. Widmet man sich der Untersuchung von Bennett et al. jedoch etwas genauer, so werden hier Wege aufgezeigt, derartige Messfehler zu vermeiden bzw. zumindest stark zu verringern und damit die Aussagekraft von fMRT-Daten zu erhöhen. Im Endeffekt adressieren Bennett et al. zu Recht das generelle Problem des multiplen Testens, da es aufgrund der theoretisch tausenden von Tests im Zuge einer Whole-Brain-Analysen einen absolut relevanten Aspekt darstellt. Sie kommen aber zu dem Schluss, dass es über die Anwendung entsprechender Fehlerkorrekturen gelingt, diesem generellen statistischen Problem zu begegnen.

Neben der Vorverarbeitung und der statistischen Analyse der Daten wird auch die Interpretationsmöglichkeit von fMRT-Ergebnissen teilweise sehr kritisch gesehen. In diesem Bereich gibt es viele verschiedene Ansatzpunkte für Kritik. Einige spezielle Aspekte werden durch die Anmerkungen zur nachfolgenden Position, dem Neuro-marketing im weiteren Sinne, aufgegriffen. Zwei allgemeinere Punkte, die neuronale Interpretation und die handlungstheoretische Interpretation der fMRT-Ergebnisse, werden im Zuge der Position des Neuromarketing im engeren Sinne noch einmal genauer thematisiert. Generell kann in Bezug auf die Interpretation an dieser Stelle festgehalten werden, dass es auf der einen Seite durchaus Aspekte gibt, die eine gewisse Limitation darstellen. Auf der anderen Seite werden allerdings auch Möglichkeiten aufgezeigt, mit einigen von diesen Limitationen umzugehen.

Nachdem auf verschiedene Kritikpunkte eingegangen wurde, sollen an dieser Stelle auch einige Argumente angeführt werden, die die generelle Aussagekraft der fMRT bzw. von fMRT-Ergebnissen stützen. Als Erstes können hierzu alle fMRT-Studien angeführt werden, die sich mit motorischen oder sensorischen Verarbeitungsprozessen auseinandergesetzt haben. Diese Prozesse sind im Vergleich zu komplexen Gedanken relativ einfach und klar strukturiert. Zudem lassen sich sehr gute Stimuli erstellen, die die einzelnen Prozesse sehr präzise ansprechen. In der Folge existiert aufgrund vieler Erkenntnisse ein gutes Verständnis in Bezug auf diese Verarbeitungsprozesse. Da in diesen Bereichen viele Zusammenhänge bekannt sind, ist es gut möglich, die grundlegende Güte eines neurophysiologischen Messverfahrens durch Experimente in diesem Bereich herauszustellen. Untersucht man derartige Prozesse über fMRT-Experimente, so lässt sich relativ leicht herausstellen, ob die zugehörigen Gehirnareale als signifikant ausgewiesen werden. Ist dies der Fall, so kann darin eine generelle Validierung des Messverfahrens gesehen werden. In diesem Sinne verwenden fMRT-Untersuchungen bspw. zur Abbildung des Broca-Areals (Sprachproduktion) Sprachparadigmen, präsentieren Gesichter und finden Aktivierungen im fusiformen Gyrus (Gesichterverarbeitung), konfrontieren Probanden mit einem erhöhten visuellen Verarbeitungsaufwand und berichten Aktivierungen im visuellen Cortex, bitten um das Bewegen der beiden Hände und registrieren erhöhte Aktivierungen im primären motorischen Cortex und verwenden verschiedene Geräusche, um Neurone im primären auditorischen Cortex zu stimulieren. Faktisch lassen sich derartige Ergebnisse sehr gut über die fMRT abbilden und auch replizieren. Dies

spricht für die generelle Güte von fMRT-Daten, indem in diesen grundlegenden fMRT-Ergebnissen eine deutliche Verbindung zu verschiedenen Prozessen und Handlungen zum Ausdruck kommt. Diese disziplinenübergreifenden Befunde zeigen, dass das zugrunde liegende BOLD-Signal einen guten Indikator für neuronale Aktivität darstellt und fMRT-Ergebnissen somit eine generelle Aussagekraft attestiert werden kann.

Als weitere konkrete Argumente für die Aussagekraft der fMRT können alle Studien genannt werden, die bereits beim Thema Gedankenlesen dargestellt wurden. Es gelingt ihnen zwar nicht, von der Möglichkeit des Gedankenlesens zu überzeugen. Doch jede einzelne Studie bringt auf ihre Art die Güte von fMRT-Daten zum Ausdruck.¹⁰⁴⁷ Um kurz die beiden prägnantesten Beispiele noch einmal zu erwähnen, sei an die Studien von Nishimoto et al. und Schoenmakers et al. erinnert. Im Rahmen dieser Untersuchungen gelang es gesehene Filmsequenzen bzw. gelesene Buchstaben in einem gewissen Maße auf Grundlage der fMRT-Daten zu rekonstruieren. Wäre das BOLD-Signal nicht in der Lage, Gehirnaktivität abzubilden, so sollten derartige komplexe Rekonstruktionen nicht möglich sein.

Ein weiteres Indiz für die grundlegende Aussagekraft von fMRT-Daten besteht darin, dass die fMRT trotz beschriebener und noch zu beschreibender Limitationen bereits ihre Leistungsfähigkeit in der klinischen Anwendung gezeigt hat. Neben dem Einsatz der MRT zur Detektion von beschädigtem bzw. schädlichem Gewebe, wie z.B. Hirntumoren, oder der fMRT zur Aufdeckung von funktionellen Schädigungen im zentralen Nervensystem wird die fMRT teilweise auch im Zusammenhang mit der sog. Neuronavigation¹⁰⁴⁸ eingesetzt. Bei der Neuronavigation handelt es sich um eine Operationshilfe, die einem Neurochirurgen die Planung, Durchführung und Orientierung vor und während eines Eingriffes deutlich erleichtert. Unter anderem ist über die Einbeziehung von funktionellen Messungen eine präzise Orientierung in Bezug auf den Kopf des Patienten und das interessierende Gewebe möglich. Durch die Koregistrierung der im Vorfeld erhobenen Gehirndaten mit einem Navigatordatensatz kann der schnellste Zugangsweg geplant und überdies wichtige intakte funktionale Gehirnbereiche beim Eingriff geschont werden. Relevant im Zusammenhang mit der Neuronavigation sind allein die probandenspezifischen fMRT-Daten, interessant ist folglich lediglich die Einzelanalyse. Im Sinne einer speziellen präoperativen fMRT-Diagnostik werden fMRT-Messungen vor allem zur Lokalisation von motorischen, sensorischen oder Spracharealen verwendet.¹⁰⁴⁹ Außerhalb von Operationen wird die fMRT auch im Rahmen der sog. TMS-Therapie¹⁰⁵⁰ eingesetzt. Hierbei werden verschiedene Krankheitsbilder, unter anderem auch Depressionen, über die Stimulierung entsprechender Gehirnregionen mittels eines kurzen Magnetfeldes behandelt.

¹⁰⁴⁷ vgl. Kapitel 8.1.1 Anmerkungen zum Gedankenlesen

¹⁰⁴⁸ vgl. Kuhnt, D.; Bauer, M. H. A.; Nimsky, C. (2013), S. 258 f.; Brockmöller, T. (2010)

¹⁰⁴⁹ vgl. Kuhnt, D.; Bauer, M. H. A.; Nimsky, C. (2013), S. 261 f.

¹⁰⁵⁰ vgl. <http://www.smartbrainandhealth.com/fmri.html> (abgerufen am 21.10.2014); <http://www.smartbrainandhealth.com/tms.html> (abgerufen am 21.10.2014)

Auch im Zuge der TMS-Therapie werden fMRT-Daten zur besseren Lokalisation der relevanten Gehirnregionen verwendet.

Messungen besitzen generell eine hohe Relevanz, da nur über Messungen die Gültigkeit bzw. die Qualität von Theorien bzw. Aussagen überprüft werden können. Ohne Überprüfungen bleiben Theorien nur Überlegungen ohne Anspruch auf Gültigkeit. Im Zusammenhang mit Theorien bestehen grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Entweder ist eine Theorie korrekt und kann gewisse Phänomene aus der Realität erklären oder nicht. Die Entscheidung über die Gültigkeit einer Theorie ist jedoch nicht immer trivial. Im schlechtesten Fall ist eine Theorie inhaltlich korrekt, allerdings kann dies aufgrund schlechter Messungen nicht herausgestellt werden. Im Ergebnis wird die Theorie verworfen, obwohl sie inhaltlich richtig ist. Um diese Situation zu vermeiden, ist man an aussagekräftigen Messungen bzw. Messinstrumenten interessiert. Um derartige Messungen zu generieren oder um bestehende Messungen zu beurteilen, ist eine methodenkritische Auseinandersetzung im Zusammenhang mit den Messungen unabdingbar. In der Realität kann nicht von perfekten Messungen bzw. Messinstrumente ausgegangen werden. Die Existenz von gewissen Limitationen in Bezug auf eine Messung ist daher zu erwarten. Generell stecken Limitationen den Bereich ab, innerhalb dessen man sich bewegen und innerhalb dessen man Erkenntnisse gewinnen kann. Je nachdem, wie stark die Limitationen ins Gewicht fallen, kann es dazu führen, dass eine Messung abzulehnen ist. Dies muss aber nicht der Fall sein. In Bezug auf die fMRT wurden verschiedene potentielle Limitationen angesprochen. Einige konnten argumentativ relativiert werden, andere können durch entsprechende Vorgehensweisen berücksichtigt werden. Es bleiben aber auch einzelne Aspekte übrig, die generell oder aktuell nicht zu beheben sind und insofern Einschränkungen der Aussagekraft darstellen. Dieser Limitationen muss man sich bewusst sein. Dies bedeutet aber keinesfalls, dass die Arbeit mit fMRT-Daten generell in Frage zu stellen ist. Vielmehr erlaubt ihre Kenntnis eine realistische Einschätzung der Aussagekraft und einen seriösen Umgang mit den Studienergebnissen bzw. der Interpretation der Ergebnisbilder. Wie aus den Anmerkungen hervorgeht, wird, entgegen der kritischen Position, von der generellen Güte der Messung ausgegangen.

8.1.3 Anmerkungen zum Neuromarketing im weiteren Sinne

Vertreter des Neuromarketings im weiteren Sinne sind zwar generell der Ansicht, dass die fMRT ein interessantes Messverfahren darstellt und in Bezug auf den Grundlagenbereich bereits einige nützliche Erkenntnisse erbracht hat. Hinsichtlich ihrer Anwendung auf die speziellen und komplexen Problemstellungen aus der Marketingpraxis kommt man im Rahmen dieser Perspektive jedoch zu dem Schluss, dass die fMRT aufgrund verschiedener Limitationen und ihrer generell beschränkten Aussagekraft keinen Mehrwert liefert und in diesem Sinne keine Praxisrelevanz besitzt. In der Konsequenz wird deutlich vom Einsatz der kostenintensiven neurophysiologischen Messverfahren Abstand genommen. Trotz dieser Überzeugung wird an der Idee des Neuromarketings festgehalten, indem ein relativ breites Begriffsverständnis vertreten wird. Demnach ist Neuromarketing dadurch gekennzeichnet, dass es auf

bereits vorhandenes Wissen aus unterschiedlichen Disziplinen zurückgreift und dieses interdisziplinäre Wissen in Form praxistauglicher Ansätze nutzbar macht. Im Zuge der generierten Ansätze kommen keine neurophysiologischen Messverfahren zum Einsatz.¹⁰⁵¹ Im Unterschied zur generell kritischen Position stellt man hier nicht die generelle Güte der fMRT in Frage, sondern die Relevanz des Messverfahrens für die Marketingpraxis.

Diese Position kann zwar generell nachvollzogen werden, eine Zustimmung kann jedoch nur teilweise erfolgen. Im Zusammenhang mit den beiden besprochenen Positionen wurde bereits auf verschiedene Kritikpunkte in Bezug auf den Einsatz der fMRT und ihre generelle Aussagekraft eingegangen. An dieser Stelle sollen zunächst noch einige spezielle Kritikpunkte aus dieser Perspektive heraus diskutiert werden. Ein bekannter Vertreter des Neuromarketings im weiteren Sinne ist Häusel.¹⁰⁵² Häusel zeigte bereits 2007 verschiedene Kritikpunkte hinsichtlich der Auswertung von fMRT-Daten auf,¹⁰⁵³ die grundsätzlich noch bis heute zutreffen. Diesen Aspekten wird nicht widersprochen, allerdings stellen sie zum Großteil Limitationen dar, innerhalb derer es sich auf der einen Seite zu bewegen gilt und an denen auf der anderen Seite weitergearbeitet werden muss, um die Möglichkeiten in Hinblick auf die fMRT weiter zu verbessern.

Häusel führt als erstes den Fakt an, dass die Gehirnregionen, die über eine farbliche Markierung als signifikant aktiviert ausgezeichnet werden, in Wirklichkeit gar nicht aufleuchten. Vielmehr handelt es sich lediglich um die Visualisierung statistischer Kennwerte (z.B. signifikante t-Werte). Generell ist auf der einen Seite festzuhalten, dass die Verwendung statistischer Auswertungsverfahren im übertragenden Sinne der Messgrundlage, der Vorgehensweise, den Rahmenbedingungen und auch der Zielsetzung im Zusammenhang mit der fMRT geschuldet ist und daher eine Tatsache darstellt.¹⁰⁵⁴ Auf der anderen Seite kann angeführt werden, dass außer der qualitativen Forschung, die prinzipiell deskriptiver Natur ist, jegliche Art von Forschung auf Statistik beruht. Dieser Kritikpunkt kann folglich als genereller Kritikpunkt hinsichtlich der quantitativen Forschung angesehen werden, der aber in diesem Rahmen die wissenschaftliche Realität darstellt und somit unvermeidbar ist.

Kritisch in Bezug auf die Aussagekraft der fMRT sieht Häusel auch die generell hohe Komplexität der meisten Entscheidungsprozesse. Häusel verwendet den Vorgang der Anzeigenbewertung als Beispiel. Er beschreibt diesen Prozess als eine Kombination mehrerer emotionaler und rationaler Teilprozesse, wobei theoretisch für jeden einzelnen Aspekt eine eigene Untersuchung benötigt wird. Auch dieser Aussage kann nicht widersprochen werden. Vielmehr wurde ihr im Zuge der allgemeinen Ausführungen zur handlungstheoretischen Interpretation bereits Rechnung getragen,

¹⁰⁵¹ vgl. Kapitel 2.2.2.1 Neuromarketing im weiteren Sinne

¹⁰⁵² vgl. ebenda

¹⁰⁵³ vgl. Häusel, H.-G. (2007), S. 213 ff.

¹⁰⁵⁴ vgl. Kapitel 5 Die funktionelle Magnetresonanztomographie (fMRT)

indem die Arbeit mit Entscheidungsmodellen und mehreren systematisch verknüpften fMRT-Studien thematisiert wurde.¹⁰⁵⁵

Eine weitere Schwierigkeit liegt darin, dass unterschiedliche Personen die gleiche Aufgabe, bspw. das Einprägen der fünf Zahlen 3 - 6 - 0 - 1 - 3, theoretisch über unterschiedliche Herangehensweisen lösen können. So könnte sich Person A die einzelnen Zahlen merken, Person B hingegen könnte sich Winkelsumme (360) und Unglückszahl (13) abspeichern. Diese unterschiedlichen Lösungswege erzeugen wiederum unterschiedliche Gehirnaktivierungen. Auch hinsichtlich dieses Kritikpunktes muss Häusel generell Recht gegeben werden. Allerdings gilt es im Rahmen einer fMRT-Studie genau derartige Situationen durch ein gut durchdachtes experimentelles Design und über ausgiebiges Pretesten im Vorfeld der eigentlichen Untersuchung zu vermeiden.

Mit dem Begriff *local heterogeneity*¹⁰⁵⁶ beschreibt Häusel die Situation, dass ein konkretes Gehirnareal mit mehreren unterschiedlichen Aufgaben in Verbindung gebracht werden kann, was die Interpretation einer gefundenen Gehirnaktivierung theoretisch erheblich erschwert. Wie bereits bei der Auseinandersetzung mit der neuronalen Interpretation dargelegt wurde, kann Multifunktionalität als die Regel und nicht die Ausnahme angesehen werden.¹⁰⁵⁷ Die eigene neuronale Interpretation des Kontrastes SA-Signal vs. kein SA-Signal kann als gutes Beispiel dafür verwendet werden, wie mit einer derartigen Situation umzugehen ist.¹⁰⁵⁸ Mit der berichteten Aktivität der anterioren Insula lag der beschriebene Fall einer *local heterogeneity* vor. Über eine aufwendige aber zielführende Aufarbeitung des neuronalen Hintergrundwissens wurde die neuronale Interpretation für die Aktivierung der anterioren Insula ermöglicht.

Mit der Gegenüberstellung der Begriffe Kovarianz und Konnektivität weist Häusel auf eine zentrale Limitation hinsichtlich der Interpretation von fMRT-Daten hin.¹⁰⁵⁹ Ist im Ergebnis eines fMRT-Kontrastes nicht nur ein Gehirnareal signifikant aktiviert, sondern mehrere Regionen so spricht man von Kovarianz, da die unterschiedlichen Aktivierungen demselben Kontrast zugeordnet werden. Wie die einzelnen Bereiche untereinander verknüpft sind bzw. in welcher kausalen Abhängigkeit sie stehen, kann allerdings nicht aus der Gehirnabbildung mit den farblich markierten Aktivierungen herausgestellt werden. Man kann sich hierzu kurz vorstellen, dass im Ergebnis einer fMRT-Studie bspw. zwei Gehirnbereiche (A und B) eine signifikante Aktivierung aufweisen. Was kommt in diesem Aktivierungsmuster zum Ausdruck? Denkbar wäre zum einen, dass A und B keine funktionelle Verbindung aufweisen. Zum anderen wäre auch denkbar, dass A B stimuliert bzw. könnte B genauso gut A stimulieren. Eine letzte Option besteht darin, dass A B hemmt oder B eine hemmende Wirkung auf A besitzt. Bereits anhand von zwei aktivierten Regionen kann man die mögliche Komplexität erahnen. Es kann zwar abgebildet werden, dass mehrere Areale aktiviert sind. Ob sie zusammenspielen und wenn ja wie, kann jedoch nicht aus den Ergeb-

¹⁰⁵⁵ vgl. Kapitel 7.2.1 Generelle Überlegungen zur handlungstheoretischen Interpretation

¹⁰⁵⁶ vgl. Häusel, H.-G. (2007), S. 216

¹⁰⁵⁷ vgl. Kapitel 7.1.1 Generelle Überlegungen zur neuronalen Interpretation

¹⁰⁵⁸ vgl. Kapitel 7.1.2 Neuronale Interpretation für den Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal

¹⁰⁵⁹ vgl. Häusel, H.-G. (2007), S. 216

nissen einer fMRT-Untersuchung gefolgert werden. Oft zeigen nicht nur ein bzw. zwei Gehirnbereiche eine Kovarianz, sondern mehrere. Dies macht die Interpretation noch schwieriger. Erschwerend kommt hinzu, dass verschiedene Prozesse sowohl in einer linearen Abfolge als auch parallel verarbeitet werden können. Die beschriebene Limitation spricht im Speziellen eine Grenze hinsichtlich der Ergebnisdarstellung bzw. der Information an, die in den Ergebnisbildern steckt. Dieser Sachverhalt bringt eine Grenze in Bezug auf die inhaltliche Auflösung der fMRT-Daten zum Ausdruck. Die Kenntnis über diese funktionalen Zusammenhänge zwischen einzelnen Gehirnstrukturen ist äußerst interessant und von immenser Bedeutung für das Verständnis der neuronalen Ebene. In diesem Bereich steckt die Forschung allerdings noch in den Kinderschuhen. Die aktuelle Situation kann durch ein fehlendes Verständnis bzw. Wissen über die tatsächlichen Zusammenhänge der neuronalen Aktivierungen beschrieben werden. Noch sind viele Funktionszusammenhänge ungeklärt. In Bezug auf diese Limitation kann sich erneut nur der Ausführung von Häusel angeschlossen werden. Diese Begrenzung gehört aktuell immer noch zur fMRT-Realität. Gelingt es, die funktionellen Zusammenhänge aufzudecken, würde dies in Bezug auf das Gesamtverständnis einen großen Entwicklungsschritt bedeuten.

Einerseits stellen einige der beschriebenen Kritikpunkte Einschränkungen hinsichtlich der Interpretation von Hirnscans dar, die aus verschiedenen Gründen nicht behoben werden können und in diesem Sinne in Kauf genommen werden müssen. Andererseits existieren auch einige potenzielle Beschränkungen, die mit Hilfe geeigneter Maßnahmen kompensiert werden können. Die einzelnen Kritikpunkte sind definitiv dazu geeignet, deutlich zu machen, dass hinsichtlich der fMRT einige Limitationen bestehen und es auch noch einige Herausforderungen zu bewältigen gilt. Realistisch gesehen, ist die inhaltliche Auflösung der fMRT begrenzt. Trotz der verschiedenen Limitationen und Herausforderungen, finden sich genügend Argumente, die in der Lage sind, die praxis- und theoriebezogenen Möglichkeiten im Zusammenhang mit dem Einsatz der fMRT im Bereich des Marketings zum Ausdruck zu bringen.

Durch den Einsatz der fMRT im Marketing kann zum einen bestehendes Wissen noch stärker fundiert werden als ohne Berücksichtigung der Gehirnaktivierungsdaten. Als Beispiele sind die Studien von *Plassmann, Kenning & Ahlerl*¹⁰⁶⁰, *Kenning et al.*¹⁰⁶¹ und *McClure et al.*¹⁰⁶² zu nennen. In der zuerst genannten Studie ging es um den neuronalen Unterschied zwischen loyalen und disloyalen Kunden. Im Ergebnis konnte eine starke Emotionalisierung der loyalen Kunden herausgestellt werden. Zusätzlich fanden sich auch Aktivierungen, die mit selbstreferentiellen Informationsverarbeitungsschritten verbunden sind. Aus diesem Ergebnis kann abgeleitet werden, dass es im Rahmen der Kundenbindung vor allem darum geht, Möglichkeiten für emotionale Bindungen zum Unternehmen bzw. zum Brand zu schaffen. *Kenning et al.* beschäftigten sich mit den Aktivierungsmustern, die der Wahrnehmung attraktiver Print-Werbung zu Grunde liegen. Sie berichten, dass attraktive Werbeanzeigen mit

¹⁰⁶⁰ vgl. Kapitel 2.2.2.2 Neuromarketing im engeren Sinne

¹⁰⁶¹ vgl. ebenda

¹⁰⁶² vgl. ebenda

einer Aktivierung im Belohnungszentrum und in diesem Sinne mit einer emotionalen Verarbeitung einhergehen. In einer Studie von *McClure et al.* konnte gezeigt werden, dass starke Marken wie auch loyale Kunden und attraktive Werbeanzeigen vor allem in ihrer starken Emotionalisierung zum Ausdruck kommen.

Zum anderen können bestehende Theorien, die zum Teil auch in der Praxis als Standard akzeptiert werden, in Frage gestellt werden, was in einigen Bereichen zu einem Umdenken führen kann. Das Marketingparadigma des Relevant Set¹⁰⁶³ kann hierfür als Beispiel verwendet werden. Wie bereits in Kapitel 2 beschrieben, geht es beim Relevant Set um die Vorstellung, dass alle Produkte einer Produktkategorie grundlegend in zwei Kategorien unterteilt werden können. Differenziert wird zwischen dem relevanten Bereich, also den Produkten, die theoretisch für einen Kauf in Frage kommen, und dem irrelevanten Bereich. Ferner wird davon ausgegangen, dass die Produkte im relevanten Bereich (Relevant Set) in Form einer kontinuierlichen Reihenfolge strukturiert sind. Auf Basis dieser Annahme geht es im strategischen Marketing darum, mit Hilfe unterschiedlicher Marketingaktivitäten Stück für Stück in der Rangliste nach oben zu rücken. Gegen die Vorstellung einer kontinuierlichen Rangfolge können die Studien von *McClure et al.*¹⁰⁶⁴ und *Deepe et al.*¹⁰⁶⁵ angeführt werden. Im Rahmen ihrer Studie verglichen *McClure et al.* die neuronale Markenwirkung von Coca-Cola mit der von Pepsi. Es gelang ihnen, einen deutlichen Unterschied zwischen beiden Marken herauszustellen. Im Gegensatz zur schwächeren Marke (hier: Pepsi) ist die starke Marke (hier: Coca-Cola) zum einen in der Lage stark zu emotionalisieren. Zum anderen sind auch Gehirnbereiche aktiviert, die mit Markenwissen in Verbindung stehen. Wird ein Proband mit der schwächeren Marke konfrontiert, passiert nichts dergleichen. Fast zeitgleich beschäftigten sich *Deepe et al.* mit einer vergleichbaren Fragestellung. Hier ging es auch um den Vergleich zwischen unterschiedlichen Marken, wobei im Rahmen dieser Untersuchung auch die Lieblingsmarke berücksichtigt werden konnte. Getestet werden konnte hier folglich die Lieblingsmarke gegen alle restlichen Marken derselben Produktkategorie (Kaffee bei Frauen bzw. Bier bei Männern). *Deepe et al.* berichteten ähnliche Ergebnisse wie *McClure et al.*, auch sie fanden eine starke Emotionalisierung i.V.m. der Lieblingsmarke. Zusätzlich zu einer erhöhten Aktivierung des Belohnungszentrums konnten sie allerdings noch eine kortikalen Entlastung beobachten, d.h. dass in Bereichen die mit dem Arbeitsgedächtnis, Planung und allgemeinen Denkprozessen zu tun haben, eine signifikante Deaktivierung vorlag. Die Unterdrückung kognitiver Prozesse und die Emotionalisierung durch die Lieblingsmarke wurden als First-Choice-Brand-Effekt bzw. Winner-Take-All-Effekt bezeichnet. Im Resümee berichten *McClure et al.* deutliche Unterschiede zwischen starken und schwachen Marken. *Deepe et al.* finden noch gravierendere Unterschiede zwischen der Lieblingsmarke und allen anderen Marken. Durch diese Erkenntnisse wird eine kontinuierliche Rangfolge der Marken innerhalb eines Relevant Set stark in Frage gestellt. Es sieht eher so aus, als ob zwischen der jeweiligen Nr. 1 und dem Rest ein sehr großer Abstand liegt. Vertritt man diese An-

¹⁰⁶³ vgl. Kapitel 2.2.2.1 Neuromarketing im weiteren Sinne

¹⁰⁶⁴ vgl. Kapitel 2.2.2.2 Neuromarketing im engeren Sinne

¹⁰⁶⁵ vgl. ebenda

sicht hinsichtlich des Relevant Set, so ist es weniger von Belang mit verschiedenen Marketingaktivitäten bei vielen Konsumenten von Platz 4 auf Platz 3 vorzurücken. Vielmehr geht es darum, mit wenigen aber gezielten Maßnahmen, diejenigen zu erreichen, bei denen die Chance auf Platz 1 besteht. Das AIDA-Modell der Werbewirkung¹⁰⁶⁶ ist ein weiteres Beispiel für ein Marketingparadigma, das durch Befunde aus dem Bereich des Neuromarketing in Frage gestellt wird. Neben der Betrachtung der Werbewirkung als lineare Abfolge verschiedener Prozesse besteht die Kernaussage darin, dass man die Aufmerksamkeit der Konsumenten erlangen muss, damit Werbewirkung überhaupt entstehen kann. Demzufolge kann ohne Aufmerksamkeit keine Wirkung erzeugt werden. Ungeachtet dessen, dass das AIDA-Modell in der Wissenschaft als veraltet und überholt angesehen wird, findet es in der Praxis im Rahmen verschiedener Pretestverfahren immer noch Berücksichtigung. Die fMRT-Studie von *Tusche, Bode & Haynes*¹⁰⁶⁷ setzte sich mit der Frage auseinander, ob die Beurteilung eines Objektes und damit in Verbindung stehende Verarbeitungsprozesse auf eine bewusste Verarbeitung angewiesen sind. Im Ergebnis konnte die Willingness to buy in gleicher Weise bei bewusster wie auch bei unbewusster Konfrontation mit den Zielprodukten durch Gehirnaktivierungen vorhergesagt werden. Dies spricht dafür, dass eine bewusste Wahrnehmung bzw. Aufmerksamkeit nicht zwingend erforderlich ist, damit eine Wirkung entsteht. Diese Feststellung stützt gleichzeitig das Konzept des Product Placement, in dessen Rahmen Produkte bzw. Marken gezielt im Hintergrund bzw. beiläufig in unterschiedlichen Medien eingebaut werden.

Des Weiteren sind fMRT-Studien generell in der Lage zu neuen bzw. tiefergehenden Erkenntnissen zu kommen, die ohne den Einsatz der fMRT nicht hätten abgebildet werden können. Die bereits angesprochenen fMRT-Studien von *McClure et al.*, *Deepe et al.* und *Tusche, Bode & Haynes* können auch in diese Kategorie eingeordnet werden, da ihre konkreten Ergebnisse nur schwer ohne neurophysiologische Messverfahren erfassbar sind. Als ein weiteres sehr anschauliches Beispiel für eine fMRT-Studie, die tiefgehende Einblicke in die inneren Prozesse des Konsumenten gestattet, ist die Untersuchung von *Plassmann et al.*¹⁰⁶⁸ zu nennen. Bei dieser Studie wurde der Einfluss des Preises auf die erfahrene Zufriedenheit hinsichtlich konsumierter Weine untersucht. Im Laufe des Experiments wurden Probanden hierzu unwissentlich dieselben Weine mit unterschiedlichen Preisen zugeführt. Als Ergebnis der Untersuchung konnte festgestellt werden, dass die erfahrene Zufriedenheit bei den als teuer ausgezeichneten Versionen eines Weines signifikant höher war. Interessant war vor allem, dass trotz der erhöhten geäußerten Zufriedenheit mit einem teureren Wein keine erhöhte Aktivierung in den Arealen zu verzeichnen war, die den Geschmacksinn repräsentieren. Die erfahrene Zufriedenheit konnte folglich als eine mentale Konstruktion im Gehirn des Konsumenten herausgestellt werden. Diesen Placebo-Effekt hätte man ohne die fMRT nicht abbilden können. Auch die Studie von *Erk et al.*¹⁰⁶⁹ kann an dieser Stelle erwähnt werden. Untersucht wurde hier inwiefern

¹⁰⁶⁶ vgl. Kapitel 2.2.2.1 Neuromarketing im weiteren Sinne

¹⁰⁶⁷ vgl. Kapitel 2.2.2.2 Neuromarketing im engeren Sinne

¹⁰⁶⁸ vgl. ebenda

¹⁰⁶⁹ vgl. ebenda

sich die Verarbeitung unterschiedlicher Autotypen auf der neuronalen Ebene auswirkt. Zum einen konnte herausgestellt werden, dass Sportwagen im Vergleich zu den anderen Autotypen eine erhöhte Aktivierung in Teilen des Belohnungszentrums auslösten. Besonders deutlich war der Unterschied beim Vergleich mit Kleinwagen. Dies kann auf die soziale Bedeutung von Sportwagen in ihrer Rolle als Statussymbole zurückgeführt werden. Zum anderen wurde hinsichtlich der Wahrnehmung von Sportwagen, die durchweg als am attraktivsten beurteilt wurden, zusätzlich eine Aktivierung des fusiformen Gyrus berichtet. Diese Gehirnregion ist auf die Verarbeitung von Gesichtern spezialisiert. Die attraktiven Fronten der Sportwagen wurden wie Gesichter wahrgenommen. Aus diesem Ergebnis gepaart mit Äußerungen einiger Probanden, dass die Frontlichter teilweise einen augenähnlichen Eindruck vermittelten, wurde für die Praxis abgeleitet, dass das Design der Autofront generell, aber auch die frontale Darstellung eines Autos im Rahmen von Werbe- bzw. Verkaufsmaterialien, relevante Beurteilungskomponenten darstellen. Dieser Sachverhalt wurde bereits in die Praxis aufgenommen und zeigt sich auch in den unterschiedlichen Autofronten der einzelnen Automarken. Mittlerweile wurde die beschriebene Erkenntnis auch auf das Design des Autohecks übertragen.

Der Einsatz der fMRT im Bereich des Marketings erzeugt einen Mehrwert sowohl in theoretischer wie auch praktischer Hinsicht. Sicherlich existieren in Bezug auf die Praxis und die damit teilweise einhergehende hohe Komplexität Grenzen, dennoch kann die Verwendung der fMRT in einigen Bereichen durchaus von Nutzen sein.

8.1.4 Anmerkungen zum Neuromarketing im engeren Sinne

Die Vertreter dieser Position verbinden eine sehr hohe Aussagekraft mit der fMRT. Sie sind der Meinung, dass Gehirnaktivität über dieses Messverfahren räumlich und zeitlich adäquat abbildbar ist. Die Aspekte der Messung, Analyse und Interpretation der Aktivierungsdaten werden meist stark vereinfacht dargestellt. Wenn auf kritische Punkte eingegangen wird, dann meistens eher oberflächlich. Im Ergebnis existieren bereits sehr viele fMRT-Studien, die teilweise zu weitreichenden Schlussfolgerungen gelangen. Die Abbildung der farblich markierten Gehirnschichten und deren Interpretation erscheinen für den Laien trivial und sehr plausibel. Die Möglichkeit der Übertragung der gemessenen Gehirnaktivierungen auf die Verhaltensebene wird in der Folge ebenfalls als unproblematisch dargestellt.

Auf der einen Seite wird die Position des Neuromarketings im engeren Sinne insofern geteilt, als dass dem Einsatz der fMRT im Bereich des Marketings im Speziellen, und auch generell, hinsichtlich ihres Nutzens und ihrer Möglichkeiten positiv gegenüber gestanden wird. Argumente für die generelle Aussagekraft der fMRT können den Ausführungen im Zusammenhang mit den beiden ersten Positionen entnommen werden. Die eigene Position bezogen auf die speziellen Möglichkeiten im Bereich des Marketings kommt in den Anmerkungen zur Position des Neuromarketings im weiteren Sinne zum Ausdruck. Diesbezüglich wurden verschiedene Aspekte und Beispiele herausgearbeitet, welche die Leistungsfähigkeit des Verfahrens sowohl in praktischer wie auch in theoretischer Hinsicht andeuten. Auf der anderen Seite exis-

tieren jedoch auch einige zentrale Einschränkungen, auf die im Nachfolgenden noch eingegangen werden muss. Die angesprochene starke Vereinfachung ist zwar sehr sinnvoll, um in diese komplexe Thematik einzuführen. Bei der Beurteilung der fMRT ist diese Vereinfachung allerdings wenig förderlich. Neben der vereinfachten Darstellung des Messverfahrens und der einzelnen Teilschritte des komplexen Gesamtprozesses wird meist auch die neuronale Struktur von Verhalten und Entscheidungen, also der Phänomene auf die sich die Aktivierungsdaten letztendlich beziehen, stark vereinfacht dargestellt. Dies verhindert eine realistische Beurteilung. In der Konsequenz aus diesen Sachverhalten wird in den meisten Fällen hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der fMRT zu viel versprochen bzw. in einigen Darstellungen übertrieben. Die im Rahmen von fMRT-Studien generierten farblichen Gehirnabbildungen sprechen nicht für sich selbst, sie müssen interpretiert werden. Je nach Eindeutigkeit des Kontrastinhaltes und den gemeldeten Gehirnaktivierungen sind Interpretationen in Bezug auf die neuronale Ebenen nicht trivial und eine Übertragung der Aktivierungsdaten auf die Verhaltensebene ist nicht möglich. Das Bild einer einfachen Interpretierbarkeit und leichten Übertragung der Ergebnisse einer fMRT-Untersuchung auf die Verhaltensebene entspricht in den meisten Fällen nicht der Realität. Dieser Aspekt wurde bereits ausführlich am Beispiel der Interpretation der eigenen fMRT-Untersuchung zur neuronalen Wirkung von Sonderangebotssignalen im Rahmen von Kaufentscheidungen thematisiert.¹⁰⁷⁰ Im Zusammenhang mit der eigenen Untersuchung wurde zwischen der neuronalen und der handlungstheoretischen Interpretation unterschieden. An dieser Stelle werden noch einmal die zentralen Aspekte hinsichtlich beider Interpretationsebenen aufbereitet.

Bei der *neuronalen Interpretation* geht es darum herauszufiltern, was eine Aktivierung in Bezug auf einen konkreten Kontrast zum Ausdruck bringt. Im Zuge der Interpretationslogik wurde der Schwierigkeitsgrad hinsichtlich der neuronalen Interpretation eines fMRT-Kontrastes anhand von zwei Einflussgrößen charakterisiert. Für die Interpretation macht es einen Unterschied, ob der zu untersuchende Kontrastinhalt in Bezug auf die Valenz bzw. Auslegung gerichtet oder ungerichtet ist. Zudem spielt es eine Rolle, ob eine signifikant aktivierte bzw. deaktiverte Gehirnregion eine spezifische oder eine unspezifische Multifunktionalität aufweist. Jeder der vier möglichen Konstellationen aus der Kombination der beiden Einflussgrößen ist denkbar. So gibt es relativ einfache zu interpretierende Kontraste, aber auch aufwendigere Interpretationen. Einzelne Gehirnareale nehmen seltener nur eine spezifische Aufgabe wahr. I.d.R. werden sie mit unterschiedlichen Aufgaben assoziiert. Je nach dem konkreten experimentellen Design begegnet man, wie auch im Rahmen der eigenen Untersuchung, nicht nur einfachen Kontrasten. In diesem Fall ist eine adäquate Interpretation ohne einen gut aufbereiteten Bezugsrahmen nur schwer denkbar, stellt das neuronale Hintergrundwissen doch die Basis einer jeden neuronalen Interpretation dar. Die eigene Untersuchung bietet mit der Interpretation des Kontrastes SA-Signal vs. kein SA-Signal ein sehr anschauliches Beispiel anhand dessen die Wichtigkeit des Hintergrundwissens deutlich herausgestellt werden kann. Der betrachtete Kontrast stellt

¹⁰⁷⁰ vgl. Kapitel 7 Interpretationslogik

nach der beschriebenen Systematik den schwersten denkbaren Fall hinsichtlich einer neuronalen Interpretation dar. Erst auf der 3. Abstraktionsebene konnte ein Muster aufgedeckt werden, das den gemeinsamen Nenner aller, in die Betrachtung einfließenden, Studien beschreibt. Die Aktivierung der anterioren Insula konnte als arousalabhängig und valenzunabhängig herausgestellt werden. Diese grundlegende Interpretation war nicht nur in der Lage, alle gefundenen Aktivierungen in den unterschiedlichen Kontexten zu erklären. Es ist mit ihrer Hilfe des Weiteren möglich, ungeklärte Phänomene, wie z.B. bei der Studie von *Kosslyn et al.*,¹⁰⁷¹ plausibel zu erklären. Das eigene Beispiel zeigt die Wichtigkeit, den Mehrwert aber auch den Bedarf eines ausführlich recherchierten neuronalen Bezugsrahmens. Die Situation im Zusammenhang mit der anterioren Inselrinde ist übertragbar auf andere Gehirnareale, die auch mit verschiedenen Funktionen bzw. Prozessen in Verbindung gebracht werden. Es existiert zwar bereits eine große Masse an fMRT-Studien, doch die grundlegenden Bedeutungen der unterschiedlichen Aktivierungen stehen meistens nicht im Vordergrund. Vielmehr wird eine Aktivierung prinzipiell in Bezug zum im Speziellen betrachteten Kontrast interpretiert. Ein zukünftiges Ziel im Bereich des Neuromarketing im engeren Sinne ist daher in der expliziten Herausstellung der grundlegenden Bedeutungen bestimmter Aktivierungen zu sehen. Nur auf diese Weise ist eine tiefere Interpretation eines konkreten Kontrastes möglich. Eine neuronale Interpretation ist zwar generell auch vor dem Hintergrund eines schwachen neuronalen Bezugsrahmens möglich, doch der tatsächliche Grund für eine Aktivierung kann auf diese Weise nicht erfasst werden. In der Studie von *Knutson et al.*¹⁰⁷² wird bspw. die Aktivierung der anterioren Insula mit der Verarbeitung exzessiver Preise bzw. Preis-schmerz verbunden. Das mag für den konkreten Fall mehr oder weniger genau zutreffen, doch diese Erklärung hilft nur bei dem betrachteten Kontrast weiter. Andere fMRT-Studien, die eine Aktivierung der anterioren Insula berichten, können hiermit nicht erklärt werden. Genau dies soll mit einem ausführlich recherchierten neuronalen Bezugsrahmen ermöglicht werden. Diese grundlegenden Bedeutungen von Gehirnaktivierungen sind bei Weitem noch nicht aufgearbeitet bzw. einheitlich erfasst. Die Qualität der neuronalen Interpretationen kann nur dadurch verbessert werden, dass das Hintergrundwissen weiter aufgearbeitet wird. Auf der Grundlage eines fundierten neuronalen Hintergrundwissens kann anschließend ein besseres Gesamtverständnis erlangt werden.

Die Gedanken zur neuronalen Interpretation sind in gewisser Weise an die im Kritischen Rationalismus vertretene Position der schwachen Form der Duhem-Quine-These angelehnt, wonach „eine Theorie immer nur vor dem Horizont anderer Theorien überprüft werden kann, deren Gültigkeit in den jeweiligen Überprüfungskontext als unproblematisch vorausgesetzt werden muß.“¹⁰⁷³ Für den Prozess der neuronalen Interpretation bedeutet dies bspw., dass alle bisherigen fMRT-Untersuchungen, die eine Aktivierung der anterioren Insula berichtet haben, mit ihren Ergebnissen den Hintergrund bilden, vor dem es das Ergebnis des Kontrastes SA-Signal vs. kein SA-

¹⁰⁷¹ vgl. Kapitel 7.1.2 Neuronale Interpretation für den Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal

¹⁰⁷² vgl. Knutson, B. et al. (2007)

¹⁰⁷³ Kappelhoff, P. (2000), S. 23

Signal zu interpretieren gilt. Wurden die Studien falsch bzw. fehlerhaft interpretiert, so ist auch der darauf aufbauende neuronale Bezugsrahmen fehlerhaft und demzufolge auch die Interpretation des Kontrastes. *„Auch diese Hintergrundtheorien sind natürlich grundsätzlich fallibel und müssen im Verlauf der Wissenschaftsentwicklung schrittweise verbessert werden. Die Wissenschaftsentwicklung ist also durch das parallele Arbeiten an verschiedenen Theorien, die zu einem gegebenen Zeitpunkt jeweils füreinander Hintergrundwissen darstellen charakterisiert. Das bedeutet, daß die Theorieentwicklung in einem bestimmten Bereich den Wissenschaftsfortschritt dadurch fördern kann, dass sich das für die Überprüfung der anderer Theorien zur Verfügung stehende Hintergrundwissen erweitert.“*¹⁰⁷⁴ Ein Beispiel, welches diese Aussage stützt, ist, dass durch die gründliche Aufarbeitung des Hintergrundwissens im Rahmen der eigenen fMRT-Untersuchung auch Phänomene erklärt werden können, die in vorangegangenen Studien (bspw. Kosslyn et al.) nicht zu erklären waren. Das Hintergrundwissen hat sich erweitert und in der Folge sind mehr Phänomene zu erklären als vorher. In Sinne der beschriebenen Wissenschaftsentwicklung wird durch das parallele Arbeiten an den grundlegenden Bedeutungen verschiedener Gehirnaktivierungen eine bessere Ausgangslage für nachfolgende Interpretationen geschaffen. Dies kann auch auf den größeren Zusammenhang übertragen werden. Erweitert sich das Wissen um die einzelnen Aktivierungen, so kann auch der Gesamtzusammenhang bzw. der Übertrag auf die Verhaltensebene adäquater erfolgen. Die Quintessenz in Bezug auf die neuronalen Interpretation lautet auf der einen Seite, dass man es keineswegs nur mit einfachen und trivialen Interpretation im Rahmen von fMRT-Studien zu tun hat. Die Interpretation kann sich je nach Ausgangslage teilweise sehr schwer gestalten. Auf der anderen Seite konnte über die eigene neuronale Interpretation aufgezeigt werden, wie auch diese komplexeren Interpretationen anzugehen sind. Hinsichtlich des neuronalen Hintergrundwissens besteht noch ausreichend Forschungsbedarf. Somit besteht eine wichtige zukünftige Aufgabe des Neuromarketings im engeren Sinne in der akribischen Arbeit am Hintergrundwissen in Bezug auf die grundlegende Bedeutung verschiedener Aktivierungen. Trotz dieses allgemeinen Nachholbedarfs zeigen die bereits dargestellten fMRT-Studien aus dem Bereich des Marketing, dass man auch heute schon zu interessanten Interpretationen kommen kann.

Die handlungstheoretische Interpretation beschäftigt sich damit, wie weit die Aussagekraft einer gefundenen neuronalen Aktivierung reicht. Es geht um die Antwort auf die Frage, inwiefern mit Hilfe von Gehirnaktivierungen Aussagen über eine generelle verhaltensbezogene Wirkung getroffen werden können. Faktisch beziehen sich die fMRT-Ergebnisse immer auf konkrete Kontraste, die isolierte Effekte abbilden. Aus diesem Grund besitzt eine einzelne fMRT-Untersuchung generell eine begrenzte Aussagekraft bezogen auf die handlungstheoretische Interpretation. Diese Interpretationslimitation gilt allerdings nicht nur speziell für neurowissenschaftliche Untersuchungen, sondern generell für wissenschaftliche Untersuchungen.

¹⁰⁷⁴ Kappelhoff, P. (2000), S. 23

In Bezug auf den Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal fällt es schwer, hinsichtlich der Handlungsebene etwas über die neuronale Interpretation Hinausgehendes, allein aus der Aktivierung der anterioren Insula, abzuleiten. Grund hierfür ist, dass der betrachtete Kontrast einen sehr allgemeinen Kontrast in Bezug auf die Wirkung von Sonderangebotssignalen darstellt. Im Zuge des Kontrastes werden die neuronalen Aktivierungen im Zusammenhang mit Kaufangeboten, die ein SA-Signal beinhalten, mit den neuronalen Aktivierungen verglichen, die in Folge eines Angebots ohne Auszeichnung als Sonderangebot entstehen. Das Ergebnis in Form der Aktivierung der anterioren Insula stellt eine robuste Aktivierung dar, da in den zu vergleichenden Bedingungen (SA-Signal vs. kein SA-Signal) mehrere Komponenten aggregiert werden. So befinden sich unter den Stimuli für beide Bedingungen Stimuli mit verschiedenen Preisen (günstig, normal, teuer) und auch Stimuli mit unterschiedlicher Anzahl an zu kaufenden Produkten (Einzelprodukt, mehrere Produkte). Gekaufte so wie nicht gekaufte Stimuli gehören ebenfalls gleichermaßen zu den Stimuli. Auf der einen Seite bedeutet dies, dass die gefundene Aktivierung relativ stabil ist. Auf der anderen Seite kann aufgrund der Aggregation der verschiedenen Komponenten innerhalb des allgemeinen Kontrastes keine spezifische Auswirkung auf die verhaltensbezogene Ebene herausgestellt werden.

Liegt der Fokus auf einer einzelnen fMRT-Studie, so kann die Ausgangssituation zum einen dadurch verbessert werden, dass man sich im Rahmen der Analyse auch mit spezifischen Kontrasten auseinandersetzt. Im Gegensatz zu allgemeinen Kontrasten werden hierbei nicht mehr alle Komponenten innerhalb eines Kontrastes aggregiert. Vielmehr werden gezielt interessante Komponenten im Sinne von Interaktionseffekten verbunden und innerhalb eines Kontrastes untersucht. Mit Hinblick auf die handlungstheoretische Interpretation und mit Bezug zur Wirkung von SA-Signalen können bspw. der Kontrast *gekauft + SA-Signal vs. gekauft + kein SA-Signal* oder auch der Kontrast *günstiger Preis + SA-Signal vs. teurer Preis + SA-Signal* im Vergleich zum allgemeinen Kontrast (SA-Signal vs. kein SA-Signal) zu konkreteren Aussagen in Bezug auf die Handlungsebene führen. Neben diesen beiden Beispielen für speziellere Kontraste sind weitere Kombinationen denkbar. Das Arbeiten mit spezifischen Kontrasten hat allerdings seine Grenzen. Je komplexer bzw. feiner die spezifischen Kontraste definiert werden, desto weniger Stimuli stehen für den Vergleich der zusammengestellten Bedingungen zur Verfügung. Je nach experimentellem Design einer Untersuchung variiert zwar die letztlich zur Verfügung stehende Anzahl an Stimuli, doch dies stellt eine generelle Einschränkung von fMRT-Studien dar. Wie bereits im Zuge von Kapitel 5 beschrieben, ist man aufgrund der relativ schwachen fMRT-Signale gezwungen, die Probanden mit vielen Stimuli zu konfrontieren.¹⁰⁷⁵ Daher versucht man auf der anderen Seite die Anzahl der Stimuli nicht unnötig zu erhöhen. Im Ergebnis liefert eine fMRT-Studie genügend Beobachtungen um die allgemeineren Kontraste abzubilden, doch meistens reichen die für die spezifischen Kontraste vorhandenen Beobachtungen nicht aus, um statistisch signifikante Aktivierungen herauszustellen. Bei der Betrachtung spezifischer Kontraste konnte hinsichtlich

¹⁰⁷⁵ vgl. Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

der eigenen Untersuchung keine signifikanten Aktivierungen berichtet werden. Generell besteht die Kunst der Planung von fMRT-Studien darin, mit möglichst einfachen experimentellen Designs, sprich wenig Bedingungen und jeweils wenig Variation innerhalb einer Bedingung, diejenigen Kontraste zu analysieren, die im Sinne der forschungsleitenden Fragestellung von Interesse sind. Je nach dem konkreten Ziel einer Studie kann es aber auch erforderlich sein, mit relativ komplexen Designs zu arbeiten, wie bspw. im Rahmen der eigenen fMRT-Untersuchung. Die eigene Untersuchung ist im Sinne einer Replikation mit leichten Modifikationen zu verstehen.

Allein mit Hilfe neuronaler Aktivierungsdaten kommt man nicht zwangsweise zu einem tieferen Verständnis. Eine weitere Möglichkeit, die Ausgangssituation für die handlungstheoretische Interpretation zu verbessern, besteht im Rückgriff auf weitere Daten, die unabhängig von den im Rahmen der neuronalen Interpretation betrachteten Gehirnaktivierungen vorliegen. Bei diesen weiteren Informationen kann es sich sowohl um im Zuge eines fMRT-Experiments mit aufgezeichnete Verhaltensdaten handeln, aber auch Befragungsdaten, die im Vorfeld oder Nachgang einer konkreten Studie erhoben wurden, können evtl. für die handlungstheoretische Interpretation von Nutzen sein. Des Weiteren ist ebenfalls denkbar, Daten von anderen neurophysiologischen Messverfahren (z.B. EEG) heranzuziehen, um zu aussagekräftigeren Ergebnissen zu gelangen. In den seltensten Fällen kann auf alle beschriebenen weiteren Informationen zurückgegriffen werden. Allerdings liegt immer zumindest eine zusätzliche Information vor. Im Anwendungsbeispiel der vorliegenden Arbeit konnten für die handlungstheoretische Interpretation die mit aufgezeichneten Verhaltensdaten bei der Interpretation der Daten berücksichtigt werden.

Die Verwendung von spezifischen Kontrasten und der Rückgriff auf weitere Informationen sind in der Lage, die Ausgangssituation für eine handlungstheoretische Interpretation zu verbessern. Im Zusammenhang mit der Abbildung und Erklärung der komplexen Prozesse in Bezug zur handlungstheoretischen Ebene stellen einzelne fMRT-Untersuchungen allerdings nur isolierte Teilkomponenten dar. Im übertragenen Sinne kann man sich fMRT-Ergebnisse verschiedener Forschungsgruppen auch als eindimensionale Informationen in einem mehrdimensionalen Entscheidungsraum vorstellen, die allerdings nicht aufeinander abgestimmt sind und daher auch nicht sauber aufeinander bezogen werden können. Für ein tieferes Verständnis und in diesem Sinne auch eine bessere Übertragung der fMRT-Ergebnisse auf die Verhaltens-ebene stellt das Arbeiten mit Bündeln von fMRT-Untersuchungen einen vielversprechenden Weg dar. Zunächst geht es hierbei darum, ein adäquates Modell hinsichtlich des Entscheidungsprozesses aufzustellen, da Verhalten mit dem Ergebnis einer Entscheidung gleichzusetzen ist. Kann man die Determinanten und deren Einfluss auf die Entscheidung herauskristallisieren, so kann auch Verhalten besser verstanden bzw. abgeleitet werden. Da Entscheidungsprozesse eine gewisse Komplexität aufweisen und auch je nach Ausgangssituation unterschiedliche Strukturen aufweisen können, ist es unabdingbar ein Grundmodell zu erstellen, das verschiedene Situationen und Komponenten berücksichtigt. Aufbauend auf dieser theoretischen Basis gilt

es, gute experimentelle Designs zu erstellen,¹⁰⁷⁶ die jeweils dazu geeignet sind, unterschiedliche Teilkomponenten des Entscheidungsprozesses abzubilden. Die einzelnen Studien sollen sich in Form ihrer konkreten Ausgestaltung aufeinander beziehen, damit ihre Ergebnisse anschließend im Sinne des Entscheidungsprozesses verknüpft werden können und auf diese Weise ein tieferes Verständnis ermöglichen. Nur mittels einer realistischen Modellvorstellung über die Strukturen bzw. Teilprozesse, deren Zusammenspiel Entscheidungen bzw. Handlungen generell charakterisieren und überhaupt möglich machen, kann eingeschätzt werden, inwieweit bzw. auf welche Weise fMRT-Daten in Bezug zur handlungstheoretischen Ebene zu interpretieren sind. Ohne diese Variante erscheint die Möglichkeit einer handlungstheoretischen Interpretation schwächer als sie in Wirklichkeit ist.

Zusammenfassend kann in Bezug auf die Position des Neuromarketings im engeren Sinne festgehalten werden, dass die Möglichkeiten der fMRT im Bereich des Marketings zwar generell positiv zu beurteilen sind und auch ein Mehrwert deutlich erkennbar ist. Man muss sich jedoch auch gewisser Limitationen bewusst sein, die zu der Schlussfolgerung führen, dass eine einfache Interpretation und eine unproblematische Übertragung der Ergebnisse auf die Verhaltensebene in vielen Fällen eher unwahrscheinlich sind. Im Sinne der Erhöhung der Aussagekraft wurden allerdings auch Möglichkeiten aufgezeigt, die faktisch vorhandenen Limitationen anzugehen.

8.2 Eigene Position und Ausblick

Nachdem zu jeder der vier Positionen Stellung bezogen wurde, gilt es zu guter Letzt die eigene Position hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der fMRT im Bereich des Marketings explizit darzustellen, bevor die Ausarbeitungen mit einem kurzen Ausblick abgeschlossen werden.

8.2.1 Eigene Position

Mit dem Ziel einer realitätsnahen methodenkritischen Beurteilung gilt es, im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein realistisches Bild im Zusammenhang mit der fMRT und ihrem Einsatz im Bereich des Marketings zu zeichnen. Aufbauend auf den Anmerkungen in Kapitel 8.1¹⁰⁷⁷ lassen sich die Möglichkeiten und Grenzen der fMRT im Marketingbereich ableiten.

In Hinblick auf die beiden Extrempositionen bleibt festzuhalten, dass keiner von beiden zugestimmt wird. Die *Position des Gedankenlesens* über fMRT-Daten wird ebenso wenig vertreten wie die *grundlegend kritische Haltung*, die die Güte der fMRT bezweifelt.

Der *Position des Neuromarketings im weiteren Sinne* wird teilweise zugestimmt, indem zum einen die Kritikpunkte angenommen werden und zum anderen kein konkre-

¹⁰⁷⁶ vgl. Kapitel 5.2 Grundlegendes zur fMRT-Messung

¹⁰⁷⁷ Kapitel 8.1 Stellungnahme zum Spannungsfeld

tes Potenzial der fMRT für die Ad-hoc-Marktforschung gesehen wird. Allerdings wird die generelle Ablehnung des Verfahrens in Bezug auf die Marketingpraxis nicht geteilt. Anhand der angesprochenen Studien konnten die Möglichkeiten aber auch einige Grenzen der Aussagekraft von fMRT-Ergebnissen im Bereich des Marketings aufgezeigt werden. Es sollte ersichtlich geworden sein, dass man nur über die Einbeziehung von Gehirnaktivierungen generell auf eine tiefere Ebene des Verstehens gelangen kann und zwar unabhängig davon, ob man dadurch bestehendes Wissen bestätigt oder in Frage stellt. Die verschiedenen Ergebnisse und die Erkenntnisse die aus ihnen gezogen werden können, sind ohne den Einsatz der fMRT i.d.R. nicht erfassbar. Über die fMRT können unbewusste Prozesse im zentralen Nervensystem abgebildet werden, die weder gewollt noch ungewollt manipulierbar sind. Verbal können diese Informationen von Probanden nicht geäußert werden. Der Einsatz der fMRT stellt daher im Sinne eines Multi-Method-Gedanken neben anderen Verfahren eine weitere Analysemöglichkeit dar, die eine neue Perspektive auf bestehendes Wissen ermöglicht.

Die beispielhaft vorgestellten fMRT-Studien sprechen verschiedene Bereiche des Marketing-Mix an. Es wurde auf Erkenntnisse in Bezug auf Marken (starke Marken und die Lieblingsmarke), Kundenbindung (loyalen Kunden), Kommunikationspolitik (Print-Werbeanzeigen und Product Placement), Preispolitik (Preiswirkungen auf die erfahrene Zufriedenheit) und Produktpolitik (Autofront in Anlehnung an Gesichter) eingegangen. Die Ergebnisse der einzelnen fMRT-Studien variieren in Bezug auf ihre Aussagekraft. Auf der einen Seite kommen Studien zu eher allgemeinen Schlussfolgerungen, indem sie die zentrale Rolle einer starken Emotionalisierung aufzeigen. Diese Tendenz zeigt sich in sehr vielen fMRT-Untersuchungen. Daneben existieren weitere fMRT-Studien, die mit ihren Ergebnissen auch bestehende Marketingparadigmen, z.B. das Relevant Set und das AIDA-Modell, stark in Frage stellen. Dies führt teilweise zu einem Umdenken auf der strategischen Ebene. Generell gesprochen können über die Erkenntnisse i.V.m. Gehirnaktivierungen Handlungsempfehlungen für die strategische Ebene abgeleitet werden. Auf der anderen Seite liefern einige fMRT-Studien auch speziellere Ergebnisse, die für die operative Ebene von Nutzen sind. Diese Studien unterstützen bspw. das Konzept des Product Placement, machen den Prozess der Preiswirkung auf die erfahrene Zufriedenheit transparenter oder empfehlen die Gestaltung von Autofronten in Anlehnung an Gesichter. Sowohl die Erkenntnisse in Bezug auf die strategische wie auch auf die operative Ebene können folglich für die Praxis nutzbar gemacht werden.

Neben diesen Möglichkeiten müssen allerdings auch die Grenzen der Aussagekraft von fMRT-Studien herausgestellt werden. Vor allem in der inhaltlichen Auflösung von fMRT-Daten ist eine Limitation zu sehen. Diese Limitation hat unterschiedliche Facetten und folglich auch unterschiedliche Hintergründe. Ein zentraler Grund für die begrenzte Aussagekraft liegt in dem Messverfahren der fMRT selbst. Aufgrund der Systematik der Messung¹⁰⁷⁸, die im Kern der Subtraktionslogik¹⁰⁷⁹ und der Tatsache ge-

¹⁰⁷⁸ vgl. Kapitel 5.2.2 Datenakquisition und Daten

¹⁰⁷⁹ vgl. Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

ringer Signalunterschiede¹⁰⁸⁰ geschuldet ist, können im Rahmen einer fMRT-Untersuchung nur einfache Kontraste betrachtet werden. Die Bearbeitung von komplexen Fragestellungen stellt folglich eine Limitation von fMRT-Untersuchungen dar. Die Kontraste, die untersucht werden sollen und die es in Form eines experimentellen Designs zu übersetzen gilt, dürfen nicht zu komplex sein. An dieser Stelle soll die Limitation kurz anhand der Analyse einer Werbeanzeige aufgezeigt werden. Eine konkrete Werbeanzeige ist relativ komplex insofern sie nicht nur aus einem Element besteht, sondern aus vielen verschiedenen Informationseinheiten (Farben, Helligkeit, Bilder, Text, Schriftart, ...). Für die sinnvolle Anwendung der fMRT ist es wichtig, zwei Bedingungen miteinander zu vergleichen, die sich nach Möglichkeit nur in einem Detail unterscheiden sollen. Auf diese Weise kann ein Aktivierungsunterschied genau diesem einen Detail zugeordnet werden. Geht es um die detaillierte Bewertung einer Werbeanzeige mit ihren einzelnen Elementen, so ist die fMRT nicht das passende Messinstrument. Für die Ad-hoc-Marktforschung, z.B. im Sinne eines Werbemitteltest, weist die Anwendung der fMRT keinen Mehrwert auf. Neben der Erhebungssystematik stellt auch das generelle Messergebnis einen Grund für die begrenzte Auflösung von fMRT-Daten dar. Die Studien zu starken Marken, Kundenloyalität und attraktiven Werbeanzeigen sind geeignete Beispiele, um die generelle Begrenzung zu verdeutlichen. Wie stark diese Begrenzung ins Gewicht fällt, hängt von dem jeweiligen Thema und dem experimentellen Design einer Studie ab. Die Erstellung eines adäquaten experimentellen Designs und des dazugehörigen Stimulusmaterials sind von entscheidender Bedeutung für den Erfolg und die Aussagekraft einer fMRT-Studie.¹⁰⁸¹ Generell ist es zwar möglich, zu erkennen, welche(s) Areal(e) aktiviert ist/ sind (WAS). Den genauen Prozess, der zu dieser Aktivierung führt (WIE bzw. WARUM), kennt man deshalb aber nicht zwangsläufig. Beim Vergleich von als attraktiv und unattraktiv bewerteten Printanzeigen ist es sehr unwahrscheinlich, dass sich die einzelnen Stimuli nur in einem Detail unterscheiden. In diesem Fall kann man zwar eine strategische Schlussfolgerung ziehen, aber eine detaillierte Analyse der unterschiedlichen Werbeanzeigen ist nicht möglich. Im Ergebnis können nur allgemeine Handlungsempfehlungen abgeleitet werden. Bei den Studien zur Kundenloyalität und zu starken Marken stellt sich die Situation ähnlich dar. Auch hier kann man das WAS darstellen und auch generelle Empfehlungen herausfiltern. Das genaue WIE bzw. WARUM, also die Frage danach, wie man die gefundene Aktivierung über konkrete Instrumente erzeugen kann, lässt sich auch in diesen beiden Studien nicht aus den fMRT-Ergebnissen ableiten. Dennoch können aus den Studienergebnissen strategische Aussagen gewonnen werden, die die zentrale Bedeutung der Emotionalisierung zum Ausdruck bringen. Man kann zwar das Ergebnis starker Marken, von Kundenloyalität bzw. attraktiven Werbeanzeigen sichtbar machen und darauf aufbauend zu strategischen Schlussfolgerungen kommen. Die Nebenrechnungen, die zum Ergebnis führen, kennt man allerdings nicht. Die Antworten auf die Fragen wie aus einer Marke eine starke Marke wird, wie aus einem Kunden ein loyaler Kunde wird und wodurch eine Werbeanzeige attraktiv wird, lassen

¹⁰⁸⁰ vgl. Kapitel 5.3.1 Signal und Rauschen

¹⁰⁸¹ vgl. Kapitel 5.2.1 Experimentelles Design

sich nicht in den erfassten fMRT-Daten finden. In diesem Sinne ist die inhaltliche Auflösung von fMRT-Daten in beschriebener Weise limitiert. Die generelle Natur der neuronalen Repräsentation verschiedener Sachverhalte stellt eine weitere Quelle für die limitierte Aussagekraft von fMRT-Daten dar. Für diesen Punkt bietet sich die Betrachtung der Studie von *Erk et al.* noch einmal an. Das Kernergebnis dieser Studie besteht darin, dass es mit Hilfe von Gehirnaktivierungsdaten möglich ist, zwischen unterschiedlichen Autotypen zu differenzieren. Es gilt sich allerdings vor Augen zu halten, dass es nicht direkt ein konkreter Autotyp ist, der eine neuronale Aktivierung erzeugt. Die Ursache für die berichtete Aktivierung liegt in der allgemeinen Bedeutung eines konkreten Autotyps. Sportwagen stellen einen sozial gesehen hohen Wert da, Kleinwagen nicht. Diesen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Autotypen kann man über die fMRT-Daten abbilden. Durch die Aktivierung wird nicht der Autotyp des Sportwagens repräsentiert. Es ist die Bedeutung bzw. der Bedeutungsunterschied des Autotyps, die/der in der Aktivierung zum Ausdruck kommt. Nur bei einem deutlichen Unterschied in der Wertigkeit findet man unterschiedliche Gehirnaktivierungen. Würde man die Wirkung anderer Objekte mit der fMRT untersuchen, die einen ähnlich hohen sozialen Status repräsentieren, müsste im Ergebnis dasselbe Aktivierungsmuster zu erkennen sein, dass auch durch Sportwagen ausgelöst wurde, allerdings je nach der Objektbeschaffenheit ohne die Aktivierung des fusiformen Gyrus. Diese Begrenzung ist aber nicht allein auf das Messverfahren zurückzuführen, sondern ist auch in der Natur der neuronalen Repräsentationen begründet. Im Gehirn gibt es keine speziellen Arealen, die unterschiedliche Autotypen oder Marken verarbeiten. Vielmehr wird über die gefundenen Gehirnaktivierungen ihre Bedeutung abgebildet. Folglich ist es auf Grundlage aktivierter Gehirnregionen eher nicht möglich, zwischen einem Lamborghini und einem Ferrari zu unterscheiden, da beide Automarken Statussymbole darstellen und insofern von ihrem sozialen Wert vergleichbar sind. Eine Ausnahme wäre evtl. in dem Fall denkbar, wenn eine der beiden Marken die Lieblingsmarke der zu untersuchenden Probanden wäre. In dieser speziellen Konstellation würde man Ergebnisse wie bei *Deepe et al.* im Sinne eines Winner-Take-All-Effektes erwarten. Nur, wenn für alle Probanden dieselbe Automarke die Lieblingsmarke darstellt, bestünde die Möglichkeit, aus der neuronalen Aktivierung zwischen beiden zu unterscheiden. Hätte man nur die Aktivierungsmuster ohne weitere Informationen, könnte man allerdings nicht herleiten, ob die Aktivierungen die Bedeutung von Lamborghini oder Ferrari repräsentieren.

In Bezug auf die *Position des Neuromarketings im engeren Sinne* liegt eine Übereinstimmung vor, was die generelle positive Einschätzung der fMRT anbelangt. Allerdings wird die Vorstellung einer unproblematischen Interpretation und Übertragung der Ergebnisse auf die Verhaltensebene für wenig realistisch gehalten. Den fMRT-Daten wird eine generelle Aussagekraft zugesprochen. Insofern stellt die fMRT eine sinnvolle Messung der Gehirnaktivität dar. Allerdings bestehen auf verschiedenen Ebenen gewisse Limitationen, die es zu berücksichtigen gilt.

Wie die eigene fMRT-Studie gezeigt hat, ist es nicht ausreichend, die Gehirnscans zu betrachten, diese ganz einfach zu interpretieren und dann die Gehirnaktivierungen auf die Verhaltensebene zu übertragen. Unabhängig von der speziellen Forschungs-

disziplin gilt für Untersuchungsergebnisse generell, dass Daten nie für sich selbst sprechen. Auf der einen Seite bedarf es weiterer Informationen um eine neuronale Interpretation durchzuführen. Auf der anderen Seite müssen hinsichtlich der Erstellung von Entscheidungsmodellen unterschiedliche theoretische Überlegungen angestellt und auf unterschiedliche Theorien zurückgegriffen werden, um einen angemessenen Rahmen für die handlungstheoretische Interpretation der erhobenen Daten zu gewährleisten. Ohne theoretisches Wissen ist eine Interpretation nicht sinnvoll möglich. Die Theorie ist generell unabdingbar. Allerdings fehlt im Falle der Nichtberücksichtigung des Gehirns aufgrund der immensen Bedeutung unbewusster Prozesse und der zentralen Rolle des Gehirns im Rahmen von Entscheidungen und Verhalten die wichtigste Komponente, um Verhalten zu erklären. Im Sinne einer guten neuronalen Interpretation gilt es in der Zukunft das neuronale Hintergrundwissen weiter aufzuarbeiten, damit aufgrund dieser verbesserten Basis bessere Interpretationen resultieren können. In Bezug auf die handlungstheoretische Interpretation besteht die Herausforderung darin, adäquate Entscheidungsmodelle zu entwickeln, die die Grundlage für die systematische Bearbeitung der einzelnen Teilkomponenten bilden. Bei der Erstellung dieses Bezugsrahmens für die handlungstheoretische Interpretation sind sowohl das neuronale wie auch das nicht-neuronale Hintergrundwissen von Bedeutung. Durch die beschriebene Verbesserung der neuronalen Interpretation und über die Arbeit mit Entscheidungsmodelle verbessern sich folglich auch die Chancen für eine adäquate Übertragung der Gehirnaktivierungen auf die Verhaltensebene.

Vor dem Hintergrund der Ausarbeitungen innerhalb dieses Kapitels ist die limitierte Aussagekraft bezüglich der eigenen neurowissenschaftlichen Untersuchung auf handlungstheoretischer Ebene weniger als kritisch, sondern vielmehr als realistisch anzusehen. Generell wird nicht die Meinung vertreten, dass durch die Erfassung der neuronalen Ebene Alles bisher Dagewesene ersetzt wird. Vielmehr ist eine Kernaussage der eigenen Position, dass die neurowissenschaftliche Perspektive eine Erweiterung des Wissens in Aussicht stellt. Sie liefert durch die Betrachtung der neuronalen Prozesse eine weitere, tiefergehende Komponente, um Konsumentenverhalten transparenter zu machen und besser zu verstehen. In diesem Sinne erweitert die Einbeziehung der Neurowissenschaften generell die Möglichkeiten zur Verhaltensklärung und verfolgt im Sinne des Kritischen Rationalismus das generelle Ziel von Wissenschaft in Form einer besseren Annäherung an die Realität. Allerdings bestehen dieselben Restriktionen wie für andere Disziplinen.

Auf der einen Seite ist eine höhere Auflösung des Verhaltens, als über die neuronale Ebene, nur schwer vorstellbar. Auf der anderen Seite bringen die verschiedenen Limitationen im Zusammenhang mit der fMRT die Notwendigkeit bzw. Unverzichtbarkeit des theoretischen Wissens und zusätzlicher Daten zum Ausdruck. Wie die eigene fMRT-Studie zeigt, sind Interpretationen, ob neuronal oder handlungstheoretisch, ohne theoretisches Vorwissen oder theoretische Vorstellungen über unterschiedliche Zusammenhänge nicht sinnvoll umsetzbar. Die Vorstellung, dass Neuromarketing alle bestehenden Theorien und Erkenntnisse ersetzt, ist daher eine eher unrealistische Vorstellung. Im Rahmen der eigenen fMRT-Studie, die eine isolierte Untersuchung darstellt, ist eine adäquate handlungstheoretische Interpretation alleine auf

Basis der neuronalen Aktivierung nicht möglich. Man ist auf weitere Daten angewiesen. Versucht man die handlungstheoretische Ebene systematischer zu erfassen, indem man mit einem Verbund mehrerer fMRT-Studien arbeitet, ist man auf das Wissen aus anderen Disziplinen angewiesen. Das Wissen wird benötigt, um zu adäquaten theoretischen Modellen als Ausgangspunkt für die Planung und Ausgestaltung der einzelnen verbundenen fMRT-Studien zu kommen. Zudem können weitere Erhebungsverfahren dazu verwendet werden, einzelne Komponenten des Entscheidungsmodells abzubilden. Im dargestellten Entscheidungsmodell¹⁰⁸² könnten bspw. die der Konfrontation mit einem Kaufangebot vorgelagerten situations- und personenbezogenen Einflüsse auf diese Weise erfasst werden.

Hieran kann abgeleitet werden, dass die fMRT nicht alleine die Lösung verschiedener wissenschaftlicher Probleme oder Fragestellung darstellt, sondern der Schlüssel in der Kombination bzw. Verbindung verschiedener Perspektiven und Methoden liegt. Um den Stellenwert der fMRT zu betonen, soll an dieser Stelle noch einmal festgehalten werden, worauf bereits in Kapitel 2 hingewiesen wurde.¹⁰⁸³ Alles was passiert, jegliches Verhalten und insofern auch jede Entscheidung, hat seinen Ursprung im Gehirn. Daher ist es unabdingbar, im Rahmen der Erklärung des Konsumentenverhaltens die neurophysiologische Perspektive zu berücksichtigen. Es geht generell um die Erweiterung des Hintergrundwissens, sei es in Bezug auf die neuronale Interpretation einzelner Kontraste oder hinsichtlich der handlungstheoretischen Interpretation. I.V.m. der fMRT bestehen immer noch einige Herausforderungen, die einer expliziten Erörterung bedürfen. Trotz dieser Herausforderungen ist die fMRT als nützliches Werkzeug hinsichtlich der Erklärung des menschlichen Verhaltens anzusehen. Die neuronale Perspektive ist zentral, wenn es um das Verstehen des Verhaltens geht, da Verhalten im Kopf entsteht. Im Gegensatz zu herkömmlichen Erhebungsmethoden ist der Output nicht durch den Probanden systematisch beeinflussbar, da es sich um unbewusste Prozesse handelt, die teilweise sichtbar gemacht werden können.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die eigene Position hinsichtlich der Beurteilung des Einsatzes der fMRT im Bereich des Marketings zwischen den beschriebenen Positionen des Neuromarketings im weiteren und engeren Sinne einzuordnen ist. Sie stimmt beiden zum Teil zu, lehnt beide Positionen allerdings teilweise auch ab. Der fMRT wird eine grundlegende Aussagekraft unterstellt, die auch in eine Praxisrelevanz mündet, wie anhand der Beispiele angedeutet. Diese Relevanz ist jedoch begrenzt. Im Rahmen der Ad-hoc-Marktforschung liefert sie keinen nennenswerten Mehrwert. Die engere Sicht in Hinblick auf das Neuromarketing wird aus einer Multi-Method-Perspektive heraus verstanden. Das vordergründige Ziel besteht hierbei in einer immer weiter fortschreitenden Annäherung an die Realität und zwar indem alle zur Verfügung stehenden Möglichkeiten zur Wissenserweiterung eingesetzt werden. In diesem Sinne kann das Neuromarketing als wertvoller Ansatz angesehen werden, der neben den aktuellen Limitationen potenziell gut dazu geeig-

¹⁰⁸² vgl. Kapitel 7.2.1 Generelle Überlegungen zur handlungstheoretischen Interpretation

¹⁰⁸³ vgl. Kapitel 2.1.1 Der Weg zur Neuroökonomie

net ist, über die Verbindung von Marketingaspekten und der neuronalen Ebene ein tieferes Verständnis des Konsumenten und des Konsumentenverhaltens zu erreichen. Der Nutzen des Einsatzes der fMRT erstreckt sich zum einen auf die operative Ebene, sprich verschiedene konkrete Aspekte des Marketing-Mix. Zum anderen ist festzuhalten, dass aus den verbesserten Möglichkeiten, Erkenntnisse im Bereich des operativen Marketings zu gewinnen, auch ein Mehrwert in Bezug auf die strategische Marketingebene entsteht. Sowohl im wissenschaftlichen Sinne wie auch in Bezug auf die Marketingpraxis konnten Beispiele aufgezeigt werden, die im Rahmen der Limitationen der fMRT ihr Potenzial zum Ausdruck bringen.

Im Zusammenhang mit der fMRT wurde im Verlauf der vorliegenden Arbeit zum einen auf die verschiedenen interdisziplinären Aspekte und die sich daraus ergebenden Möglichkeiten eingegangen. Zum anderen erfolgte ebenfalls eine Auseinandersetzung mit den Grenzen der Interpretation und mit verschiedenen Kritikpunkten. Wie anhand des bereits in der Einleitung dargestellten Spannungsfeldes zu erkennen ist, unterscheiden sich die Meinungen hinsichtlich der Beurteilung der fMRT und ihrer Leistungsfähigkeit stark. Je nach Autor kann sich die Bewertung der Stärken und Schwächen hinsichtlich der fMRT unterschiedlich auf das Gesamturteil auswirken. In diesem Sinne wurde die eigene Position dargelegt. Betrachtet man die fMRT mit ihren Stärken und Schwächen einmal ohne diese direkt zu bewerten und vergleicht stattdessen die beschriebene Situation grundlegend mit anderen Erhebungsverfahren, wie bspw. der Befragung, so zeigen sich deutliche Parallelen. Wie generell für alle anderen Erhebungsverfahren gilt, stellt auch die fMRT kein perfektes Messinstrument dar. Auch im Rahmen der fMRT existiert ein wahrer Wert (Gehirnaktivität) der über eine Messung erfasst werden soll (BOLD-Signal, das Gehirnaktivität indiziert), welche wiederum Verzerrungen ausgesetzt ist (unterschiedliche Rauschquellen, welche das Signal abschwächen). Selbiges gilt z.B. auch für die Befragung. Diesbezüglich könnte das Ziel einer Befragung darin bestehen, die Ausprägung hinsichtlich einer Einstellung (wahrer Wert) zu erfassen. Da Einstellungen i.d.R. komplexere inhaltliche Gebilde darstellen, ist es in den meisten Fällen nötig, die Einstellungsausprägung über die Antworten auf mehrere Indikatoren bzw. Items zu messen. Die Antworten auf die einzelnen Fragen können allerdings durch verschiedene Einflüsse verzerrt werden (soziale Erwünschtheit, Interviewereffekte, ...). Was das über eine Befragung, die als Standardmessinstrument angesehen und eingesetzt wird, ermittelte Messergebnis tatsächlich zum Ausdruck bringt bzw. wie stark diese Messung vom wahren Wert abweicht, kann auch im Falle der Befragung nicht immer eindeutig beurteilt werden. Dieser generelle Vergleich soll zum einen zum Ausdruck bringen, dass die fMRT kein Wunderinstrument ist, welches eine perfekte Messung im Sinne einer verzerrungsfreien Messung ohne kritische Momente darstellt. Zum anderen sollte durch diesen allgemeinen Vergleich darauf hingewiesen werden, dass generell nicht von perfekten Messinstrumenten auszugehen ist. In diesem Sinne muss sich jedes Messverfahren denselben grundlegenden Herausforderungen stellen, die sich allerdings in Bezug auf die einzelnen Verfahren jeweils in einer spezifischen Weise äußern.

Das Verfahren der fMRT, und damit der Einsatz und der Nutzen im Bereich des Marketings, hat, wie andere Methoden bzw. Instrumente auch, seine Möglichkeiten und auch entsprechende Grenzen. Eine Hürde besteht generell in der Komplexität, die mit diesem Verfahren verbunden ist. Die ausführlich aufgearbeiteten biologischen Grundlagen, die physikalischen Grundlagen, die Übertragung dieser allgemeinen Sachverhalte auf die fMRT und weitere spezielle Aspekte in Bezug auf die fMRT, die Entscheidungen innerhalb der Aufstellung einer eigenen fMRT-Studie und auch die Überlegungen und Ausführungen zur Interpretationslogik bilden die Komplexität des Verfahrens realistisch ab. Angemerkt sei an dieser Stelle noch einmal kurz, dass die Ausführungen derart gestaltet wurden, dass sie im Sinne der Zielerreichung so ausführlich wie nötig und so allgemein wie möglich gehalten wurden. Innerhalb jedes Teilbereiches gibt es noch einige kritische Punkte, die aufgrund der Begrenztheit dieser Arbeit nicht genauer adressiert werden konnten. Fakt ist, dass die fMRT, genau wie andere Messverfahren auch, verschiedene kritische Punkte aufweist. Bspw. arbeitet man auf einigen Ebenen des fMRT-Prozesses auch mit Annahmen, die generell kritisierbar sind und ohne deren Geltung die Aussagekraft verringert würde. Bspw. werden im Rahmen der Analyse einzelne Parameter für die einzelnen experimentellen Bedingungen geschätzt, die zum Ausdruck bringen, ob die gemessenen BOLD-Signal-Zeitreihen (abhängige Variable) durch die einzelnen Bedingungen (Prädiktoren) erklärt werden können. Wie in Kapitel 5 beschrieben wurde, erfolgt für die Modellierung der Prädiktoren eine Konvolution.¹⁰⁸⁴ Im Zuge der Konvolution wird eine Schätzfunktion für neuronale Aktivität verwendet, von der angenommen wird, dass sie in der Lage ist, eine tatsächliche Aktivierung abzubilden. Bei der Einstellung hinsichtlich der Analyse steht nicht nur eine Schätzfunktion zur Auswahl. Eine unzureichende Modellierung kann sich hierbei sehr negativ auf das Ergebnis einer fMRT-Untersuchung auswirken. Bei der Konvolution geht es folglich nicht nur um die Berücksichtigung der On- und Off-Taktungen der einzelnen experimentellen Bedingungen, sondern vor allem auch darum, die infolge eines Stimulus oder einer Aufgabenstellung erwartete Aktivierung realitätsgetreu über angemessene Schätzfunktionen zu modellieren.

Mit Hilfe der fMRT sieht man im Ergebnis das WAS. Man erkennt, welche Bereiche eine signifikante Aktivierung bzw. Deaktivierung aufweisen. Das WIE, also die Antwort auf die Frage mit welchen konkreten Elementen bzw. Maßnahmen eine derartige Aktivierung erreicht werden kann, ist nicht direkt nachvollziehbar. Erhält man z.B. im Ergebnis für attraktive Werbeanzeigen eine erhöhte Aktivierung in Strukturen, die dem Belohnungssystem zugeordnet sind, so kann man daraus schließen, dass eine attraktive Anzeige Belohnung verspricht. Aus dieser konkreten Aktivierung kann aber nicht gefolgert werden, wie man eine Werbeanzeige gestalten muss, um eine derartige Aktivierung zu erreichen. Eine Werbeanzeige besitzt viele verschiedene Elemente, die theoretisch alle einen Einfluss haben können. Diese Situation beschreibt eine generelle Limitation in Bezug auf die Auflösung der fMRT-Studienergebnisse. Bei zu komplexen Prozessen, wie bspw. der Bewertung von Werbeanzeigen, kommt die

¹⁰⁸⁴ vgl. Kapitel 5.4.1 Einzelanalyse

fMRT aufgrund ihrer Messprinzipien an ihre Abbildungsgrenze. Es können lediglich Teilprozesse untersucht werden.

Trotz gewisser Limitationen konnte durch die Auseinandersetzung mit einigen fMRT-Studien aus dem Neuromarketingbereich gezeigt werden, dass bereits interessante und teilweise auch praxisrelevante Ergebnisse möglich sind.

Neben den kritischen Aspekten ist im Generellen herauszustellen, dass die Einbindung der neuronalen Ebene in den Bereich des Marketings über den Einsatz neurophysiologischer Messverfahren aus einer Multi-Method-Perspektive einen deutlichen Mehrwert mit sich bringt. Im Speziellen kann zudem festgehalten werden, dass die fMRT im Vergleich mit den anderen neurophysiologischen Messverfahren das größte Potenzial besitzt. Um die Aussagekraft der fMRT generell zu erhöhen, gilt es die richtigen Fragen zu stellen, diese Fragen in ansprechende Designs zu übersetzen und adäquate Stimuli zu produzieren.

8.2.2 Ausblick

Wie die Ausführungen gezeigt haben, wird die generelle Aussagekraft der fMRT und ihr Einsatz im Bereich des Marketings im Rahmen der vorliegenden Arbeit positiv beurteilt. Dennoch wurden auch die Limitationen thematisiert, innerhalb derer geforscht werden kann. Es gilt noch genügend Herausforderungen zu bewältigen, um die Aussagekraft und Güte der fMRT zu erhöhen. Wie im Zusammenhang mit der Interpretationslogik angemerkt wurde, muss für die Verbesserung der neuronalen Interpretation in beschriebener Weise an der Erweiterung des neuronalen Hintergrundwissens gearbeitet werden. Des Weiteren gilt es hinsichtlich der handlungstheoretischen Interpretation Entscheidungsmodellen auszuarbeiten und einzelnen Aspekte über mehrere systematisch zusammenhängende fMRT-Studie zu untersuchen. In Bezug auf das methodische Vorgehen weisen einzelne Studien einige Unterschiede auf. Dies ist nicht wirklich verwunderlich, hat es doch im Verlauf der Zeit verschiedene Weiterentwicklungen gegeben. Dies führt dazu, dass für verschiedene methodische Entscheidungen mehrere Alternativen zur Verfügung stehen. Für die weitere Forschung ist es in Hinblick auf eine generelle Vergleichbarkeit empfehlenswert, sich auf einheitliche Standards zu einigen und innerhalb dieses Rahmens zu forschen.

Neben der Untersuchung noch nicht bearbeiteter Fragestellungen stellen Replikationsstudien von bekannten fMRT-Studien einen sehr interessanten Bereich dar. Gelingt es, die Ergebnisse vergangener Studien zu replizieren, so stärkt dies die generelle Güte der Messung. Bei Replikationen ist strengsten darauf zu achten, dass es in Bezug auf das experimentelle Design keine Abweichung zur Originalstudie gibt. Bereits ein kleiner Unterschied kann zu unterschiedlichen Ergebnissen führen. Um zu einem weiteren Verständnis zu gelangen, kann es durchaus erstrebenswert sein, sich an eine vergangene Studie anzulehnen, doch einzelne Komponenten, im Sinne einer Erweiterung der grundlegenden Fragestellung, zu verändern. So können die Ergebnisse zweier Studien evtl. verbunden werden. Dieses Vorgehen kann zu einem besseren Verständnis des betrachteten Prozesses führen. Als Beispiel kann hierfür die eigene fMRT-Studie zur Wirkung von Sonderangebotssignalen herangezogen

werden. Sie wurde zum einen an die Studie von Weber & Neuhaus¹⁰⁸⁵ angelehnt, die sich mit der Wirkung von Rabattsymbolen auseinandersetzte. Zum anderen stellt sie in Bezug auf die einzelnen Designkomponenten eine Erweiterung der Vorgängerstudie dar. Bei der Vorgängerstudie wurde jeweils nur ein Produkt zum Kauf angeboten, in der eigenen Untersuchung wurden sowohl einzelne Produkte wie auch mehrere Produkte präsentiert. Die angebotenen Produkte variierten ebenfalls. Bei *Weber & Neuhaus* wurden zwei Produktkategorien angeboten. Zum einen konnten im Verlauf des Experiments Produkte mit einem Wert von unter 5€ erworben werden. Zum anderen konnten auch etwas teurere Produkte (> 100€) gekauft werden. In der eigenen Studie waren generell schnell verzehrbare Produkte Bestandteil eines Kaufangebots, die als Einzelprodukt preislich nicht mehr als 1,50€ kosteten. Ein weiterer Unterschied bestand darin, dass in der Vorgängerstudie ein Rabattsymbol nur im Zusammenhang mit einem normalen Preis dargestellt wurde. Im Zuge der eigenen Studie wurden Sonderangebotssignale sowohl mit einem günstigen, einem normalem und auch mit einem teuren Preis verbunden. Auch die einzelnen Ausprägungen der Preiskategorien wurden unterschiedlich definiert. In beiden Untersuchungen wurde für den Normalpreis im Experiment der Originalpreis des betroffenen Produktes verwendet. Bei Weber & Neuhaus errechnet sich der günstige Preis als ein Viertel und der teure Preis als 4-Faches des Originalpreises. In der eigenen Studie wurden dagegen die Differenzen zwischen den einzelnen Preiskategorien gleichmäßig gestaltet. Um an den günstigen Preis zu kommen, wurden 25% des Originalpreises abgezogen, für die Berechnung des teuren Preises wurden 25% auf den Originalpreis draufgeschlagen. Im Ergebnis der beiden Studien zeigen sich unterschiedliche Aktivierungen im Zusammenhang mit Rabatt- bzw. Sonderangebotssignalen. Dies verwundert im ersten Moment ein wenig, da in beiden Studien die Wirkung der Preisauszeichnungen untersucht wird. Es wurde bereits die Wichtigkeit des experimentellen Designs und der damit verbundenen Details hinsichtlich der fMRT-Ergebnisse und ihrer Interpretation angesprochen. Ruft man sich das skizzierte Entscheidungsmodell aus Kapitel 7¹⁰⁸⁶ ins Gedächtnis, so kann die Verwunderung gelöst werden. Berücksichtigt man die beiden speziellen experimentellen Designs und stellt einen Bezug zum erstellten Entscheidungsmodell her, so ist generell festzuhalten, dass beide Studien den Teilprozess der Reizwahrnehmung ansprechen. Allerdings sprechen sie ihn in unterschiedlichen Phasen an. Die eigene fMRT-Studie bildet den ersten Teilprozess der Wahrnehmung im Sinne der Relevanzkategorisierung ab. Sonderangebotssignale sind in der Lage, ein hohes Maß an Arousal zu erzeugen, was sich in der gefundenen Gehirnaktivierung widerspiegelt (anteriore Insula). Die Vorgängerstudie spricht hingegen über ihr spezielles experimentelles Design den Bewertungsprozess im Zuge der Wahrnehmung an. Anhand der Gehirnaktivierungen kommt sie zu dem Ergebnis, dass Rabattsignale positive Emotionen auslösen (ventrales Striatum). Wie gesagt, streifen beide Studien den Wahrnehmungsprozess, aufgrund der speziellen experimentellen Designs kam in beiden Fällen allerdings jeweils

¹⁰⁸⁵ vgl. Weber, B.; Neuhaus, C. (2007)

¹⁰⁸⁶ vgl. Kapitel 7.2.1 Generelle Überlegungen zur handlungstheoretischen Interpretation

ein anderer Teilprozess stärker zum Vorschein. Insgesamt gesehen bekommt man durch die Einbeziehung des Entscheidungsmodells und über die Betrachtung der experimentellen Designs und der Ergebnisse beider fMRT-Studien detailliertere Einblicke in die zugrunde liegenden Prozesse.

Die im Vergleich zur EEG deutlich schwächere zeitliche Auflösung ist ein genereller Kritikpunkt, der dem zu Grunde liegenden Messprinzip geschuldet ist und in Bezug auf Whole-Brain-Analysen immer einer gewissen Begrenzung unterliegen wird. Daher ist eine detaillierte Analyse der Verschaltung verschiedener Gehirnareale untereinander allein auf Basis der fMRT eher unwahrscheinlich. Verschiedene Forschungsgruppen beschäftigen sich daher mit der Kombination aus EEG und fMRT. Wie bereits angesprochen,¹⁰⁸⁷ besitzt die EEG im Vergleich eine sehr gute zeitliche, dafür aber eine sehr schwache räumliche Auflösung. Bei der fMRT gestaltet sich die Situation genau entgegengesetzt. Sie weist unter den neurophysiologischen Messverfahren die beste räumliche Auflösung auf, ist aber aufgrund des generellen Messverfahrens in ihrer zeitlichen Auflösung begrenzt. Im Falle von mehreren Aktivierungen kann aus den fMRT-Daten nichts Genaueres über deren zeitliche Reihenfolge ausgesagt werden. Von der Kombination beider Messverfahren verspricht man sich die ideale Situation hinsichtlich der Messung der Gehirnaktivität, indem die Daten sowohl durch eine hohe zeitliche wie auch eine hohe räumliche Auflösung gekennzeichnet sind. Zu Beginn der Umsetzung gab es einige technische Schwierigkeiten in Bezug auf die gegenseitige Verträglichkeit der beiden Messverfahren, was sich in geringeren Signalintensitäten bzw. Verzerrungen widerspiegelte. In der Folge technischer Weiterentwicklungen stellt die technische Kompatibilität beider Messapparaturen mittlerweile keine Begrenzung mehr dar. Allerdings gilt generell, dass die Beziehung zwischen EEG- und fMRT-Signalen noch nicht in Gänze verstanden ist und daher Gegenstand aktueller Forschung ist. Auch die Frage nach der adäquaten Auswertung in Bezug auf die Integration der neu gewonnenen Daten stellt eine aktuelle Herausforderung dar. *„Initial studies using both electrophysiology and hemodynamic data often focused on qualitatively or quantitatively comparing the outcomes of simultaneously acquired but separately analyzed EEG and fMRI data (...). To take full advantage of the information from multimodal datasets, analytic approaches were needed that allowed more direct integration of information across modalities.“*¹⁰⁸⁸ Es gibt bereits verschiedene analytische Ansätze,¹⁰⁸⁹ doch aufgrund der Komplexität der Situation und in Anbetracht unterschiedlicher Forschungsziele steht man diesbezüglich noch am Anfang. Dennoch kann auch anhand der Entwicklungen in diesem Bereich das Potenzial der fMRT und neurophysiologischer Daten verdeutlicht werden.

Neben der Möglichkeit zu erfassen, in welcher Weise verschiedene äußere Reize auf die neuronale Ebenen wirken, besteht mittels der fMRT auch die Möglichkeit zu untersuchen, ob neuronale Aktivierungen nachfolgendes (Kauf-)Verhalten vorhersagen können. Die Varianzerklärung hinsichtlich der abhängigen Variablen stellt ein allge-

¹⁰⁸⁷ vgl. Kapitel 2.1.2 Neuroökonomie

¹⁰⁸⁸ Huster, R. J.; Debener, S.; Eichele, T.; Herrmann, C. S. (2012), S. 6054

¹⁰⁸⁹ vgl. ebenda

meines Ziel jeder Messung und insofern auch jedes Messverfahrens dar. Die Relevanz eines konkreten Messverfahrens wird in diesem Zusammenhang danach beurteilt, inwieweit es über die erzeugten Messergebnisse gelingt, einen gewissen Anteil der Varianz in der abhängigen Variable zu erklären. Je mehr Varianz erklärt werden kann, desto besser eignet sich die Messung als Prädiktor der abhängigen Variable. Von großem Interesse diesbezüglich ist oftmals die Erklärung bzw. die Vorhersage einer Kaufhandlung. In Bezug auf die fMRT und Gehirnaktivierungen stellt sich somit die grundsätzliche Frage, ob mittels Gehirnaktivierungen Kaufentscheidungen bzw. Verhalten generell erklärt werden kann und zu welchem Grad dies gelingt. Die Beantwortung dieser Fragen ist für die Aussagekraft der fMRT äußerst relevant. Im Sinne des Multi-Method-Gedankens, der den Einsatz der fMRT im Marketing als eine Erweiterung der Betrachtungsmöglichkeiten versteht, verspricht man sich durch die Einbeziehung der Gehirnaktivierungsdaten insgesamt eine höhere Varianzerklärung zu erreichen. Es existieren bereits vereinzelt Untersuchungen, die die generelle Möglichkeit der Vorhersage von Kaufverhalten bzw. der Willingness to buy über die Erfassung von Gehirnaktivierungsdaten aufzeigen; allerdings befindet man sich hier in Bezug auf die Erkenntnisse noch in einer frühen Phase der Entwicklung.

Die fMRT-Studie von *Knutson et al.*¹⁰⁹⁰ stellt diesbezüglich eine der ersten erfolgreichen Studien dar. Die Untersuchung zielte auf die Herausstellung derjenigen Gehirnregionen ab, die für die Antizipation von Gewinn und Verlust verantwortlich sind. In einem weiteren Schritt ging es darum, ob von diesen Aktivierungen auf nachfolgendes Kaufverhalten geschlossen werden konnte. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Gehirnregionen an der Antizipation von Gewinn und Verlust beteiligt sind und dass mit Hilfe der Aktivierungen aus diesen Bereichen gekaufte und nicht gekaufte Angebote vorhergesagt werden konnten. Knutson et al. resümieren: „*In summary, this study provides initial evidence that specific patterns of brain activation predict purchasing.*“¹⁰⁹¹

Die Studie von *Tusche, Bode & Haynes*¹⁰⁹² dient als weiteres Beispiel für die erfolgreiche Verwendung von neuronalen Aktivierungsdaten zur Prädiktion der Willingness to buy (WTB). Die WTB wurde hierbei erst im Nachgang der fMRT-Untersuchung erhoben. Im Ergebnis gelang es, diese mittels einer multi-voxel pattern analysis (MVPA) über die Kombination von Aktivierungsdaten aus dem MPFC und der Insula vorherzusagen. Die Aktivierungsdaten wurden im Gegensatz zur WTB während der Stimuluspräsentation generiert, daher sprechen die Autoren im vorliegenden Fall von einer tatsächlichen Prädiktion. Im Zuge der Untersuchung ging es inhaltlich um die Gegenüberstellung der bewussten (high attention) und unbewussten Wahrnehmung (low attention) von Autos. Neben der Erkenntnis, dass die WTB durch Gehirnaktivierungen vorhergesagt werden kann, konnte des Weiteren herausgestellt werden, dass dies gleichermaßen im Fall der bewussten wie auch im Fall der unbewussten Wahrnehmung zutreffend ist.

¹⁰⁹⁰ vgl. Knutson, B. et al. (2007)

¹⁰⁹¹ ebenda, S. 153

¹⁰⁹² vgl. Tusche, A.; Bode, S.; Haynes, J.-D. (2010)

*Falk, Berkman & Lieberman*¹⁰⁹³ gelang es ebenfalls, das Potenzial der neuronalen Aktivierungsdaten herauszustellen. Ihr Projekt zielte konkret auf den Vergleich zwischen Befragungsdaten und neuronalen Aktivierungsdaten hinsichtlich ihrer Fähigkeit zur Verhaltensprognose ab. In Bezug auf die quantitativen Ziele der fMRT und der Erfassung von Gehirnaktivierungen stellt die abgebildete Studie mit ihrem Ergebnis einen großen Schritt dar. Zum einen wurde nicht nur gezeigt, dass Verhalten durch Aktivierungsdaten vorhergesagt werden kann, sondern dass basierend auf Aktivierungsdaten aus einer Stichprobe eine Prädiktion auf Populationsebene möglich ist. Zum anderen konnte das Verhalten auf der Populationsebene nicht adäquat mittels der Befragungsdaten aus derselben Stichprobe vorhergesagt werden. Aus einer Multi-Method-Perspektive kann bereits darin ein erstrebenswertes Ziel hinsichtlich der Erhöhung der Varianzerklärung gesehen werden, dass mittels der Ergebnisse einer fMRT-Untersuchung bspw. 5% mehr an Varianz erklärt wird als allein über die Verkaufszahlen oder andere Erhebungsverfahren, wie z.B. die Befragung. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse von Falk, Berkman & Lieberman, dass in Bezug auf die Aussagekraft von neuronalen Aktivierungsdaten und der Anwendung der fMRT noch weitaus mehr Potenzial vorhanden ist. Im Fazit ergibt sich ein sehr optimistischer Ausblick in Bezug auf das zukünftige Potenzial dieses Forschungsbereiches.

¹⁰⁹³ vgl. Falk, E. B.; Berkman, E. T.; Lieberman, M. D. (2012)

Literaturverzeichnis

Aguirre, Geoffrey K.; D'Esposito, Mark (1999): Experimental design for brain fMRI, in: Moonen, Chrit T. W.; Bandettini, Peter A. (Eds.): Functional MRI, Berlin, Springer-Verlag, S. 369-380.

Albrecht, Jessica (2008): Zentrale Verarbeitung multimodaler sensorischer Reize nach Stimulation der Nasenschleimhaut mit Nikotin, Norderstadt, GRIN Verlag.

American Marketing Association: Definition Marketing, <https://www.ama.org/AboutAMA/Pages/Definition-of-Marketing.aspx> (abgerufen am 26.05.2014).

American Marketing Association: Definition Marketing Management, <https://www.ama.org/resources/Pages/Dictionary.aspx?dLetter=M&dLetter=M> (abgerufen am 27.05.2014).

Andreasen, Nancy C.; Arndt, Stephan; Cizadlo, Ted; O'Leary, Daniel S.; Watkins, G. Leonard; Ponto, Laura L. Boles; Hichwa, Richard D. (1996): Sample Size and Statistical Power in [¹⁵O]H₂O Studies of Human Cognition, in: Journal of Cerebral Blood Flow and Metabolism, 16 (5), S. 804-816.

Augustine, James A. (1996): Circuitry and functional aspects of the insular lobe in primates including humans, in: Brain Research Reviews, 22 (3), S. 229-244.

Backhaus, Klaus; Erichson, Bernd; Plinke, Wulff; Weiber, Rolf (2011): Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung, 13. Auflage, Heidelberg, Springer-Verlag.

Baddeley, Alan D.; Hitch, Graham J. (1974): Working memory, in: Bower, Gordon H. (Eds.): The Psychology of Learning and Motivation, Vol. 8, New York, Academic Press, S. 48-79.

Baddeley, Alan D. (2000): The episodic buffer: a new component of working memory?, in: Trends in Cognitive Sciences, 4 (11), S. 417-423.

Baker, Susan C.; Rogers, Robin D.; Owen, Adrian M.; Frith, Christopher D.; Dolan, Raymond J.; Frackowiak, Richard S. J.; Robbins, Trevor W. (1996): Neural systems engaged by planning: a PET study of the Tower of London task, in: Neuropsychologia, 34 (6), S. 515-526.

Bandettini, Peter A.; Wong, Eric C.; Hinks, R. Scott; Tikofsky, Ronald S.; Hyde, James S. (1992): Time Course EPI of Human Brain Function During Task Activation, in: Magnetic Resonance in Medicine, 25 (2), S. 390-397.

Bandettini, Peter A.; Kwong, Kenneth K.; Davis, Timothy L.; Tootell, Roger B. H.; Wong, Eric C.; Fox, Peter T.; Belliveau, John W.; Weisskoff, Robert M.; Rosen, Bruce R. (1997): Characterization of Cerebral Blood Oxygenation and Flow Changes During Prolonged Brain Activation, in: Human Brain Mapping, 5 (2), S. 93-109.

Bartels, Andreas; Zeki, Semir (2000): The neural basis of romantic love, in: NeuroReport, 11 (17), S. 3829-3834.

Bartels, Andreas; Zeki, Semir (2004): The neural correlates of maternal and romantic love, in: NeuroImage, 21 (5), S. 1155-1166.

Bauer, Ernst W. (2006): Humanbiologie, Berlin, Cornelsen Verlag.

Bauer, Herbert (2007): Biologische Psychologie, in: Kastner-Koller, Ursula; Deimann, Pia (Hrsg.): Psychologie als Wissenschaft, 2. Auflage, Wien, Facultas, S. 109-130.

Baumgartner, Thomas; Fischbacher, Urs; Feierabend, Anja; Lutz, Kai; Fehr, Ernst (2009): The neural circuitry of a broken promise, in: Neuron, 64 (5), S. 756-770.

Bear, Mark F.; Connors, Barry W.; Paradiso, Michael A. (2009): Neurowissenschaften - Ein grundlegendes Lehrbuch für Biologie, Medizin und Psychologie, 3. Auflage, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

Bechara, Antoine; Damasio, Hanna; Tranel, Daniel; Damasio, Antonio R. (1997): Deciding advantageously before knowing the advantageous strategy, in: Science, 275 (5304), S. 1293-1295.

Bennett, Craig M.; Baird, Abigail A.; Miller, Michael B.; Wolford, George L. (2010): Neural Correlates of Interspecies Perspective Taking in the Post-Mortem Atlantic Salmon: An Argument for proper Multiple Comparisons Correction, in: Journal of Serendipitous and Unexpected Results, 1 (1), S. 1-5.

Berlit, Peter (2011): Klinische Neurologie, 3. Auflage, Heidelberg, Springer Verlag.

Bertram, Wulf (2007): Wo geht es hier zum Hippocampus?, in: Spitzer, Manfred; Bertram, Wulf: Braintertainment - Expeditionen in die Welt von Geist & Gehirn, Stuttgart, Schattauer, S. 1-13.

Birbaumer, Niels; Schmidt, Robert F. (2003): Biologische Psychologie, 5. Auflage, Heidelberg, Springer Verlag.

Birbaumer, Niels; Schmidt, Robert F. (2010): Biologische Psychologie, 7. Auflage, Heidelberg, Springer Verlag.

Born, Christine; Masuch, Claudia; Pusler, Michael; Piccone, Susanne; Meindl, Thomas; Mangold, Marc; Sander, Björn; Reiser, Maximilian; Pöppel, Ernst (2007): BrainBranding: Eine neurowissenschaftliche Betrachtung starker Marken, in: Koschnick, Wolfgang J. (Hrsg.): FOCUS-Jahrbuch 2007, München, Focus-Magazin-Verlag, S. 185-196.

Bortz, Jürgen (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 6. Auflage, Heidelberg, Springer-Verlag.

Bortz, Jürgen; Schuster, Christof (2010): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler, 7. Auflage, Berlin, Springer-Verlag.

Bösel, Rainer M. (2006): Das Gehirn, Stuttgart, Kohlhammer.

Bower, Gordon H. (1981): Mood and Memory, in: American Psychologist, 36 (2), S. 129-148.

Braus, Dieter F.; Müller, Matthias J.; Weniger, Godehard (2010): Diagnostische Verfahren, in: Amberger, Stephanie; Roll, Sibylle C.: Psychiatriepflege und Psychotherapie, Stuttgart, Thieme, S. 241-246.

Breiter, Hans C.; Aharon, Itzhak; Kahneman, Daniel; Shizgal, Peter (2001): Functional Imaging of Neural Responses to Expectancy and Experience of Monetary Gains and Losses, in: Neuron, 30 (2), S. 619-639.

Brett, Matthew; Penny, Will D.; Kiebel, Stefan (2004): An Introduction to Random Field Theory, in: Frackowiak, Richard S. J.; Friston, Karl J.; Frith, Christopher D.; Dolan, Raymond J.; Price, Cathy J.; Zeki, Semir; Ashburner, John T.; Penny William D.: Human Brain Function , 2nd Edition, San Diego [u.a.], Academic Press, S. 867-879.

Brockmöller, Tobias (2010): Funktionelle Magnetresonanztomographie, elektro-physiologisches Hirnmapping und Neuronavigation: Anwendungsmöglichkeiten in der Neurochirurgie vor, während und nach operativen Eingriffen im Bereich des sensorischen Cortex, Medizinische Fakultät der Universität Bonn, Bonn.

Brosius, Felix (2011): SPSS 19, Heidelberg, mitp-Verlag.

Brown, Joshua W.; Braver, Todd S. (2005): Learned predictions of error likelihood in the anterior cingulate cortex, in: Science, 307 (5712), S. 1118-1121.

Brown, Joshua W.; Braver, Todd S. (2007): Risk prediction and aversion by anterior cingulate cortex, in: Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience, 7 (4), S. 266-277.

Bruhn, Manfred (2012): Marketing - Grundlagen für Studium und Praxis, 11. Auflage, Wiesbaden, Gabler.

Büchel, Christian; Morris, Jond; Dolan, Raymond J.; Friston, Karl J. (1998): Brain Systems Mediating Aversive Conditioning: an Event-Related fMRI Study, in: Neuron, 20 (5), S. 947-957.

Bühner, Markus; Ziegler, Matthias (2009): Statistik für Psychologen und Sozialwissenschaftler, München, Pearson Studium.

Bürger, Corinna; Weber, Bernd (2011): Neurofinance - Geldverarbeitung im Gehirn, in: Reimann, Martin; Weber, Bernd (Hrsg.): Neuroökonomie: Grundlagen - Methoden - Anwendungen, Wiesbaden, Gabler Verlag, S. 219-279.

Burke, Michael (2000): Die Bestimmung der Änderung des Sauerstoffverbrauchs unter funktioneller Aktivierung mittels Kernspintomographie, Technische Hochschule Aachen.

Buxton, Richard B. (2009): Introduction to Functional Magnetic Resonance Imaging - Principles and Technics, 2nd Edition, New York, Cambridge University Press.

Cabeza, Roberto; Nyberg, Lars (2000): Imaging Cognition II: An Empirical Review of 275 PET and fMRI Studies, in: Journal of Cognitive Neuroscience, 12 (1), S. 1-47.

Cacioppo, Stephanie; Bianchi-Demicheli, Francesco; Frum, Chris; Pfaus, James G.; Lewis, James (2012): The Common Neural Bases Between Sexual Desire and Love: A Multilevel Kernel Density fMRI Analysis, in: Journal of Sexual Medicine, 9 (4), S. 1048-1054.

Caria, Andrea; Veit, Ralf; Sitaram, Ranganatha; Lotze, Martin; Weiskopf, Nikolaus; Grodd, Wolfgang; Birbaumer, Niels (2007): Regulation of anterior insular cortex activity using real-time fMRI, in: NeuroImage, 35 (3), S. 1238-1246.

Carlson, Neil R. (2004): Physiologische Psychologie, 8. Auflage, München, Pearson Studium.

Carter, Cameron S.; van Veen, Vincent (2007): Anterior cingulate cortex and conflict detection: an update of theory and data, in: Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience, 7 (4), S. 367-379.

Carter, R. McKell; Meyer, Justin R.; Huettel, Scott A. (2010): Functional Neuroimaging of Intertemporal Choice Models, in: Journal of Neuroscience, Psychology, and Economics, 3 (1), S. 27-45.

Cephos: Startseite, <http://cephosdna.com/> (abgerufen am 11.09.2014).

Cherry, E. Colin (1953): Some Experiments on the Recognition of Speech, with One and with Two Ears, in: The Journal of the Acoustical Society of America, 25 (5), S. 975-979.

Cherry, Simon R.; Dahlbom, Magnus; Phelps, Michael E. (2006): PET - Physics, Instrumentation and Scanners, New York, Springer.

Clauss, Wolfgang; Clauss Cornelia (2009): Humanbiologie kompakt, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

Coghill, Robert C.; Talbot, Jeanne D.; Evans, Alan C.; Meyer, Ernst; Gjedde, Albert; Bushnell, M. Catherine; Duncan, Gary H. (1994): Distributed Processing of Pain and Vibration by the Human Brain, in: The Journal of Neuroscience, 14 (7), S. 4095-4108.

Cohen, Mark S.; Schmitt, Franz (2012): Echo planar imaging before and after fMRI: A personal history, in: NeuroImage, 62 (2), S. 652-659.

Craig, Arthur D. (2002): How do you feel? Interoception: the sense of the physiological condition of the body, in: Nature Reviews Neuroscience, 3 (8), S. 655-666.

Culham, Jody C. (2006): Functional neuroimaging: Experimental design and analysis, in: Cabeza, Roberto; Kingstone, Alan (Eds.): Handbook of Functional Neuroimaging of Cognition, Cambridge, MIT Press, S. 53-83.

Curtis, Clayton E.; D'Esposito, Mark (2003): Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory, in: Trends in Cognitive Sciences, 7 (9), S. 415-423.

Dagher, Alain; Owen, Adrian M.; Boecker, Henning; Brooks, David J. (1999): Mapping the network for planning: a correlational PET activation study with the Tower of London task, in: Brain, 122 (10), S. 1973-1987.

Damasio, Antonio R.; Tranel, Daniel; Damasio, Hanna (1991): Somatic markers and the guidance of behaviour: theory and preliminary testing, in: Levin, Harvey S.; Eisenberg, Howard M.; Benton, Arthur L. (Eds.): Frontal lobe function and dysfunction, New York, Oxford University Press, S. 217-229.

Damasio, Antonio R. (1994): Descartes' Error: Emotion, Reason and the Human Brain, New York, G. P. Putnam.

Damasio, Antonio R. (1999): The Feeling of what happens - Body and Emotion in the Making of Consciousness, New York, Harcourt Brace & Company.

dasgehirn.info: Das Septum, <http://dasgehirn.info/entdecken/anatomie/das-septum> (abgerufen am 08.08.2013).

dasgehirn.info: Das Corpus callosum, <http://dasgehirn.info/entdecken/anatomie/das-corpus-callosum/> (abgerufen am 02.06.2014).

Deepe, Michael; Schwindt, Wolfram; Kugel, Harald; Plassmann, Hilke; Kenning, Peter (2005): Nonlinear responses within the medial prefrontal cortex reveal when specific implicit information influences economic decision making, in: Journal of Neuroimaging, 15 (2), S. 171-182.

Delgado, Mauricio R.; Nystrom, Leigh E.; Fissell, Kate; Noll, Douglas C.; Fiez, Julie A. (2000): Tracking the Hemodynamic Responses to Reward and Punishment in the Striatum, in: Journal of Neurophysiology, 84 (6), S. 3072-3077.

Desmond, John E.; Glover, Gary H. (2002): Estimating sample size in functional MRI (fMRI) neuroimaging studies: Statistical power analyses, in: Journal of Neuroscience Methods, 118 (2), S. 115-128.

Detre, John A.; Leigh, John S.; Williams, Ronald S.; Koretsky, Alan P. (1992): Perfusion Imaging, in: Magnetic Resonance in Medicine, 23 (1), S. 37-45.

Dierks, Thomas (2005): Elektroenzephalographie und Evozierte Potenziale, in: Walter, Henrik: Funktionelle Bildgebung in Psychiatrie und Psychotherapie - Methodische Grundlagen und klinische Anwendungen, Stuttgart, Schattauer, S. 129-150.

Dijksterhuis, Ap; Aarts, Henk (2010): Goals, Attention, and (Un)Consciousness, in: Annual Review of Psychology, 61, S. 467-490.

Diller, Hermann (2003): Preiswahrnehmung und Preispolitik, in: Diller, Hermann; Herrmann, Andreas (Hrsg.): Handbuch Preispolitik: Strategien - Planung - Organisation - Umsetzung, Wiesbaden, Gabler Verlag, S. 259-283.

Diller, Hermann (2007): Preispolitik, 4. Auflage, Stuttgart, Kohlhammer Verlag.

Ditton, Hartmut (1998): Mehrebenenanalyse - Grundlagen und Anwendungen des hierarchisch linearen Modells, Weinheim, Juventa-Verlag.

Donders, Franciscus C. (1868): Die Schnelligkeit psychischer Prozesse, in: Archiv für Anatomie, Physiologie und Wissenschaftliche Medizin, S. 657-681.

Elger, Christian E. (2009): Neuroleadership - Erkenntnisse der Hirnforschung für die Führung von Mitarbeitern, München, Haufe Verlag.

Elger, Christian E.; Schwarz, Friedhelm (2009): Neurofinance - Wie Vertrauen, Angst und Gier Entscheidungen treffen, München, Haufe Verlag.

Elliott, Rebecca; Friston, Karl J.; Dolan, Raymond J. (2000): Dissociable Neural Responses in Human Reward Systems, in: The Journal of Neuroscience, 20 (16), S. 6159-6165.

Erdem, Tülim; Swait, Joffre (1998): Brand Equity as a Signaling Phenomenon, in: Journal of Consumer Psychology, 7 (2), S. 131-157.

Erk, Susanne; Spitzer, Manfred; Wunderlich, Arthur P.; Galley, Lars; Walter, Henrik (2002): Cultural objects modulate reward circuitry, in: NeuroReport, 13 (18), S. 2499-2503.

Esch, Franz-Rudolf; Herrmann, Andreas; Sattler, Hendrik (2011): Marketing: Eine managementorientierte Einführung, 3. Auflage, München, Vahlen.

Esser, Beatrix (2002): Smart Shopping - Eine theoretische und empirische Analyse des preisleistungsorientierten Einkaufsverhaltens von Konsumenten, Lohmar, Josef Eul Verlag.

Evans, Alan C.; Collins, D. Louis; Mills, Stephan R.; Brown, D. Ellen; Kelly, Robert L.; Peters, Terence M. (1993): 3D statistical neuroanatomical models from 305 MRI volumes, in: Proc. IEEE-Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference, S. 1813-1817.

Fahrmeir, Ludwig; Künstler, Rita; Pigeot, Iris; Tutz, Gerhard (2011): Statistik - Der Weg zur Datenanalyse, 7. Auflage, Berlin, Springer-Verlag.

Falk, Emily B.; Berkman, Elliot T.; Lieberman, Matthew D. (2012): From neural responses to population behavior: Neural focus group predicts population-level media effects, in: *Psychological Science*, 23 (5), S. 439-445.

Fan, Jin; Flombaum, Jonathan I.; McCandliss, Bruce D.; Thomas, Kathleen M.; Posner, Michael I. (2003): Cognitive and brain consequences of conflict, in: *NeuroImage*, 18 (1), S. 42-57.

Fehr, Ernst; Gächter, Simon (2002): Altruistic Punishment in Humans, in: *Nature*, 415 (6868), S. 137-140.

Felix, Christian (2008): Neuromarketing - Ein innovativer Ansatz zur Erklärung des Konsumentenverhaltens unter Berücksichtigung der Wirkung von Marken, Hamburg, Diplomica Verlag.

Fliessbach, Klaus; Weber, Bernd; Trautner, Peter; Dohmen, Thomas; Sunde, Uwe; Elger, Christian E.; Falk, Armin (2007): Social Comparison Affects Reward-Related Brain Activity in the Human Ventral Striatum, in: *Science*, 318 (5854), S. 1305-1308.

Fliessbach, Klaus; Rohe, Tim; Linder, Nicholas S.; Trautner, Peter; Elger, Christian E.; Weber, Bernd (2010): Retest reliability of reward-related BOLD signals, in: *NeuroImage*, 50 (3), S. 1168-1176.

Foscht, Thomas; Swoboda, Bernhard (2007): Käuferverhalten - Grundlagen - Perspektiven - Anwendungen, 3. Auflage, Wiesbaden, Gabler.

Fossati, Philippe; Hevenor, Stephanie J.; Graham, Simon J.; Grady, Cheryl; Keightley, Michelle L.; Craik, Fergus; Mayberg, Helen (2003): In search of the emotional self: an fMRI study using positive and negative emotional words, in: *The American Journal of Psychiatry*, 160 (11), S. 1938-1945.

Frahm, Jens; Bruhn, Harald; Merboldt, Klaus-Dietmar; Hanicke, Wolfgang (1992): Dynamic MRI of human brain oxygenation during rest and photic stimulation, in: *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 2 (5), S. 501-505.

Freund, Wolfgang; Stuber, Gregor; Wunderlich, Arthur P.; Schmitz, Bernd (2007): Cortical correlates of perception and suppression of electrically induced pain, in: *Somatosensory & Motor Research*, 24 (4), S. 203-212.

Friston, Karl J.; Holmes, Andrew P.; Worsley, Keith J.; Poline, Jean-Baptiste; Frith, Christopher D.; Frackowiak, Richard S. J. (1994): Statistical Parametric Maps in Functional Imaging: A General Linear Approach, in: *Human Brain Mapping*, 2 (4), S. 189-210.

Friston, Karl J. (2004): Experimental Design and Statistical Parametric Mapping, in: Frackowiak, Richard S. J.; Friston, Karl J.; Frith, Christopher D.; Dolan, Raymond J.; Price, Cathy J.; Zeki, Semir; Ashburner, John T.; Penny William D. (Eds.): Human Brain Function , 2nd Edition, San Diego [u.a.], Academic Press, S. 599-632.

Gaser, Christian (2013): Räumliche Vorverarbeitung funktioneller Bilddaten, SPM-Kurs zur funktionellen Bildgebung, https://www.uke.de/institute/systemische-neurowissenschaften/downloads/institut-systemische-neurowissenschaften/spmkurs_2013_af_gaser_raeumliche_Vorverarbeitung.pdf.

Gazzaniga, Michael S.; Bogen, Joseph E.; Sperry, Roger W. (1965): Observation on visual perception after disconnexion of the cerebral hemispheres in man, in: Brain, 88 (2), S. 221-236.

Gedenk, Karen (2002): Verkaufsförderung, München, Verlag Vahlen.

Gedenk, Karen (2003): Preis-Promotions, in: Diller, Hermann; Herrmann, Andreas (Hrsg.): Handbuch Preispolitik: Strategien - Planung - Organisation - Umsetzung, Wiesbaden, Gabler Verlag, S. 597-621.

Gehirn-Atlas: Cingulum, Gyrus Cinguli, <http://www.gehirn-atlas.de/cingulum.html> (abgerufen am 08.08.2013).

Gehirn-Atlas: Das Belohnungssystem und assoziierte Hirnregionen, <http://www.gehirn-atlas.de/belohnungssystem.html> (abgerufen am 08.08.2013).

Genovese, Christopher R.; Lazar, Nicole A.; Nichols, Thomas (2002): Thresholding of Statistical Maps in Functional Neuroimaging using the False Discovery Rate, in: NeuroImage, 15 (4), S. 870-878.

Gertz, S. David (2003): Basiswissen Neuroanatomie - Leicht verständlich - Knapp - Klinikbezogen, 4. Auflage, Stuttgart, Thieme.

GfK online - Pressemitteilung 3. April 2009: Markenorientierung in Europa, http://www.gfk-verein.de/index.php?article_id=65&clang=0 (abgerufen am 10.09.2013).

Glimcher, Paul W.; Camerer, Colin F.; Fehr, Ernst; Poldrack, Russel A. (2009): Introduction: A Brief History of Neuroeconomics, in: Glimcher, Paul W.; Camerer, Colin F.; Fehr, Ernst; Poldrack, Russel A. (Eds.): Neuroeconomics - Decision Making and the Brain, Amsterdam, Elsevier, S. 1-12.

Goebel, Rainer; Kriegeskorte, Nikolaus (2005a): Funktionelle Magnetresonanztomographie, in: Walter, Henrik: Funktionelle Bildgebung in Psychiatrie und Psychotherapie - Methodische Grundlagen und klinische Anwendungen, Stuttgart, Schattauer, S. 22-30.

Goebel, Rainer; Kriegeskorte, Nikolaus (2005b): Datenanalyse für funktionell bildgebende Verfahren, in: Walter, Henrik: Funktionelle Bildgebung in Psychiatrie und Psychotherapie - Methodische Grundlagen und klinische Anwendungen, Stuttgart, Schattauer, S. 31-58.

Goldstein, Harvey (2011): Multilevel Statistical Models, 4th Edition, Chichester, West Sussex, Wiley.

Graf, Wolfgang; Hamer, Hajo M. (2012): Elektroenzephalografie - Eine Übersicht, in: Nervenheilkunde, Heft 5, S. 325-333.

Gu, Xiaosi; Han, Shihui (2007): Attention and reality constraints on the neural processes of empathy for pain, in: NeuroImage, 36 (1), S. 256-267.

Haacke, E. Mark; Lai, Song; Reichenbach, Jürgen R.; Kuppusamy, Karthikeyan; Hoogenraad, Frank G. C.; Takeichi, Hiroshige; Lin, Weili (1997): In vivo measurement of blood oxygen saturation using magnetic resonance imaging: A direct validation of the blood oxygen level-dependent concept in functional brain imaging, in: Human Brain Mapping, 5 (5), S. 341-346.

Hain, Cornelia; Kenning, Peter; Lehmann-Waffenschmidt, Marco (2007): Neuroökonomie und Neuromarketing, Neurale Korrelate strategischer Entscheidungen, in: Priddat, Birger P. (Hrsg.): Neuroökonomie - Neue Theorien zu Konsum, Marketing und emotionalem Verhalten in der Ökonomie, Marburg, Metropolis-Verlag, S. 69-108.

Hampton, Alan N.; Adolphs, Ralph; Tyszka, Julian M.; O'Doherty, John P. (2007): Contributions of the Amygdala to Reward Expectancy and Choice Signals in Human Prefrontal Cortex, in: Neuron, 55 (4), S. 545-555.

Hardesty, David M.; Bearden, William O. (2003): Consumer evaluations of different promotion types and price presentation: the moderating role of promotional benefit level, in: Journal of Retail, 79 (1), S. 17-25.

Hartung, Joachim; Elpelt, Bärbel; Klösener, Karl-Heinz (2009): Statistik - Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik, 15. Auflage, München, Oldenbourg.

Hauck, Matthias (2004): „Geiz ist geil!“ - Megatrend mit Happy-End?, in: ifo-GfK-Konsumreport, o. Jg., Heft 3, S. 9.

Häusel, Hans-Georg (2005): Think Limbic! Die Macht des Unbewussten verstehen und nutzen für Motivation, Marketing, Management, 4. Auflage, München, Rudolf Haufe Verlag.

Häusel, Hans-Georg (2007): V. und VI.: Methoden des Neuromarketings und Brain's Who is Who, in: Häusel, Hans-Georg (Hrsg.): Neuromarketing - Erkenntnisse der Hirnforschung für Markenführung, Werbung und Verkauf, 1. Auflage, Freiburg, Rudolf Haufe, S. 210-227.

Häusel, Hans-Georg (2011): Die wissenschaftliche Fundierung des Limbic® Ansatzes, http://www.nymphenburg.de/tl_files/pdf/121129%20Wiss%20Fundierung%20Limbic-Ansatz.pdf.

Häusel, Hans-Georg (2012a): Brain View - Warum Kunden kaufen, 3. Auflage, München, Haufe-Lexware.

Häusel, Hans-Georg (2012b): Limbic®: Die Emotions- und Motivwelten im Gehirn des Kunden und Konsumenten kennen und treffen, in: Häusel, Hans-Georg: Neuro-marketing, 2. Auflage, München, Haufe Verlag, S. 69-95.

Haynes, John-Dylan; Sakai, Katsuyuki; Rees, Geraint; Gilbert, Sam; Frith, Chris; Passingham, Richard E. (2007): Reading hidden intentions in the human brain, in: Current Biology, 17 (4), S. 323-328.

Haynes, John-Dylan (2011): Auf den Spuren unseres Denkens (III), in: Süddeutsche Zeitung Magazin, Nr. 21, S. 23-25.

Heinzerling, Jürgen (1994): Technische und klinische Grundlagen - Grundlagen, in: Stichnoth, Falko-A.: MR-Tomographie, 2. Auflage, Berlin, Blackwell-Wissenschafts-Verlag, S. 3-22.

Helson, Henry (1964): Adaptation Level Theory: An experimental and systematic approach to behaviour, New York, Harper & Row.

Heun, Reinhard; Meyer-Lindenberg, Andreas (2001): Statistische Verfahren in der Analyse von funktionellen MRT-Paradigmen, in: Klinische Neuroradiologie, 11 (2), S. 67-82.

Hinrichs, Hermann (2010): Technik, in: Ebner, Alois; Deuschl, Günther (Hrsg.): EEG, 2. Auflage, Stuttgart, Thieme, S. 10-17.

Howard, John A.; Sheth, Jagdish N. (1969): The Theory of Buying Behavior, New York, Wiley.

Huettel, Scott A.; Stowe, C. Jill; Gordon, Evan M.; Warner, Brent T.; Platt, Michael L. (2006): Neural Signatures of Economic Preferences for Risk and Ambiguity, in: Neuron, 49 (5), S. 765-775.

Huettel, Scott A.; Song, Allen W.; McCarthy, Gregory (2009): Functional Magnetic Resonance Imaging, 2nd Edition, Massachusetts (USA), Sinauer Associates.

Hummell, Hans J. (1972): Probleme der Mehrebenenanalyse, Stuttgart, Teubner.

Huster, Rene J.; Debener, Stefan; Eichele, Tom; Herrmann, Christopher S. (2012): Methods for simultaneous EEG-fMRI: An Introductory Review, in: The Journal of Neuroscience, 32 (18), S. 6053-6060.

Hutcherson, Cendri A.; Plassmann, Hilke; Gross, James J.; Rangel, Antonio (2012): Cognitive Regulation during Decision Making Shifts Behavioral Control between Ventromedial and Dorsolateral Prefrontal Value Systems, in: The Journal of Neuroscience, 32 (39), S. 13543-13554.

Izuma, Keise; Saito, Daisuke N.; Sadato, Norihiro (2008): Processing of Social and Monetary Rewards in the Human Striatum, in: Neuron, 58 (2), S. 284-294.

Jagemann, Kay-Uwe: Aktionspotenzial, <http://www.jagemann-net.de/biologie/bio13/neurobiologie/aktionspotenzial/aktionspotenzial.php> (abgerufen am 13.08.2013).

Jäncke, Lutz (2005): Methoden der Bildgebung in der Psychologie und kognitiven Neurowissenschaften, Stuttgart, Kohlhammer.

Jäncke, Lutz (2010): Bildgebende Verfahren, in: Holling, Heinz; Schmitz, Bernhard (Hrsg.): Handbuch Statistik, Methoden und Evaluation, Göttingen, Hogrefe-Verlag, S. 101-111.

Jin, Jianming (1999): Electromagnetic Analysis and Design in Magnetic Resonance Imaging, Boca Raton (Florida), CRC Press.

Kable, Joseph W.; Glimcher, Paul W. (2007): The neural correlates of subjective value during intertemporal choice, in: Nature Neuroscience, 10 (12), S. 1625-1633.

Kahneman, Daniel; Tversky, Amos (1979): Prospect Theory: An Analysis of Decision under Risk, in: Econometrica, 47 (2), S. 263-292.

Kandel, Eric R. (1996): Neurowissenschaften - Eine Einführung, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

Kappelhoff, Peter (2000): Skript zur Vorlesung - Methoden der empirischen Wirtschafts- und Sozialforschung, 4. Auflage, <http://temme.wiwi.uni-wuppertal.de/fileadmin/kappelhoff/Downloads/Vorlesung/skriptkomplett.pdf>.

Kaufmann, Christian; Auer, Dorothee P. (2002): Bildgebende Verfahren in der psychiatrischen Hirnforschung, in: Psychotherapie 7. Jahrgang, 7 (2), S. 196-202.

Kellermann, Thilo (2007): Evaluation von Gruppenunterschieden bei fMRI-Daten an einem Beispiel aus der psychiatrischen Forschung, Technische Hochschule Aachen.

Kellermann, Thilo; Habel, Ute (2013): Planung und Umsetzung experimenteller Paradigmen, in: Schneider, Frank; Fink, Gereon R. (Hrsg.): Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, S. 131-150.

Kenning, Peter; Plassmann, Hilke (2005): Neuroeconomics - An overview from an economic perspective, in: Brain Research Bulletin, 67 (5), S. 343-354.

Kenning, Peter (2007): Neuromarketing: Vom Hype zur Realität, in: Häusel, Hans-Georg (Hrsg.): Neuromarketing - Erkenntnisse der Hirnforschung für Markenführung, Werbung und Verkauf, 1. Auflage, Freiburg, Haufe, S. 17-31.

Kenning, Peter; Mohr, Peter; Plassmann, Hilke (2007): Was kostet Angst? Eine neuroökonomische Studie zum Home-Bias, in: Priddat, Birger P. (Hrsg.): Neuroökonomie - Neue Theorien zu Konsum, Marketing und emotionalem Verhalten in der Ökonomie, Marburg, Metropolis-Verlag, S. 171-189.

Kenning, Peter; Plassmann, Hilke; Ahlert, Dieter (2007): Consumer Neuroscience - Implikationen neurowissenschaftlicher Forschung für das Marketing, in: Marketing ZFP, Heft 1, S. 57-68.

Kenning, Peter; Plassmann, Hilke; Kugel, Harald; Schwindt, Wolfram; Pieper, Anna; Deppe, Michael (2007): Neural correlates of attractive ads, in: Koschnick, Wolfgang J. (Hrsg.): Focus-Jahrbuch: Schwerpunkt: Neuroökonomie, Neuromarketing und Neuromarktforschung, München, Focus-Magazin-Verlag, S. 287-298.

Kirchbaum, Clemens (2008): Biopsychologie von A bis Z, Heidelberg, Springer Medizin Verlag.

Kirmani, Amna; Rao, Akshay R. (2000): No Pain, No Gain: A Critical Review of the Literature on Signaling unobservable Product Quality, in: Journal of Marketing, 64 (2), S. 66-79.

Klinke, Rainer; Pape, Hans-Christian; Kurtz, Armin; Silbernagl, Stefan (2009): Physiologie, 6. Auflage, Stuttgart, Thieme.

Klose, Uwe; Erb, Michael; Raddi, Antonella; Grodd, Wolfgang (1999): Funktionelle Bildgebung mit der Magnetresonanztomographie, in: Electromedica 67, S. 27-36.

Knutson, Brian; Adams, Charles M.; Fong, Grace W.; Hommer, Daniel (2001): Anticipation of Increasing Monetary Reward Selectively Recruits Nucleus Accumbens, in: The Journal of Neuroscience, 21 (16), S. 1-5.

Knutson, Brian; Taylor, Jonathan; Kaufman, Matthew; Peterson, Richard; Glover, Gary H. (2005): Distributed Neural Representation of Expected Value, in: The Journal of Neuroscience, 25 (19), S. 4806-4812.

Knutson, Brian; Bossaerts, Peter (2007): Neural Antecedents of Financial Decisions, in: The Journal of Neuroscience, 27 (31), S. 8174-8177.

Knutson, Brian; Rick, Scott; Wimmer G. Elliot; Prelec, Drazen; Loewenstein, George (2007): Neural Predictors of Purchases, in: Neuron, 53 (1), S. 147-156.

Kosslyn, Stephen M.; Shin, Lisa M.; Thompson, William L.; McNally, Richard J.; Rauch, Scott L.; Pitman, Roger K.; Alpert, Nathaniel M. (1996): Neural effects of visualizing and perceiving aversive stimuli: a PET investigation, in: NeuroReport, 7 (10), S. 1569-1576.

Kringelbach, Morten L. (2005): The Human orbitofrontal cortex: Linking reward to hedonic experience, in: Nature Reviews Neuroscience, 6 (9), S. 691-702.

Kroeber-Riel, Werner (1972): Marketingtheorie, verhaltensorientierte Erklärungen von Marktreaktionen, Köln, Kiepenheuer & Witsch.

Kroeber-Riel, Werner; Gröppel-Klein, Andrea (2013): Konsumentenverhalten, 10. Auflage, München, Vahlen.

Kuhnen, Camelia M.; Knutson, Brian (2005): The Neural Basis of Financial Risk Taking, in: Neuron, 47 (5), S. 763-770.

Kuhnt, Daniela; Bauer, Miriam H. A.; Nimsky, Christopher (2013): Präoperative fMRT-Diagnostik, Neuronavigation, in: Schneider, Frank; Fink, Gereon R. (Hrsg.): Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, S. 258-265.

Kwong, Kenneth K.; Belliveau, John W.; Chesler, David A.; Goldberg, Inna E.; Weisskoff, Robert M.; Poncelet, Brigitte P.; Kennedy, David N.; Hoppel, Bernice E.; Cohen, Mark S.; Turner, Robert; Cheng, Hong-Ming; Brady, Thomas J.; Rosen, Bruce R. (1992): Dynamic Magnetic Resonance Imaging of Human Brain Activity During Primary Sensory Stimulation, in: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 89 (12), S. 5675-5679.

Langer, Wolfgang (2009): Mehrebenenanalyse - Eine Einführung für Forschung und Praxis, 2. Auflage, Wiesbaden, VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Larmor, Joseph (1898): On the Origins of Magneto-Optic Rotation, in: Proceedings of the Cambridge Philosophical Society, 10, S. 181-182.

Lauterbur, Paul C. (1973): Image formation by induced local interactions: Examples employing NMR, in: Nature, 242, S. 190-191.

LeDoux, Joseph E.; Wilson, Donald H.; Gazzaniga, Michael S. (1977): A divided mind: observations on the conscious properties of the separated hemispheres, in: Annals of Neurology, 2 (5), S. 417-421.

LeDoux, Joseph E. (1993): Cognition versus Emotion, again - this time in the brain: a response to Parrott and Schulkin, in: Cognition and Emotion, 7 (1), S. 61-64.

LeDoux, Joseph E. (1994): Emotion, Memory and the Brain - The neural routes underlying the formation of memories about primitive emotional experiences, such as fear, have been traced, in: Scientific American, 270 (6), S. 50-57.

LeDoux, Joseph E. (1998): The emotional brain. The mysterious underpinnings of emotional life, New York, Simon & Schuster.

Linder, Nicolas S.; Uhl, Gabriele; Fließbach, Klaus; Trautner, Peter; Elger, Christian E.; Weber, Bernd (2010): Organic labeling influences food valuation and choice, in: NeuroImage, 53 (1), S. 215-220.

Loewenstein, George; Lerner, Jennifer S. (2003): The Role of Affect in Decision Making, in: Davidson, Richard J.; Scherer, Klaus R.; Goldsmith, H. Hill (Eds.): Handbook of affective Sciences, New York, Oxford University Press, S. 619-642.

Logan, Brent R.; Geliaskova, Maya P.; Rowe, Daniel B. (2008): An Evaluation of Spatial Thresholding Techniques in fMRI Analysis, in: Human Brain Mapping, 29 (12), S. 1379-1389.

Magnetic Lab: Darn that aching back (Coyne, Kristen), <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/magnetacademy/mri/fullarticle.html> (abgerufen am 26.04.2013).

Mansfield, Peter; Grannell, Peter K. (1973): NMR 'diffraction' in solids, in: Journal of Physics C: Solid State Physics, 6 (22), S. 422-426.

Markenverband, Gesellschaft für Konsum (GfK), Serviceplan (2006): 70 Prozent Innovationsflops - Das vermeidbare Fehlinvestment von 10 Milliarden Euro im Jahr, Pressemitteilung (20.04.2006), http://presse.serviceplan.de/uploads/tx_sppresse/301.pdf.

Mathiak, Klaus; Goebel, Rainer; Weiskopf, Nikolaus (2013): Echtzeit-fMRT, in: Schneider, Frank; Fink, Gereon R. (Hrsg.): Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, S. 103-117.

McClure, Samuel M.; Li, Jian; Tomlin, Damon; Cypert, Kim S.; Montague, Latane M.; Montague, P. Read (2004): Neural Correlates of Behavioural Preference for Culturally Familiar Drinks, in: Neuron, 44 (2), S. 379-387.

Meffert, Heribert; Burmann, Christoph; Kirchgeorg, Manfred (2012): Marketing - Grundlagen marktorientierter Unternehmensführung, 11. Auflage, Wiesbaden, Gabler.

Mela, Carl F.; Gupta, Sunil; Lehmann, Donald R. (1997): The Long-Term Impact of Promotion and Advertising on Consumer Brand Choice, in: Journal of Marketing Research, 34 (2), S. 248-261.

Menche, Nicole (2007): Biologie, Anatomie, Physiologie, 6. Auflage, München, Urban & Fischer Verlag.

Metter, E. Jeffrey; Hanson, Wayne R. (1994): Use of Positron Emission Tomography to Study Aphasia, in: Kertesz, Andrew: Localization and Neuroimaging in Neuropsychology, San Diego, Academic Press, S. 123-149.

Meyer, Martin (2013): Auditorisches System in: Schneider, Frank; Fink, Gereon R. (Hrsg.): Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, S. 345-358.

mindhive: Slice Timing FAQ, <http://mindhive.mit.edu/node/109> (abgerufen am 06.05.2014).

Mörrike, Klaus D.; Betz, Eberhard; Mergenthaler, Walter (2007): Biologie des Menschen, 15. Auflage, Hamburg, Nikol Verlag.

MRC Cognition and Brain Sciences Unit: SPM templates and other images ..., <http://imaging.mrc-cbu.cam.ac.uk/imaging/Templates> (abgerufen am 16.03.2014).

Müller, Tina; Schroiff, Hans-Willi (2013): Warum Produkte floppen - Die 10 Todsünden des Marketings, 1. Auflage, Freiburg, Haufe-Lexware.

Munk, Matthias (2011): Funktionelle Struktur von Nerven- und Sinneszellen, in: Munk, Katharina (Hrsg.): Zoologie, Stuttgart, Thieme, S. 410-484.

Naqvi, Nasir H.; Rudrauf, David; Damasio, Hanna; Bechara, Antoine (2007): Damage to the Insula Disrupts Addiction to Cigarette Smoking, in: Science, 315 (5811), S. 531-534.

Neuhaus, Volker (2001): Smart Shopper - Herausforderungen einer neuen Konsumgeneration, in: Frey, Ulrich D. (Hrsg.): POS-Marketing - Integrierte Kommunikation für den Point of Sale, Wiesbaden, Gabler Verlag, S. 11-31.

NeuroBehavioral Systems (NBS): Presentation, <http://neurobs.com> (abgerufen am 05.02.2014).

Nichols, Thomas; Hayasaka, Satoru (2003): Controlling the familywise error rate in functional neuroimaging: a comparative review, in: Statistical Methods in Medical Research, 12 (5), S. 419-446.

Nishimoto, Shinji; Vu, An T.; Naselaris, Thomas; Benjamini, Yuval; Yu, Bin; Gallant, Jack L. (2011): Reconstructing Visual Experiences from Brain Activity Evoked by Natural Movies, in: Current Biology, 21, S. 1641-1646.

No Lie fMRI, Inc.: Startseite, <http://www.noliemri.com/index.htm> (abgerufen am 11.09.2014).

Noll, Douglas C. (2001): A Primer on MRI and fMRI, Departments of Biomedical Engineering and Radiology, University of Michigan, http://www.bme.umich.edu/labs/dnoll/files/MRI_fmri_primer.pdf.

Nordic NeuroLab (NNL): Hardware, http://nordicneurolab.com/Products_and_Solutions/fMRI_Hardware/index.aspx (abgerufen am 14.12.2013).

O'Craven, Kathleen M.; Kanwisher, Nancy (2000): Mental imagery of faces and places activates corresponding stimulus-specific brain regions, in: Journal of Cognitive Neuroscience, 12 (6), S. 1013-1023.

O'Doherty, John P.; Kringelbach, Morten L.; Rolls, Edmund T.; Hornak, Julia; Andrews, Caroline (2001): Abstract reward and punishment representations in the human orbitofrontal cortex, in: Nature Neuroscience, 4 (1), S. 95-102.

O'Doherty, John P.; Critchley, Hugo; Deichmann, Ralf; Dolan, Raymond J. (2003): Dissociating Valence of Outcome from Behavioral Control in Human Orbital and Ventral Prefrontal Cortices, in: *The Journal of Neuroscience*, 23 (21), S. 7931-7939.

O'Doherty, John P. (2004): Reward representations and reward-related learning in the human brain: insights from neuroimaging, in: *Current Opinion in Neurobiology*, 14 (6), S. 769-776.

Ogawa, Sehi; Tank, David W.; Menon, Ravi; Ellermann, Jutta M.; Kim, Seong-Gi; Merkle, Hellmut; Ugurbil, Kamil (1992): Intrinsic Signal Changes Accompanying Sensory Stimulation: Functional Brain Mapping with Magnetic Resonance Imaging, in: *Proceedings of the National Academy of Science of the USA*, 89 (13), S. 5951-5955.

Olausson, Hakan; Lamarre, Yves; Backlund, Helena; Morin, Chantal; Wallin, B. Gunnar; Starck, Göran; Ekholm, Sven; Strigo, Irina; Worsley, Keith; Vallbo, Ake B.; Bushnell, M. Catherine (2002): Unmyelinated tactile afferents signal touch and project to insular cortex, in: *Nature Neuroscience*, 4 (9), S. 900-904.

Olds, James; Milner, Peter (1954): Positive reinforcement produced by electrical stimulation of septal area and other regions of rat brain, in: *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 47 (6), S. 419-427.

Olsson, Andreas; Nearing, Katherine I.; Phelps, Elizabeth A. (2007): Learning fears by observing others: the neural systems of social fear transmission, in: *Social Cognitive and Affective Neuroscience*, 2 (1), S. 3-11.

Owen, Adrian M. (2000): The role of the lateral frontal cortex in mnemonic processing: the contribution of functional neuroimaging, in: *Experimental Brain Research*, 133 (1), S. 33-43.

Owen, Adrian M.; McMillan, Kathryn M.; Laird, Angela R.; Bullmore, Ed (2005): N-Back Working Memory Paradigm: A Meta-Analysis of Normative Functional Neuroimaging Studies, in: *Human Brain Mapping*, 25 (1), S. 46-59.

Parker, Steve (2008): *Der menschliche Körper*, München, Dorling Kindersley.

Pauling, Linus; Coryell, Charles D. (1936): The Magnetic Properties and Structure of Hemoglobin, Oxyhemoglobin and Carbonmonoxyhemoglobin, in: *Proceedings of the National Academy of Science*, 22 (1), S. 210-216.

Paulus, Martin P.; Frank, Lawrence R. (2003): Ventromedial prefrontal cortex activation is critical for preference judgments, in: *NeuroReport*, 14 (10), S. 1311-1315.

Paulus, Martin P.; Stein, Murray B. (2006): An Insular View of Anxiety, in: *Biological Psychiatry*, 60 (4), S. 383-387.

Penny, William D.; Holmes, Andrew P. (2004): Random-Effects-Analysis, in: Frackowiak, Richard S. J.; Friston, Karl J.; Frith, Christopher D.; Dolan, Raymond J.; Price, Cathy J.; Zeki, Semir; Ashburner, John T.; Penny William D. (Eds.): Human Brain Function , 2nd Edition, San Diego [u.a.], Academic Press, S. 843-850.

Peters, Theo; Ghadiri, Argang (2013): Neuroleadership - Grundlage, Konzepte, Beispiele, 2. Auflage, Wiesbaden, Springer.

Phillips, Mary L.; Young, Andrew W.; Senior, Carl; Brammer, Michael; Andrew, Christopher; Calder, Andrew J.; Bullmore, Edward T.; Perrett, David I.; Rowland, Duncan; Williams, Steven C. R.; Gray, Jeffrey A.; David, Anthony S. (1997): A specific neural substrate for perceiving facial expressions of disgust, in: Nature, 389 (6650), S. 495-498.

Pinel, John P. J.; Pauli, Paul (2012): Biopsychologie, 8. Auflage, München, Pearson.

Planung & Analyse: Preisstudie-Studie von OC&C-Strategy Consultants (2012), http://www.planung-analyse.de/news/studien/pages/protected/Ausgepraegtes-Preisbewusstsein-in-Deutschland_5753.html (abgerufen am 20.12.2013).

Plassmann, Hilke (2006): Der Einfluss von Emotionen auf Markenproduktentscheidungen - Theoretische Fundierung und empirische Analyse mit Hilfe der funktionellen Magnetresonanztomographie, Wiesbaden, Deutscher Universitäts-Verlag.

Plassmann, Hilke; Kenning, Peter; Ahlert, Dieter (2007): Why Companies should make their Customers happy: The Neural Correlates of Customer Loyalty, in: Advances in Consumer Research, 34, S. 735-739.

Plassmann, Hilke; O'Doherty, John; Shiv, Baba; Rangel, Antonio (2008): Marketing actions can modulate neural representations of experienced pleasantness, in: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105 (3), S. 1050-1054.

Ploghaus, Alexander; Tracey, Irene; Gati, Joseph S.; Clare, Stuart; Menon, Ravi S.; Matthews, Paul M.; Rawlins, J. Nicholas P. (1999): Dissociating Pain from Its Anticipation in the Human Brain, in: Science, 284 (5422), S. 1979-1981.

Poldrack, Russel A.; Mumford, Jeanette A. (2009): Independence in ROI analysis: where is the voodoo?, in: Social cognitive and affective neuroscience, 4 (2), S. 208-213.

Pritzel, Monika; Brand, Matthias; Markowitsch, Hans J. (2009): Gehirn und Verhalten - Ein Grundkurs der physiologischen Psychologie, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

Raab, Gerhard; Gernsheimer, Oliver; Schindler, Maik (2009): Neuromarketing: Grundlagen - Erkenntnisse - Anwendungen, Wiesbaden, Gabler.

Raab, Gerhard; Elger, Christian E.; Neuner, Michael; Weber, Bernd (2011): A Neurological Study of Compulsive Buying Behaviour, in: Journal of Consumer Policy, 34 (4), S. 401-413.

Reynolds, Sheila M.; Zahm, Daniel S. (2005): Specificity in the Projections of Prefrontal and Insular Cortex to Ventral Striatopallidum and the Extended Amygdala, in: The Journal of Neuroscience, 25 (50), S. 11757-11767.

Rogers, Robert L. (1994): Magnetoencephalographic Imaging of cognitive Processes, in: Thatcher, Robert W.: Functional Neuroimaging: technical foundations, San Diego, Academic Press, S. 289-297.

Rolls, Edmund T. (2000): The orbitofrontal cortex and reward, in: Cerebral Cortex, 10 (3), S. 284-294.

Rolls, Edmund T.; McCabe, Ciara; Redoute, Jerome (2008): Expected Value, Reward Outcome, and Temporal Difference Error Representations in a Probabilistic Decision Task, in: Cerebral Cortex, 18 (3), S. 652-663.

Rosengarten, Bernhard; Gerriets, Tibo; Stolz, Erwin (2005): Funktionelle Doppelsonographie, in: Kaps, Manfred; von Reutern, Gerhard-M.; Stolz, Erwin; Freund, Hans-J. (Hrsg.): Ultraschall in der Neurologie, 2. Auflage, Stuttgart, Thieme, S. 184-194.

Rösler, Frank (2011): Psychophysiologie der Kognition - Eine Einführung in die Neurowissenschaft, Heidelberg, Springer Akademischer Verlag.

Roth, Gerhard (2001): Fühlen, Denken, Handeln, Frankfurt am Main, Suhrkamp.

Roth, Gerhard (2003): Aus Sicht des Gehirns, Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag.

Roth, Gerhard; Pauen, Michael (2008): Freiheit, Schuld und Verantwortung. Grundzüge einer naturalistischen Theorie der Willensfreiheit., Frankfurt am Main, Suhrkamp Verlag.

Roth, Gerhard (2009): Persönlichkeit, Entscheidung und Verhalten, 5. Auflage, Stuttgart, Klett-Cotta.

Roth, Gerhard (2010): Wie einzigartig ist der Mensch - Die lange Evolution der Gehirne und des Geistes, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

Rowe, James B.; Owen, Adrian M.; Johnsrude, Ingrid S.; Passingham, Richard E. (2001): Imaging the mental components of a planning task, in: Neuropsychologia, 39 (3), S. 315-327.

Runia, Peter; Wahl, Frank; Geyer, Olaf; Thewissen, Christian (2011): Marketing - Eine prozess- und praxisorientierte Einführung, 3. Auflage, München, Oldenbourg.

Rypma, Bart; D'Esposito, Mark (1999): The roles of prefrontal brain regions in components of working memory: Effects of memory load and individual differences, in: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 96 (11), S. 6558-6563.

Rypma, Bart; Prabhakaran, Vivek; Desmond, John E.; Glover, Gary H.; Gabrieli, John D. E. (1999): Load-Dependent Roles of Frontal Brain Regions in the Maintenance of Working Memory, in: NeuroImage, 9 (2), S. 216-226.

Rypma, Bart; Berger, Jeffrey S.; D'Esposito, Mark (2002): The Influence of Working-Memory Demand and Subject Performance on Prefrontal Cortical Activity, in: Journal of Cognitive Neuroscience, 14 (5), S. 721-731.

Saito, Daisuke N.; Okada, Tomohisa; Honda, Manabu; Yonekura, Yoshiharu; Sadato, Norihiro (2006): Practice makes perfect: the neural substrates of tactile discrimination by Mah-Jong experts include the primary visual cortex, in: BioMed Central Neuroscience, 7 (79), S. 1-10.

Sanfey, Alan G.; Rilling, James K.; Aronson, Jessica A.; Nystrom, Leigh E.; Cohen, Jonathan D. (2003): The Neural Basis of Economic Decision-Making in the Ultimatum Game, in: Science, 300 (5626), S. 1755-1758.

Schacter, Daniel L.; Harbluk, Joanne L.; McLachlan, Donald R. (1984): Retrieval without recollection: an experimental analysis of source amnesia, in: Journal of Verbal Learning and Verbal Behaviour, 23 (5), S. 593-611.

Schall, Ulrich; Johnston, Patrick; Lagopoulos, Jim; Jüptner, Markus; Jentzen, Walter; Thienel, Renate; Dittmann-Balcar, Alexandra; Bender, Stefan; Ward, Philip B. (2003): Functional brain maps of Tower of London performance: a positron emission tomography and functional magnetic resonance imaging study, in: NeuroImage, 20 (2), S. 1154-1161.

Schandry, Rainer (1998): Lehrbuch Psychophysiologie, 3. Auflage, Weinheim, Beltz Verlage.

Schandry, Rainer (2011): Biologische Psychologie, Weinheim, Beltz Verlage.

Scheier, Christian; Held, Dirk (2008): Die Neuentdeckung des Unbewussten: was wir von der Hirnforschung für Markenführung und Marktforschung lernen können, in: Meyer, Henning: Marken-Management 2008/ 2009, Frankfurt am Main, Deutscher Fachverlag, S. 229-255.

Scheier, Christian; Held, Dirk (2012a): Wie Werbung wirkt - Erkenntnisse des Neuromarketing, 2. Auflage, München, Haufe Verlag.

Scheier, Christian; Held, Dirk (2012b): Die Neuro-Logik erfolgreicher Markenkommunikation, in: Häusel, Hans-Georg: Neuromarketing, 2. Auflage, München, Haufe Verlag, S. 97-134.

Scheier, Christian; Held, Dirk; Schneider, Johannes; Bayas-Linke, Dirk (2012): Codes - Die geheime Sprache der Produkte, 2. Auflage, München, Haufe Verlag.

Schindler, Robert M. (1989): The Excitement of Getting a Bargain: Some Hypotheses Concerning the Origins and Effects of Smart-Shopper Feelings, in: Advances in Consumer Research, 16 (1), S. 447-453.

Schmidt, Robert F.; Schaible, Hans-Georg (2006): Neuro- und Sinnesphysiologie, 5. Auflage, Heidelberg, Springer Medizin Verlag.

Schnitzler, Alfons; Gross, Joachim (2005): Magnetoenzephalographie (MEG), in: Walter, Henrik: Funktionelle Bildgebung in Psychiatrie und Psychotherapie - Methodische Grundlagen und klinische Anwendungen, Stuttgart, Schattauer, S. 151-161.

Schoenbaum, Geoffrey; Takahashi, Yuji; Liu, Tzu-Lan; McDannald, Michael A. (2011): Does the orbitofrontal cortex signal value?, in: Annals of the New York Academy of Sciences, 1239, S. 87-99.

Schoenmakers, Sanne; Barth, Markus; Heskes, Tom; van Gerven, Marcel (2013): Linear reconstruction of perceived images from human brain activity, in: NeuroImage, 83, S. 951-961.

Schultz, Wolfram; Dayan, Peter; Montague, P. Read (1997): A Neural Substrate of Prediction and Reward, in: Science, 275 (5306), S. 1593-1599.

Schultz, Wolfram (2006): Behavioral Theories and the Neurophysiology of Reward, in: Annual Review of Psychology, 57, S. 87-115.

Schummers, James; Yu, Hongbo; Sur, Mriganka (2008): Tuned Responses of Astrocytes and Their Influence on Hemodynamic Signals in the Visual Cortex, in: Science, 320, S. 1638-1643.

Schwarz Müller-Erber, Gabrielle, Silberstein, Eva (2010): Angewandte Magnetresonanztomographie, Wien, facultas.wug Universitätsverlag.

Schwegler, Johann; Lucius, Runhild (2006): Der Mensch - Anatomie und Physiologie, 4. Auflage, Stuttgart, Georg Thieme Verlag.

Schweimer, Judith (2006): Die Rolle des Anterioren Cingulären Cortex bei Entscheidungsprozessen und instrumentellen Lernvorgängen, Universität Stuttgart, Stuttgart.

Seiderer, Manfred (1990a): Physikalische Grundlagen, in: Lissner, Josef; Seiderer, Manfred (Hrsg.): Klinische Kernspintomographie, Physikalische Grundlagen, 2. Auflage, Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag, S. 2-120.

Seiderer, Manfred (1990b): Technische Komponenten, in: Lissner, Josef; Seiderer, Manfred (Hrsg.): Klinische Kernspintomographie, Physikalische Grundlagen, 2. Auflage, Stuttgart, Ferdinand Enke Verlag, S. 121-136.

Sherif, Muzafer; Taub, Daniel; Hovland, Carl I. (1958): Assimilation and contrast effects of anchoring stimuli on judgments, in: *Journal of Experimental Psychology*, 55 (2), S. 150-155.

Sherif, Muzafer; Hovland, Carl I. (1961): *Social Judgment - Assimilation and contrast effects in communication and attitude change*, Connecticut, Yale University Press.

Shimamura, Arthur P.; Squire, Larry R. (1987): A neuropsychological study of fact memory and source amnesia, in: *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 13 (3), S. 464-473.

Siegfried Vögele Institut (2008): Werbung mit Köpfchen, in: *OnetoOne Book*, Ausgabe 7, S. 66-67.

Siemens AG, Medical Solutions (2003): Magnete, Spins und Resonanzen - Eine Einführung in die Grundlagen der Magnetresonanztomographie, Erlangen; http://www.healthcare.siemens.de/siemens_hwem-hwem_sxxa_websites-context-root/wcm/idc/groups/public/@global/@imaging/@mri/documents/download/mdaw/mtu3/~edisp/magnete_spins_und_resonanzen-00016931.pdf.

Siemens AG, Medical Solutions (2004): Magnete, Fluss und Artefakte - Grundlagen, Techniken und Anwendungen der Magnetresonanztomographie, Erlangen; http://www.healthcare.siemens.com/siemens_hwem-hwem_sxxa_websites-context-root/wcm/idc/groups/public/@global/@imaging/@mri/documents/download/mdaw/mtm5/~edisp/magnete_fluss_und_artefakte-00038790.pdf.

Simon, Hermann; Fassnacht, Martin (2009): *Preismanagement - Strategie, Analyse, Entscheidung, Umsetzung*, 3. Auflage, Wiesbaden, Gabler Verlag.

Singer, Wolf (2003): *Ein neues Menschenbild?*, 1. Auflage, Frankfurt am Main, Suhrkamp.

Smart Brain and Health: fMRI and Neuronavigation, <http://www.smartbrainandhealth.com/fmri.html> (abgerufen am 21.10.2014).

Smart Brain and Health: Transcranial Magnetic Stimulation (TMS) Therapy, <http://www.smartbrainandhealth.com/tms.html> (abgerufen am 21.10.2014).

Smith, Adam (1776): *An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations*, London, W. Strahan and T. Cadell.

Snijders, Tom A. B. (2003): Multilevel Analysis, in: Lewis-Beck, Michael S.; Bryman, Allen E.; Liao, Tim F. (Eds.): *The SAGE Encyclopedia of Social Science Research Methods*, Thousand Oaks, California, Sage Publications, S. 673-677.

Sohn, Myeong-Ho; Albert, Mark V.; Jung, Kwanjin; Carter, Cameron S.; Anderson, John R. (2007): Anticipation of conflict monitoring in the anterior cingulate cortex and the prefrontal cortex, in: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 104 (25), S. 10330-10334.

Sommer, Tobias (2011): Neuroimaging: neuro-bildgebende Verfahren, in: Hermy, Guido; Mahlke, Claudia; Schwake, Michael; Sommer, Tobias (Hrsg.): Der Experimentator: Neurowissenschaften, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag, S. 209-263.

Spektrum.de: Hirnforschung - Mehr als tausend Worte, Artikel (13.10.2008), <http://www.spektrum.de/news/mehr-als-tausend-worte/968694>.

Spence, Michael A. (1974): Market signaling: Informational transfer in hiring and related screening processes, Massachusetts, Harvard University Press.

Spitzer, Manfred (2007): Kann, darf, soll oder muss man Glück wissenschaftlich untersuchen?, in: Spitzer, Manfred; Bertram, Wulf: Braintertainment - Expeditionen in die Welt von Geist & Gehirn, Stuttgart, Schattauer, S. 81-108.

Stephan, Klaas E.; Fink, Gereon R. (2007): Lateralität und Konnektivität, in: Schneider, Frank; Fink, Gereon R. (Hrsg.): Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie, 1. Auflage, Heidelberg, Springer Medizin Verlag, S. 333-350.

Stevensen, Ryan A.; Kim, Sunah; James, Thomas W. (2009): An additive-factors design to disambiguate neuronal and areal convergence: measuring multisensory interactions between audio, visual, and haptic sensory streams using fMRI, in: Experimental Brain Research, 198 (2-3), S. 183-194.

Stöcker, Tony; Shah, N. Jon (2013): Grundlagen der MR-Bildgebung, in: Schneider, Frank; Fink, Gereon R.: Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie, 2. Auflage, Berlin, Springer, S. 61-78.

Strong, Edward K. (1925): Theories of selling, in: Journal of Applied Psychology, 9 (1), S. 75-86.

Talairach, Jean; Tournoux, Pierre (1988): Co-Planar stereotaxic atlas of the human brain: 3-Dimensional Proportional System - an Approach to Cerebral Imaging, New York, Thieme.

Thompson, Richard F. (2001): Das Gehirn - Von der Nervenzelle zur Verhaltenssteuerung, 3. Auflage, Heidelberg, Spektrum Akademischer Verlag.

Thut, Gregor; Schultz, Wolfram; Roelcke, Ulrich; Nienhusmeier, Matthias; Missimer, John; Maguire, R. Paul; Leenders, Klaus L. (1997): Activation of the human brain by monetary reward, in: NeuroReport, 8 (5), S. 1225-1228.

Tusche, Anita; Bode, Stefan; Haynes, John-Dylan (2010): Neural Responses to Unattended Products Predict Later Consumer Choices, in: The Journal of Neuroscience, 30 (23), S. 8024-8031.

Van den Heuvel, Odile A.; Groenewegen, Henk J.; Barkhof, Frederik; Lazeron, Richard H. C.; van Dyck, Richard; Veltman, Dick J. (2003): Frontostriatal system in planning complexity: a parametric functional magnetic resonance version of tower of london task, in: NeuroImage, 18 (2), S. 367-374.

Villarejo-Ramos, Angel F.; Sánchez-Franco, Manuel J. (2005): The impact of marketing communication and price promotion on brand equity, in: Brand Management, 12 (6), S. 431-444.

Vlaardingerbroek, Marinus T.; den Boer, Jacques A. (2004): Magnetresonanz-bildgebung: Theorie und Praxis, 3. Auflage, Berlin, Springer.

Vul, Edward; Harris, Christine; Winkielman, Piotr; Pashler, Harold (2009): Puzzlingly high Correlations in fMRI Studies of Emotion, Personality, and Social Cognition, in: Perspectives on Psychological Science, 4 (3), S. 274-290.

Weber, Bernd; Neuhaus, Caroline (2007): Vom Teuro zur Schnäppchenjagd, in: Häusel, Hans-Georg (Hrsg.): Neuromarketing - Erkenntnisse der Hirnforschung für Markenführung, Werbung und Verkauf, München, Rudolf Haufe Verlag, S. 32-47.

Weishaupt, Dominik; Köchli, Victor D.; Marincek, Borut (2006): How does MRI work?, 2nd Edition, Berlin, Springer Verlag.

Weishaupt, Dominik; Köchli, Victor D.; Marincek, Borut (2009): Wie funktioniert MRI? - Eine Einführung in die Physik und Funktionsweise der Magnetresonanz-bildgebung, 6. Auflage, Heidelberg, Springer Medizin Verlag.

Wellcome Trust Centre for Neuroimaging: Statistical Parametric Mapping 8 (SPM8), London, UK, <http://www.fil.ion.ucl.ac.uk/spm/>.

Wired: Neuroscience is getting its day in court, whether it's ready or not, <http://www.wired.com/2013/12/brain-science-law/> (abgerufen am 11.09.2014).

Wiswede, Günter (2003): Kein Auslaufmodell: Die ökonomische Vernunft, in: Barz, Heiner; Kampik, Wilhelm; Singer, Thomas; Teuber, Stephan: Trendbibel für Marketing und Verkauf: Konsummotive im Wandel, 2. Auflage, Regensburg, Metropolitan-Verlag, S. 254-259.

Wohlschläger, Afra; Kellermann, Thilo (2013): Datenanalyse: Vorverarbeitung, Statistik und Auswertung, in: Schneider, Frank; Fink, Gereon R. (Hrsg.): Funktionelle MRT in Psychiatrie und Neurologie, 2. Auflage, Berlin, Springer-Verlag, S. 151-172.

Woolsey, Thomas A.; Hanaway, Joseph; Gado, Mokthar H. (2008): The Brain Atlas: A visual guide to the human central nervous system, 3rd Edition, New Jersey, Wiley.

Xu, Lijuan; Liang, Zhu-Yuan; Wang, Kun; Li, Shu; Jiang, Tianzi (2009): Neural mechanism of intertemporal choice: from discounting future gains to future losses, in: Brain Research, 1261, S. 65-74.

Yoo, Boonghee; Donthu, Naveen; Lee, Sungho (2000): An Examination of Selected Marketing Mix Elements and Brand Equity, in: Journal of the Academy of Marketing Science, 28 (2), S. 195-211.

Zaltman, Gerald (2003): How customers think - essential insights into the mind of the market, Boston, Mass., Harvard Business School Press.

Zeithaml, Valarie A. (1988): Consumer Perceptions of Price, Quality and Value: A Means-End Model and synthesis of evidence, in: Journal of Marketing, 52 (3), S. 2-22.

Zink, Caroline F.; Tong, Yunxia; Chen, Qiang; Bassett, Danielle S.; Stein, Jason L.; Meyer-Lindenberg, Andreas (2008): Know Your Place: Neural Processing of Social Hierarchy in Humans, in: Neuron, 58 (2), S. 273-283.

Anhang

Anhang 1: Die Experimentalbeschreibung

Im heutigen Experiment möchten wir Ihr Kaufverhalten untersuchen.

Im Folgenden werden Ihnen dafür verschiedene Produktangebote gezeigt. Ein Angebot kann sich auf ein einzelnes Produkt bzw. auf mehrere Produkte beziehen. Im Rahmen eines Angebots wird zusätzlich ein Kaufpreis dargestellt.

Beispiel 1:



Beispiel 2:



Ihre Aufgabe ist es, zu entscheiden, ob Sie ein Produkt bzw. mehrere Produkte zu dem angegebenen Preis kaufen würden.

Wenn Ihnen ein Angebot zusagt, betätigen Sie bitte den „Kaufen“-Knopf mit dem rechten Zeigefinger. Würden Sie ein Produkt bzw. mehrere Produkte nicht zu dem angegebenen Preis kaufen, drücken Sie bitte den „Nicht kaufen“-Knopf mit dem linken Zeigefinger.

Da es bei diesem Experiment darum geht, dass Sie ihre Entscheidungen spontan treffen, werden die einzelnen Angebote nur für eine sehr kurze Zeit eingeblendet. Betrachten Sie hierbei bitte jedes Kaufangebot als einzelne Entscheidung. Bei ihren Entscheidungen sollte es also keine Rolle spielen, was Sie bereits „gekauft“ haben. Treffen Sie Ihre Entscheidung bitte für jedes Angebot neu.

Zu beachten ist noch, dass Ihnen im Laufe des Experiments jedes Produkt bzw. jedes Produktpaket mehrmals begegnen wird.

Um mögliche Missverständnisse bezüglich der Größe bzw. der Menge der zum Kauf angebotenen Produkte auszuschließen und somit Ihre Entscheidung im Hinblick auf die Angebote zu verbessern, werden Ihnen vor Beginn des Experiments alle verwendeten Produkte gezeigt.

Das Experiment dauert ungefähr 30 Minuten. Für Ihre Teilnahme bekommen Sie

10 €. Zusätzlich erhalten Sie im Anschluss an das Experiment Produkte im Wert von 10 €. Die Produkte werden hierbei zufällig aus den von Ihnen im Experiment gekauften Produkten ausgewählt.

Viel Spass beim Einkaufen!

Anhang 2: Übersicht über die Preise

Produkt	Spanne normal	normal	normal -25%	günstig	normal +25%	teuer
Apfel_Einzel	0,30-0,50€	0,40€	0,30€	0,30€	0,50€	0,59€
Apfel_Paket		1,20€	0,90€	0,89€	1,50€	1,49€
Balisto_Einzel	0,55-0,80€	0,70€	0,52€	0,50€	0,87€	0,89€
Balisto_Paket		2,10€	1,57€	1,59€	2,62€	2,59€
Banane_Einzel	0,30-0,50€	0,40€	0,30€	0,30€	0,50€	0,59€
Banane_Paket		1,20€	0,90€	0,89€	1,50€	1,39€
Bounty_Einzel	0,60-0,80€	0,70€	0,52€	0,49€	0,87€	0,89€
Bounty_Paket		1,40€	1,05€	1,09€	1,75€	1,79€
Coca-Cola_Einzel	0,80-1,20€	1,00€	0,75€	0,79€	1,25€	1,29€
Coca-Cola_Paket		3,00€	2,25€	2,39€	3,75€	3,59€
Corny_Einzel	0,45-0,80€	0,65€	0,48€	0,49€	0,81€	0,79€
Corny_Paket		1,95€	1,46€	1,49€	2,43€	2,39€

Produkt	Spanne normal	normal	normal -25%	günstig	normal +25%	teuer
Erdbeerkuchen Einzel	1,10-1,50€	1,30€	0,97€	0,99€	1,62€	1,59€
Erdbeerkuchen Paket		2,60€	1,95€	1,89€	3,25€	3,09€
Fritt Einzel	0,40-0,60€	0,50€	0,37€	0,39€	0,62€	0,59
Fritt Paket		1,50€	1,12€	1,09€	1,87€	1,79€
Haribo Einzel	0,70-0,90€	0,80€	0,60€	0,59€	1,00€	0,99€
Haribo Paket		1,60€	1,20€	1,19€	2,00€	1,99€
Käsebrötchen Einzel	1,10-1,50€	1,30€	0,97€	0,99€	1,62€	1,59€
Käsebrötchen Paket		2,60€	1,95€	1,89€	3,25€	3,09€
Leibnitz-Minis Einzel	1,30-1,50€	1,40€	1,05€	1,09€	1,75€	1,69€
Leibnitz-Minis Paket		4,20€	3,15€	3,09€	5,25€	5,19€

Produkt	Spanne normal	normal	normal - 25%	günstig	normal + 25%	teuer
M&M_Einzel	0,60-0,80€	0,70€	0,52€	0,49€	0,87€	0,89€
M&M_Paket		2,10€	1,57€	1,59€	2,62€	2,59€
MüllerFructiv_Einzel	0,90-1,10€	1,00€	0,75€	0,79€	1,25€	1,19€
MüllerFructiv_Paket		2,00€	1,50€	1,49€	2,50€	2,49€
Müllermilch-Erdbeere_Einzel	0,90-1,00€	0,90€	0,67€	0,69€	1,12€	1,09€
Müllermilch-Erdbeere_Paket		2,70€	2,02€	2,19€	3,37€	3,39€
Nimm2_Einzel	0,90-1,10€	1,00€	0,75€	0,79€	1,25€	1,19€
Nimm2_Paket		2,00€	1,50€	1,49€	2,50€	2,49€
Pringles_Einzel	0,70-1,00€	0,80€	0,60€	0,59€	1,00	0,99€
Pringles_Paket		1,60€	1,20€	1,19€	2,00€	1,99€

Produkt	Spanne normal	normal	normal - 25%	günstig	normal + 25%	teuer
Prinzenrolle_Einzel	0,50-0,70€	0,60€	0,45€	0,49€	0,75€	0,79€
Prinzenrolle_Paket		1,80€	1,35€	1,39€	2,25€	2,19€
RitterSport_Einzel	0,90-1,10€	1,00€	0,75€	0,79€	1,25€	1,29€
RitterSport_Paket		2,00€	1,50€	1,49€	2,50€	2,49€
Schnecke_Einzel	1,10-1,50€	1,30€	0,97€	0,99€	1,62€	1,59€
Schnecke_Paket		2,60€	1,95€	1,89€	3,25€	3,19€
Twix_Einzel	0,60-0,80€	0,70€	0,48€	0,59€	0,81€	0,89€
Twix_Paket		2,10€	1,46€	1,79	2,43€	2,69€
Ültje_Studentenfutter_Einzel	0,60-1,00€	0,80€	0,60€	0,59€	1,00€	1,09€
Ültje_Studentenfutter_Paket		3,20€	2,40€	2,39€	4,00€	3,99€
Vio_Einzel	1,00-1,20€	1,10€	0,82€	0,89€	1,37€	1,39€
Vio_Paket		4,40€	3,30€	3,29€	5,46€	5,49€

Anhang 3: Anonymisierte Probandendaten

Anonymisierte Kennung	Geschlecht	Alter	Alter glatt
A	F	31,9	31
B	F	34,8	34
C	F	31,8	31
D	M	35,9	35
E	M	28,3	28
F	M	27,8	27
G	F	27,4	27
H	F	32,6	32
I	M	26,0	26
J	M	28,9	28
K	M	24,8	24
L	F	27,5	27

durchschnittliches Alter	29,8	29,1666667
--------------------------	------	------------

Anhang 4: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Whole Brain-Analyse ($p_{\text{unkorrigiert}} < 0.005$)

Statistics: *p-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level				mm mmm			
<i>p</i>	<i>c</i>	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	($Z_{\underline{e}}$)	P_{uncorr}			
0.000	56	0.769	0.291	38	0.049	0.542	0.956	4.42	4.00	0.000	-27	12	-24
						1.000	0.956	3.41	3.20	0.001	-24	21	-18
		0.342	0.215	64	0.014	0.851	0.956	4.06	3.72	0.000	0	-27	33
						1.000	0.956	2.96	2.81	0.002	-6	-36	27
		0.883	0.311	31	0.072	0.876	0.956	4.02	3.69	0.000	-3	18	18
		0.786	0.291	37	0.052	0.912	0.956	3.95	3.64	0.000	27	-36	0
						1.000	0.956	3.32	3.12	0.001	18	-33	3
		0.968	0.361	23	0.116	0.917	0.956	3.94	3.63	0.000	-3	-21	-24
						0.999	0.956	3.51	3.27	0.001	3	-18	-18
		0.307	0.215	67	0.012	0.920	0.956	3.94	3.62	0.000	54	15	15
		1.000	0.766	8	0.345	0.963	0.956	3.82	3.53	0.000	-21	-30	-12
		0.853	0.301	33	0.065	0.975	0.956	3.77	3.49	0.000	0	-9	24
						1.000	0.956	2.93	2.79	0.003	3	3	30
		0.437	0.215	57	0.019	0.982	0.956	3.74	3.46	0.000	-3	36	24
						1.000	0.956	3.40	3.18	0.001	-3	27	36

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 2.69, p = 0.005 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 9.673 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 835.4 resels
 Expected number of clusters, <c> = 29.69 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 5.424, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: Inf Page 1

Statistics: *p-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level				mm mmm			
<i>p</i>	<i>c</i>	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	($Z_{\underline{e}}$)	P_{uncorr}			
		0.714	0.291	41	0.042	0.984	0.956	3.72	3.45	0.000	-42	6	18
		0.952	0.361	25	0.103	0.985	0.956	3.72	3.45	0.000	45	51	12
		0.367	0.215	62	0.015	0.993	0.956	3.65	3.39	0.000	0	6	-3
						1.000	0.956	3.41	3.19	0.001	6	12	0
		0.961	0.361	24	0.109	0.998	0.956	3.53	3.30	0.000	-30	30	51
						1.000	0.956	3.10	2.93	0.002	-27	33	42
		0.821	0.295	35	0.058	0.999	0.956	3.47	3.25	0.001	-45	48	0
						1.000	0.956	2.92	2.78	0.003	-36	45	3
		1.000	0.766	7	0.377	1.000	0.956	3.43	3.21	0.001	36	36	6
		0.516	0.215	52	0.024	1.000	0.956	3.41	3.19	0.001	48	-42	45
						1.000	0.956	3.11	2.94	0.002	54	-36	51
						1.000	0.956	3.08	2.91	0.002	39	-42	33
		0.943	0.361	26	0.097	1.000	0.956	3.36	3.16	0.001	-42	-45	39
						1.000	0.956	3.06	2.90	0.002	-51	-54	45
		0.996	0.516	16	0.184	1.000	0.956	3.33	3.13	0.001	6	54	42

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 2.69, p = 0.005 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 9.673 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 835.4 resels
 Expected number of clusters, <c> = 29.69 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 5.424, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: Inf Page 2

Statistics: *p-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmmm		
<i>p</i>	<i>c</i>	P _{FWERcorr}	α _{FDRcorr}	k _E	P _{Uncorr}	P _{FWERcorr}	α _{FDRcorr}	T	(Z _ε)	P _{Uncorr}			
						1.000	0.956	2.97	2.82	0.002	12	51	30
		0.996	0.516	16	0.184	1.000	0.956	3.32	3.12	0.001	-12	-33	3
		1.000	0.766	2	0.655	1.000	0.956	3.28	3.08	0.001	-18	27	42
		0.968	0.361	23	0.116	1.000	0.956	3.27	3.08	0.001	42	27	-9
		1.000	0.766	8	0.345	1.000	0.956	3.26	3.07	0.001	0	-42	12
						1.000	0.987	2.85	2.72	0.003	6	-51	9
		1.000	0.766	4	0.511	1.000	0.956	3.24	3.05	0.001	45	18	-24
		0.551	0.215	50	0.027	1.000	0.956	3.22	3.04	0.001	36	-66	45
						1.000	0.956	3.03	2.87	0.002	15	-63	33
						1.000	0.956	2.99	2.84	0.002	36	-60	51
		1.000	0.766	6	0.415	1.000	0.956	3.20	3.02	0.001	-51	-12	-30
		1.000	0.766	6	0.415	1.000	0.956	3.19	3.01	0.001	-39	-39	-12
		0.533	0.215	51	0.026	1.000	0.956	3.15	2.98	0.001	-9	57	9
						1.000	0.956	3.05	2.89	0.002	0	63	6
						1.000	0.956	3.02	2.86	0.002	0	48	6

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 2.69, p = 0.005 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 9.673 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 835.4 resels
 Expected number of clusters, <c> = 29.69 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 5.424, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: Inf Page 3

Statistics: *p-values adjusted for search volume*

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmmm		
<i>p</i>	<i>c</i>	P _{FWERcorr}	α _{FDRcorr}	k _E	P _{Uncorr}	P _{FWERcorr}	α _{FDRcorr}	T	(Z _ε)	P _{Uncorr}			
		1.000	0.766	5	0.459	1.000	0.956	3.10	2.93	0.002	27	-54	21
		1.000	0.766	2	0.655	1.000	0.956	3.06	2.90	0.002	-45	15	-30
		1.000	0.766	5	0.459	1.000	0.956	3.01	2.86	0.002	-12	-66	30
		1.000	0.766	4	0.511	1.000	0.956	3.01	2.85	0.002	-24	12	57
		1.000	0.766	4	0.511	1.000	0.956	2.99	2.83	0.002	66	-21	-18
		1.000	0.766	5	0.459	1.000	0.956	2.98	2.83	0.002	0	63	18
		1.000	0.766	4	0.511	1.000	0.956	2.98	2.83	0.002	-33	6	30
		1.000	0.766	2	0.655	1.000	0.956	2.96	2.81	0.002	30	12	-24
		1.000	0.766	1	0.766	1.000	0.956	2.96	2.81	0.002	9	39	-12
		1.000	0.766	7	0.377	1.000	0.956	2.94	2.79	0.003	-36	-72	51
		1.000	0.766	1	0.766	1.000	0.956	2.92	2.78	0.003	15	-21	-21
		1.000	0.766	3	0.575	1.000	0.956	2.92	2.78	0.003	18	-3	-15
		1.000	0.766	3	0.575	1.000	0.957	2.89	2.75	0.003	-9	-3	-12
		1.000	0.766	1	0.766	1.000	0.957	2.89	2.75	0.003	24	-69	60
		1.000	0.766	1	0.766	1.000	0.957	2.85	2.72	0.003	-51	-45	-12

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 2.69, p = 0.005 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 9.673 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 835.4 resels
 Expected number of clusters, <c> = 29.69 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 5.424, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: Inf Page 4

Statistics: p-values adjusted for search volume

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmm		
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	$(Z_{\bar{z}})$	P_{uncorr}			
1.000		0.766	3	0.575	1.000	0.987	2.84	2.70	0.003	-48	39	15	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.81	2.68	0.004	-45	-15	-15	
1.000		0.766	4	0.511	1.000	0.987	2.78	2.66	0.004	12	-27	-3	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.77	2.65	0.004	9	-39	6	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.76	2.63	0.004	0	-36	-3	
1.000		0.766	2	0.655	1.000	0.987	2.75	2.63	0.004	30	-51	-21	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.73	2.61	0.005	51	45	3	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.73	2.61	0.005	15	60	-3	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.72	2.60	0.005	-30	-21	57	
1.000		0.766	2	0.655	1.000	0.987	2.72	2.60	0.005	-33	-6	-12	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.72	2.60	0.005	-6	-39	-3	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.71	2.60	0.005	24	66	3	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.987	2.71	2.59	0.005	-18	-18	-18	
1.000		0.766	1	0.766	1.000	0.996	2.69	2.58	0.005	48	-33	39	

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 2.69, p = 0.005 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 9.673 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 835.4 resels
 Expected number of clusters, <c> = 29.69 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 5.424, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: Inf Page 5

Anhang 5: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Whole Brain-Analyse ($p_{unkorrigiert} < 0.001$)

Statistics: p-values adjusted for search volume

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmm		
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	$(Z_{\bar{z}})$	P_{uncorr}			
0.001	22	0.875	0.488	8	0.200	0.542	0.873	4.42	4.00	0.000	-27	12	-24
		0.306	0.385	25	0.035	0.851	0.873	4.06	3.72	0.000	0	-27	33
		0.675	0.481	13	0.108	0.876	0.873	4.02	3.69	0.000	-3	18	18
		0.800	0.481	10	0.154	0.912	0.873	3.95	3.64	0.000	27	-36	0
		0.839	0.481	9	0.175	0.917	0.873	3.94	3.63	0.000	-3	-21	-24
						0.999	0.938	3.51	3.27	0.001	3	-18	-18
		0.283	0.385	25	0.032	0.920	0.873	3.94	3.62	0.000	54	15	15
		0.989	0.668	3	0.433	0.963	0.873	3.82	3.53	0.000	-21	-30	-12
		0.937	0.582	6	0.264	0.975	0.873	3.77	3.49	0.000	0	-9	24
		0.759	0.481	11	0.136	0.982	0.873	3.74	3.46	0.000	-3	36	24
		0.717	0.481	12	0.121	0.984	0.873	3.72	3.45	0.000	-42	6	18
		0.960	0.616	5	0.308	0.985	0.873	3.72	3.45	0.000	45	51	12
		0.759	0.481	11	0.136	0.993	0.938	3.65	3.39	0.000	0	6	-3
						1.000	0.938	3.41	3.19	0.001	6	12	0
		0.999	0.668	1	0.668	0.998	0.938	3.53	3.30	0.000	-30	30	51

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.200 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 835.4 resels
 Expected number of clusters, <c> = 10.43 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 5.424, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: Inf Page 1

Statistics: *p*-values adjusted for search volume

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmm		
<i>p</i>	<i>c</i>	<i>P</i> _{FWERcorr}	<i>α</i> _{FDRcorr}	<i>k</i> _E	<i>P</i> _{uncorr}	<i>P</i> _{FWERcorr}	<i>α</i> _{FDRcorr}	<i>T</i>	(<i>Z</i> _≡)	<i>P</i> _{uncorr}			
		0.989	0.668	3	0.433	0.999	0.938	3.47	3.25	0.001	-45	48	0
		0.999	0.668	1	0.668	1.000	0.938	3.43	3.21	0.001	36	36	6
		0.989	0.668	3	0.433	1.000	0.938	3.41	3.20	0.001	-24	21	-18
		0.996	0.668	2	0.528	1.000	0.938	3.41	3.19	0.001	48	-42	45
		0.999	0.668	1	0.668	1.000	0.938	3.40	3.18	0.001	-3	27	36
		0.999	0.668	1	0.668	1.000	0.938	3.36	3.16	0.001	-42	-45	39
		0.999	0.668	1	0.668	1.000	0.938	3.33	3.13	0.001	6	54	42
		0.996	0.668	2	0.528	1.000	0.938	3.32	3.12	0.001	-12	-33	3
		0.999	0.668	1	0.668	1.000	0.938	3.32	3.12	0.001	18	-33	3

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: *T* = 3.29, *p* = 0.001 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: *k* = 0 voxels, *p* = 1.000 (1.000) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <*k*> = 5.200 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 835.4 resels
 Expected number of clusters, <*c*> = 10.43 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 5.424, FDRp: Inf, FWEc: Inf, FDRc: Inf Page 2

Anhang 6: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Small Volume Correction (*p*_{FWER} < 0.05) „Mittelhirn“¹⁰⁹⁴

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [3,-21,-18]

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmm		
<i>p</i>	<i>c</i>	<i>P</i> _{FWERcorr}	<i>α</i> _{FDRcorr}	<i>k</i> _E	<i>P</i> _{uncorr}	<i>P</i> _{FWERcorr}	<i>α</i> _{FDRcorr}	<i>T</i>	(<i>Z</i> _≡)	<i>P</i> _{uncorr}			
		0.015	0.229	7	0.229	0.014	0.435	3.94	3.63	0.000	-3	-21	-24
						0.039	0.614	3.51	3.27	0.001	3	-18	-18

table shows 16 local maxima more than 4.0 mm apart

Height threshold: *T* = 3.29, *p* = 0.001 (0.063) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: *k* = 0 voxels, *p* = 1.000 (0.063) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <*k*> = 5.200 Volume: 4212 = 156 voxels = 3.0 resels
 Expected number of clusters, <*c*> = 0.07 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 3.395, FDRp: Inf, FWEc: 7, FDRc: Inf

¹⁰⁹⁴ Die Koordinaten aus Knutson, B. et al. (2007) lagen im Sinne von Talairach & Tournoux-Koordinaten vor. Sie wurden innerhalb des Programms SPM8 mit dem *WFU Pick Atlas Toll Version 2.4* in MNI-Koordinaten übersetzt. Als Koordinatenwerte ergaben sich [4.04, -21.93, -17.95]. Für die Erstellung der ROI-Maske (10mm Radius) verwendete SPM8 die Werte [3, -21, -18].

Anhang 7: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Small Volume Correction ($p_{FWER} < 0.05$) „ventrales Striatum (VS)“¹⁰⁹⁵

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [9,9,-3]

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmmmm		
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	K_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	$(Z_{\bar{z}})$	P_{uncorr}			
		0.010	0.154	10	0.154	0.029	0.763	3.65	3.39	0.000	0	6	-3
						0.048	0.763	3.41	3.19	0.001	6	12	0

table shows 16 local maxima more than 4.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (0.063) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (0.063) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.200 Volume: 4158 = 154 voxels = 3.0 resels
 Expected number of clusters, <c> = 0.07 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 3.395, FDRp: Inf, FWEc: 10, FDRc: Inf

Anhang 8: Kontrast Kaufen vs. Nicht kaufen Small Volume Correction ($p_{FWER} < 0.05$) „orbitofrontaler Cortex (OFC)“¹⁰⁹⁶

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [-27,18,-15]

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmmmm		
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	K_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	$(Z_{\bar{z}})$	P_{uncorr}			
0.002	2	0.020	0.433	5	0.308	0.006	0.172	4.31	3.91	0.000	-27	12	-21
		0.028	0.433	3	0.433	0.048	0.754	3.41	3.20	0.001	-24	21	-18

table shows 16 local maxima more than 4.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (0.063) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (0.063) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.200 Volume: 3834 = 142 voxels = 3.0 resels
 Expected number of clusters, <c> = 0.07 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 3.395, FDRp: Inf, FWEc: 3, FDRc: Inf

¹⁰⁹⁵ Die Koordinaten aus Zink, C. F. et al. (2008) lagen bereits als MNI-Koordinaten vor [9, 9, -3].

¹⁰⁹⁶ Die Koordinaten aus O'Doherty, J. P. et al. (2003) lagen bereits als MNI-Koordinaten vor [-27, 18, -15].

Anhang 9: Kontrast Mehrere Produkte vs. ein Produkt Whole Brain-Analyse
($p_{\text{unkorrigiert}} < 0.001$)

Statistics: p -values adjusted for search volume

set-level		cluster-level				peak-level				mm mmmmm			
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	$(Z_{\underline{z}})$	P_{uncorr}			
0.594	10	0.000	0.000	1945	0.000	0.000	0.000	8.49	6.50	0.000	3	-78	-3
						0.000	0.000	7.78	6.14	0.000	-6	-81	-3
						0.001	0.002	6.55	5.45	0.000	15	-87	3
		0.000	0.000	216	0.000	0.095	0.047	5.19	4.56	0.000	-18	-72	48
						0.641	0.181	4.31	3.91	0.000	-27	-63	54
						0.733	0.211	4.21	3.83	0.000	-33	-42	36
		0.010	0.003	72	0.001	0.250	0.064	4.80	4.28	0.000	-48	3	21
						0.755	0.215	4.18	3.81	0.000	-42	6	33
		0.306	0.088	24	0.035	0.935	0.352	3.90	3.60	0.000	-3	18	51
		0.977	0.659	4	0.362	0.972	0.442	3.79	3.51	0.000	27	12	57
		0.996	0.659	2	0.528	0.992	0.527	3.65	3.39	0.000	36	39	6
		0.996	0.659	2	0.528	0.998	0.640	3.55	3.31	0.000	51	9	12
		0.999	0.668	1	0.668	0.999	0.675	3.51	3.27	0.001	48	30	36
		0.996	0.659	2	0.528	1.000	0.838	3.39	3.18	0.001	-21	-12	-3
		0.999	0.668	1	0.668	1.000	0.959	3.31	3.11	0.001	27	-54	-9

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.200 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 835.4 resels
 Expected number of clusters, <c> = 10.43 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 5.424, FDRp: 5.140, FWEc: 72, FDRc: 72

Anhang 10: Kontrast Mehrere Produkte vs. ein Produkt Small Volume Correction ($p_{FWER} < 0.05$) „linker seitlicher Präfrontalcortex“¹⁰⁹⁷

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [-45,18,24]

set-level		cluster-level				peak-level				mm mmmmm			
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	$(Z_{\underline{z}})$	P_{uncorr}			
		0.011	0.175	9	0.175	0.028	0.444	3.65	3.39	0.000	-42	9	24

table shows 16 local maxima more than 4.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (0.063) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (0.063) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.200 Volume: 4617 = 171 voxels = 3.0 resels
 Expected number of clusters, <c> = 0.07 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 3.395, FDRp: Inf, FWEc: 9, FDRc: Inf

¹⁰⁹⁷ Die Koordinaten aus Owen, A. M. et al. (2005) lagen im Sinne von Talairach & Tournoux-Koordinaten vor. Sie wurden innerhalb des Programms SPM8 mit dem *WFU Pick Atlas Toll Version 2.4* in MNI-Koordinaten übersetzt. Als Koordinatenwerte ergaben sich [-44.44, 17.40, 24.86]. Für die Erstellung der ROI-Maske (10mm Radius) verwendete SPM8 die Werte [-45, 18, 24].

Anhang 11: Kontrast Mehrere Produkte vs. ein Produkt Small Volume Correction ($p_{FWER} < 0.05$) „rechter seitlicher Präfrontalcortex“¹⁰⁹⁸

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [51,27,42]

set-level		cluster-level				peak-level				mm mmm			
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	(Z_{\equiv})	P_{uncorr}			
		0.043	0.668	1	0.668	0.026	0.614	3.51	3.27	0.001	48	30	36

table shows 16 local maxima more than 4.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (0.050) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (0.050) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.200 Volume: 1350 = 50 voxels = 3.0 resels
 Expected number of clusters, <c> = 0.07 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 3.286, FDRp: Inf, FWEc: 1, FDRc: Inf

Anhang 12: Kontrast Mehrere Produkte vs. ein Produkt Small Volume Correction ($p_{FWER} < 0.05$) „visueller Cortex“¹⁰⁹⁹

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [-9,-81,3]

set-level		cluster-level				peak-level				mm mmm			
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	(Z_{\equiv})	P_{uncorr}			
		0.000	0.000	162	0.000	0.000	0.000	8.25	6.38	0.000	0	-78	0
						0.000	0.000	7.78	6.14	0.000	-6	-81	-3
						0.002	0.029	4.71	4.21	0.000	-18	-84	6

table shows 16 local maxima more than 4.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (0.063) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (0.063) FWHM = 11.1 11.3 11.1 mm mm mm; 3.7 3.8 3.7 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.200 Volume: 4509 = 167 voxels = 3.0 resels
 Expected number of clusters, <c> = 0.07 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 51.86 voxels)
 FWEp: 3.395, FDRp: 4.709, FWEc: 162, FDRc: 162

¹⁰⁹⁸ Die Koordinaten aus Hutcherson, C. A. et al. (2012) lagen bereits als MNI-Koordinaten vor. [51, 27, 42].

¹⁰⁹⁹ Die Koordinaten aus Saito, D. N. et al. (2006) lagen bereits als MNI-Koordinaten vor [-8, -80, 4].

Anhang 13: Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal Whole Brain-Analyse
 (p_{unkorrigiert} < 0.001)

Statistics: p-values adjusted for search volume

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmm		
p	c	P _{FWERcorr}	α _{FDRcorr}	k _E	p _{uncorr}	P _{FWERcorr}	α _{FDRcorr}	T	(Z _z)	p _{uncorr}			
0.006	19	0.023	0.044	62	0.002	0.070	0.192	5.28	4.62	0.000	33	-57	-12
						0.909	0.681	3.94	3.62	0.000	24	-39	-18
						0.571	0.326	16	0.086	0.505	0.586	4.43	4.01
		0.094	0.093	41	0.010	0.583	0.586	4.35	3.94	0.000	51	30	-9
						0.694	0.586	4.23	3.85	0.000	60	21	6
						0.969	0.704	3.78	3.49	0.000	57	27	0
		0.135	0.093	36	0.015	0.600	0.586	4.33	3.93	0.000	-36	-3	42
						0.736	0.586	4.18	3.81	0.000	-36	9	48
						0.282	0.160	26	0.034	0.891	0.681	3.97	3.65
		0.909	0.577	7	0.243	0.941	0.681	3.86	3.56	0.000	-57	24	3
						0.996	0.796	3.57	3.33	0.000	-45	18	-12
						0.766	0.468	11	0.148	0.911	0.681	3.93	3.62
		0.842	0.509	9	0.188	0.932	0.681	3.89	3.58	0.000	6	15	57
		0.976	0.679	4	0.377	0.965	0.704	3.79	3.51	0.000	39	6	48
		0.909	0.577	7	0.243	0.990	0.796	3.65	3.39	0.000	48	-45	12

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.3 11.6 11.3 mm mm mm; 3.8 3.9 3.8 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.528 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 785.8 resels
 Expected number of clusters, <c> = 9.85 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 55.14 voxels)
 FWEp: 5.403, FDRp: Inf, FWEC: 62 FDRc: 62 Page 1

Statistics: p-values adjusted for search volume

set-level		cluster-level				peak-level					mm mmm		
p	c	P _{FWERcorr}	α _{FDRcorr}	k _E	p _{uncorr}	P _{FWERcorr}	α _{FDRcorr}	T	(Z _z)	p _{uncorr}			
0.999	0.679	1	0.679	0.995	0.796	3.59	3.34	0.000	63	-45	3		
0.936	0.589	6	0.279	0.996	0.796	3.57	3.33	0.000	-45	-48	-12		
0.988	0.679	3	0.447	0.996	0.796	3.57	3.33	0.000	-66	-48	3		
0.999	0.679	1	0.679	0.999	0.898	3.48	3.26	0.001	30	-84	15		
0.995	0.679	2	0.541	0.999	0.898	3.45	3.23	0.001	-42	-72	-12		
0.999	0.679	1	0.679	0.999	0.898	3.43	3.21	0.001	-33	24	-9		
0.999	0.679	1	0.679	1.000	0.913	3.39	3.18	0.001	-30	-81	18		
0.999	0.679	1	0.679	1.000	0.921	3.37	3.16	0.001	-21	57	21		
0.999	0.679	1	0.679	1.000	0.994	3.29	3.10	0.001	3	-6	21		
0.999	0.679	1	0.679	1.000	0.994	3.29	3.09	0.001	-27	-63	-9		

table shows 3 local maxima more than 8.0 mm apart

Height threshold: T = 3.29, p = 0.001 (1.000) Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
 Extent threshold: k = 0 voxels, p = 1.000 (1.000) FWHM = 11.3 11.6 11.3 mm mm mm; 3.8 3.9 3.8 voxels
 Expected voxels per cluster, <k> = 5.528 Volume: 1320948 = 48924 voxels = 785.8 resels
 Expected number of clusters, <c> = 9.85 Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 55.14 voxels)
 FWEp: 5.403, FDRp: Inf, FWEC: 62 FDRc: 62 Page 2

Anhang 14: Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal Small Volume Correction ($p_{FWER} < 0.05$) „linke vordere Inselrinde“¹¹⁰⁰

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [-27,21-3]

set-level		cluster-level				peak-level				mm mmm			
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	$(Z_{\bar{c}})$	P_{uncorr}			
		0.041	0.679	1	0.679	0.044	0.729	3.43	3.21	0.001	-33	24	-9

table shows 16 local maxima more than 4.0 mm apart

Height threshold: $T = 3.29$, $p = 0.001$ (0.060)	Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
Extent threshold: $k = 0$ voxels, $p = 1.000$ (0.060)	FWHM = 11.3 11.6 11.3 mm mm mm; 3.8 3.9 3.8 voxels
Expected voxels per cluster, $\langle k \rangle = 5.528$	Volume: 4617 = 171 voxels = 2.8 resels
Expected number of clusters, $\langle c \rangle = 0.06$	Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 55.14 voxels)
FWEp: 3.374, FDRp: Inf, FWEC: 1 FDRc: Inf	

Anhang 15: Kontrast SA-Signal vs. kein SA-Signal Small Volume Correction ($p_{FWER} < 0.05$) „rechte vordere Inselrinde“¹¹⁰¹

Statistics: search volume: 10.0mm sphere at [36,27,6]

set-level		cluster-level				peak-level				mm mmm			
p	c	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	k_E	P_{uncorr}	$P_{FWERcorr}$	$\alpha_{FDRcorr}$	T	$(Z_{\bar{c}})$	P_{uncorr}			
		0.006	0.095	15	0.095	0.004	0.062	4.43	4.01	0.000	42	24	6

table shows 16 local maxima more than 4.0 mm apart

Height threshold: $T = 3.29$, $p = 0.001$ (0.060)	Degrees of freedom = [1.0, 44.0]
Extent threshold: $k = 0$ voxels, $p = 1.000$ (0.060)	FWHM = 11.3 11.6 11.3 mm mm mm; 3.8 3.9 3.8 voxels
Expected voxels per cluster, $\langle k \rangle = 5.528$	Volume: 4617 = 171 voxels = 2.8 resels
Expected number of clusters, $\langle c \rangle = 0.06$	Voxel size: 3.0 3.0 3.0 mm mm mm; (resels = 55.14 voxels)
FWEp: 3.374, FDRp: Inf, FWEC: 15 FDRc: Inf	

¹¹⁰⁰ Die Koordinaten aus Knutson, B. et al. (2007) lagen im Sinne von Talairach & Tournoux-Koordinaten vor. Sie wurden innerhalb des Programms SPM8 mit dem *WFU Pick Atlas Toll Version 2.4* in MNI-Koordinaten übersetzt. Als Koordinatenwerte ergaben sich [-27.27, 21.77, -2.31]. Für die Erstellung der ROI-Maske (10mm Radius) verwendete SPM8 die Werte [-27, 21, -3].

¹¹⁰¹ Die Koordinaten aus Caria, A. et al. (2007) lagen bereits als MNI-Koordinaten vor [36, 26, 6].

Anhang 16: Darstellung des Hintergrundwissens auf drei Abstraktionsebenen

Autoren (Jahr)	1. Abstraktionsebene	2. Abstraktionsebene	3. Abstraktionsebene
Cacioppo et al. (2012)	- anteriore Insula i.V.m. <i>Liebe</i> - posteriore Insula i.V.m. <i>sexuellem Verlangen</i>	→ Aktivierung i.V.m. positiven Emotionen	- Die Stimuli für Liebe (Bilder vom geliebten Partner) und sexuelles Verlangen (Bilder mit sexuellen Aktivitäten) erzeugen hohes Arousal .
Tusche, Bode & Haynes (2010)	- Insula i.V.m. <i>High- und Low-Attention</i> - in beiden Fällen Vorhersage der <i>Willingness to buy</i>	- i.V.m. <i>Willingness to buy</i> → positive Emotionen	- Die verwendeten Stimuli (Autos) können potenziell soziale Dominanz signalisieren ¹¹⁰² und folglich eine gewisse Intensität erzeugen. - Hier wurde auch nachgewiesen, dass die Stimuli in Bezug auf <i>Willingness to buy</i> in Abhängigkeit von den erwarteten Belohnungswerten variieren. ¹¹⁰³ - Die Stimuli können somit hohes Arousal in Form von unterschiedlich hohen Erwartungswerten auslösen.
Bartels & Zeki (2004)	- mediale Insula i.V.m. <i>Mutterliebe</i> - bei den Deaktivierungen anteriore Insula nicht dabei	→ positive Emotionen bzw. nicht zwingend negative Emotionen	- Die Stimuli für Mutterliebe (Bilder der eigenen Kinder) erzeugen hohes Arousal .
Paulus & Frank (2003)	- anteriore Insula i.V.m. <i>Präferenzentscheidungen</i>	- i.V.m. <i>Präferenz</i> → positive Emotionen	- <i>Anscheinend</i> waren die Stimuli in der Lage ein gewisses Maß an Arousal auszulösen (keine genauere Info über die Stimuli). - Die <i>Anmerkung in der Diskussion</i> geht in Richtung valenzunabhängig , aber nur wenn man die <i>Insula</i> i.V.m. Arousalabhängigkeit sieht und somit zu dem Punkt kommt, dass ein gewisses Arousal theoretisch sowohl in positiven wie auch in negativen Situationen entstehen kann.
Bartels & Zeki (2000)	- mediale Insula i.V.m. <i>romantischer Liebe</i> - bei den Deaktivierungen anteriore Insula nicht dabei	→ positive Emotionen bzw. nicht zwingend negative Emotionen	- Die Stimuli für romantische Liebe (Bilder der geliebten Partner) stellen hohes Arousal dar (Probanden: <i>deeply in love</i>).

¹¹⁰²vgl. Erk, S. et al. (2002), S. 2499 f.

¹¹⁰³vgl. Tusche, A.; Bode, S.; Haynes, J.-D. (2010), S. 8030

Autoren (Jahr)	1. Abstraktionsebene	2. Abstraktionsebene	3. Abstraktionsebene
Rolls, McCabe & Redoute (2008)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i.V.m. Erwartung von geringen Belohnungswerten und wenn hohe Unsicherheit (Varianz der Gewinne) Teil einer Entscheidung ist 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. geringen Belohnungswerten - i.V.m. Unsicherheit → negative Emotionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Ziel der Aufgabe war es, möglichst viel Gewinn zu erzielen. Ein hoher Erwartungswert spricht also für eine hohe Wahrscheinlichkeit das Ziel zu erreichen. Anders ausgedrückt, solche Ereignisse gehen konform mit der Zielerreichung und erzeugen daher eher weniger Arousal. - <i>Kahneman & Tversky</i>¹¹⁰⁴ fanden heraus, dass man Verluste stärker gewichtet als Gewinne. - Ein geringer Belohnungswert wirkt i.V.m. der Aufgabenstellung wie ein Verlust und Verlust ist etwas, dass man generell vermeiden will. - Durch die Erwartung von Verlust bzw. von keinem/ nur geringem Gewinn wird Arousal erzeugt. - Eine hohe Varianz bezogen auf Gewinne korrespondiert mit einer hohen Unsicherheit über die Höhe des Gewinns. - Diese hohe Unsicherheit stellt einen Kontrast zu einem einigermaßen konstanten Umfeld dar und erzeugt insofern Arousal.
Knutson et al. (2007)	<ul style="list-style-type: none"> - Insula i.V.m. exzessiven Preisen im Vorfeld der Kaufentscheidung - negative Korrelation zwischen Insula-Aktivierung und Kaufhandlung 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. exzessiven Preisen (<i>Preisschmerz</i>) - i.V.m. negativer Kaufentscheidung → negative Emotionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Stimuli i.V.m. exzessiv hohen Preisen erzeugen hohes Arousal, da sie von einem normalen Preis spürbar abweichen und dies auch noch, aus Sicht des Konsumenten, in eine negative Richtung.
Olsson, Nearing & Phelps (2007)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i.V.m. Beobachtung von Schmerz und auch eigenem persönlichen Kontakt mit demselben aversiven Reiz (Elektroschock) - in der Observationsbedingung schwächere Aktivierung als in der Testbedingung - Aktivierung während der Observationsbedingung kann auch i.V.m. Empathie stehen 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. der Observation und Konfrontation mit <i>aversiven Stimuli</i> - i.V.m. der Einnahme der emotionalen Perspektive der betrachteten Person, was wiederum <i>empathische Reaktionen</i> beim Betrachter auslöst → Empathie → negative Emotion 	<ul style="list-style-type: none"> - I.V.m. sozialer Angstübertragung wird ein neutraler Stimulus (im Sinne von weitestgehend valenzfrei, z.B. eine Farbe) mit einem stark negativ aufgeladenen Stimulus (z.B. Elektroschock) verbunden. - Diese starke negative Aufladung stellt aufgrund der hohen Intensität, die für eine Angstübertragung notwendig ist, ein hohes Arousal dar.

¹¹⁰⁴vgl. Kahneman, D.; Tversky, A. (1979), S. 277 ff.

Autoren (Jahr)	1. Abstraktionsebene	2. Abstraktionsebene	3. Abstraktionsebene
Kuhnen & Knutson (2005)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i.V.m. <i>erhaltenem Verlust</i> - erhöhte Aktivierung der anterioren Insula ging einem Strategiewechsel in Richtung einer risikoaversen Entscheidung voraus 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. <i>Erfahrung von Verlust</i> - i.V.m. <i>Antizipation von Verlust</i> → negative Emotionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Das erzeugte Arousal i.V.m. der selbst gemachten Erfahrung (aversiver Reiz) ist höher als bei der Beobachtung einer anderen Person, da man den Elektroschock in der Realität erlebt und dieses Erlebnis eine höhere Intensität darstellt. - Man versetzt sich erst dann in die Lage einer anderen Person (Empathie), wenn die Situation einen gewissen Schwellenwert an Erregung, Relevanz oder Arousal überschreitet. Bei der Beobachtung der Schmerzen i.V.m. dem verabreichten Elektroschock ist dieser Schwellenwert anscheinend überschnitten.
Sanfey et al. (2003)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i.V.m. dem Kontrast <i>unfaire vs. faire Angebote</i> - signifikant höhere Aktivierung, je unfairer die Angebote sind 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. <i>unfairen Angeboten</i> → negative Emotionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Kahneman & Tversky¹¹⁰⁵ fanden heraus, dass man Verluste stärker gewichtet als Gewinne. - In diesem Sinne haben Verluste generell eine höhere Wahrscheinlichkeit Arousal auszulösen als Gewinne. - Erhaltene Verluste erzeugen hier ein hohes Arousal. - Ist der vorhergehende Stimulus eine risikoreiche Entscheidung mit Verlusten, dann löst dieses Ereignis ein spürbares Arousal aus, das in der nachfolgenden Entscheidung dazu führt, dass man zu risikoaversen Alternativen tendiert.
			<ul style="list-style-type: none"> - I.d.R. stellt Fairness das akzeptierte Verhalten dar. Unfairness erzeugt ein hohes Arousal, da es eine Abweichung von der Norm darstellt und in diesem Sinne ungewünscht ist. - Zudem zeigt sich, dass die Insula-Aktivierungen mit dem Grad der Unfairness verbunden ist. - Je unfairer das Angebot, desto stärker die Aktivierung. → Arousalbezug

¹¹⁰⁵ vgl. Kahneman, D.; Tversky, A. (1979), S. 277 ff.

Autoren (Jahr)	1. Abstraktionsebene	2. Abstraktionsebene	3. Abstraktionsebene
Ploughaus et al. (1999)	<ul style="list-style-type: none"> - mediale Insula i.V.m. Schmerzen - anteriore Insula i.V.m. Antizipation von Schmerzen 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. <i>Schmerzen</i> - i.V.m. <i>Antizipation von Schmerzen</i> → negative Emotionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Durch Erleben und Antizipation von Schmerzen (schmerzhaft Wärme) konnte ein hohes Arousal erzeugt werden.
Büchel et al. (1998)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i.V.m. <i>aversiven/ schmerzhaften Stimuli (neutraler Reiz gekoppelt an unangenehm laute Töne)</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. <i>aversiven/ schmerzhaften Stimuli</i> → negative Emotionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Klassische Konditionierung ist eine Form von assoziativem Lernen, bei der die Verbindung eines neutralen Stimulus und einem Stimulus mit hoher intrinsischer verhaltensbezogener Bedeutung erfolgt. - Hohe intrinsische verhaltensbezogene Bedeutung steht stellvertretend für hohes Arousal. - Auch eine Hautleitwiderstandsmessung ergab ein differenziertes Ergebnis für neutrale und aversive Stimuli. - Dies spricht ebenfalls für einen arousal-bezogenen Unterschied.
Phillips et al. (1997)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i.V.m. <i>Ekel</i> - signifikant höhere Aktivierung bei 150% Ekel-Intensität im Vergleich zu 75% 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. <i>aversiven (ekelbezogenen) Stimuli</i> und hierbei stärker bei 150%-Intensität im Vergleich zu 75% → negative Emotionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Anscheinend löst die Wahrnehmung von Angst (bzw. die Stimuli für Angst) keinen besonders hohen Arousal aus, hingegen gelingt dies i.V.m. Ekel umso mehr. - Je größer der Ekel, desto höher ist das Arousal und desto stärker die Insula-Aktivierung (Arousalbezug). - Valenzunabhängigkeit kann vermutet werden, da hier zwei negative Emotionen vorliegen, jedoch nur bei einer eine Insula-Aktivierung festgestellt wurde.
Kosslyn et al. (1996)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i.V.m. <i>Visualisierung der aversiven Stimuli</i> - bei der <i>Wahrnehmung</i> der aversiven Stimuli ergab sich interessanterweise keine Übereinstimmung → <i>die Autoren hatten hierfür keine plausible Erklärung!</i> 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. <i>aversiven Stimuli</i> → negative Emotionen → aber nur bei <i>Visualisierung</i> Insula-Aktivierung 	<ul style="list-style-type: none"> - Die aversiven und neutralen Stimuli wurden im Vorfeld anhand einer 7-stufigen Skala in Bezug auf Valenz und Arousal bewertet. - Aversive Bilder wurden hierbei negativer und stärker erregend eingestuft als neutrale Bilder.

Autoren (Jahr)	1. Abstraktionsebene	2. Abstraktionsebene	3. Abstraktionsebene
	<p>- insulärer Cortex i.V.m. dem Vergleich Visualisierung vs. Wahrnehmung aversiver Stimuli zu Gunsten der Visualisierung</p>		<p>- Aversive Stimuli erzeugen hier allerdings nur i.V.m. der Visualisierungsaufgabe ein hohes Arousal. → <i>Visualisierung</i> ist nicht an die Realität gebunden und kann in diesem Sinne einen viel höheren Arousal erzielen als <i>Perzeption</i>. → Zudem handelt es sich bei den Probanden um Vietnam-Veteranen, bei denen ein aversives Bild aufgrund ihrer eigenen Erfahrung evtl. kaum Arousal auslöst, hingegen ihre Visualisierungen gerade durch ihre Erfahrungen ein sehr hohes Maß an Arousal erzeugen können. - Des Weiteren deutet dieser Sachverhalt auch auf eine generelle Valenzunabhängigkeit einer möglichen Insula-Aktivierung hin, da in beiden Bedingungen aversive Stimuli vorliegen.</p>
Coghill et al. (1994)	<p>- (kontralaterale) anteriore Insula i.V.m. <i>schmerzhaften Stimuli (hohe Temperatur)</i> - posteriore Insula i.V.m. <i>Vibrationen</i> - anteriore Insula i.V.m. dem Kontrast <i>schmerzhaft vs. Vibration</i> zu Gunsten von <i>schmerzhaften Stimuli</i></p>	<p>- i.V.m. <i>Schmerzen</i> → negative Emotion → evtl. somatosensorisches System (Vibration)</p>	<p>- Durch schmerzhafte Temperatur wurde ein hohes Arousal erreicht. - Die Stimulation durch die Vibration scheint auch einen gewissen Schwellenwert in Bezug auf Arousal überschritten zu haben bzw. hat das <i>somatosensorisches System</i> angesprochen.</p>
Naqvi et al. (2007)	<p>- Insulindeniäsion führt zu <i>Verlust des Verlangens nach Nikotin</i></p>	<p>- bei Probanden mit intakter Inselrinde besteht weiterhin das Verlangen nach Nikotin → Inselrinde i.V.m. Drang nach einem Reiz bzw. Mangel erleben i.V.m. einem Reiz</p>	<p>- Nikotin bzw. der Gedanke an Nikotin erzeugen nach der Läsion der Inselrinde kein bzw. keine hohes Arousal mehr, daher besteht kein Verlangen mehr nach Nikotin. - Ist die Inselrinde hingegen intakt, erfolgt bei Rauchern weiterhin eine Auslösung von hohem Arousal und Hinwendung zu Nikotin. → Inselrinde i.V.m. im Körper entstehenden Zuständen</p>
Paulus & Stein (2006)	<p>- anterioren insulärer Cortex i.V.m. <i>interoception</i> (innere Repräsentation des gesamten Körpers)</p>	<p>→ Interozeption</p>	<p>- Arousalbezug - kein Valenzbezug</p>

Autoren (Jahr)	1. Abstraktionsebene	2. Abstraktionsebene	3. Abstraktionsebene
	<ul style="list-style-type: none"> - zentrale Aufgabe: Informationen bezogen auf valenzunabhängige Saliens und relative Beurteilung der Stimulus-Umgebung zu erhalten und diese Informationen in Bezug zu einem möglichen Effekt auf den gegenwärtigen Körperzustand zu setzen 	<ul style="list-style-type: none"> - Inselrinde i.V.m. <i>leichter Berührung</i> - schwache und undeutliche Beschreibungen der Patientin bezogen auf die Berührungserfahrung - keine Wahrnehmung der Richtung der Berührung 	<ul style="list-style-type: none"> - Es geht in erster Linie darum, ob ein Reiz bezogen auf seine wahrgenommene Intensität in der Lage ist, den gegenwärtigen Gleichgewichtszustand (unabhängig davon wie dieser aussieht) zu stören. Hierbei spielt es keine Rolle, ob diese Veränderung in eine positive oder negative Richtung erfolgt. - Interozeption
Olausson et al. (2002)	<ul style="list-style-type: none"> - Inselrinde i.V.m. <i>leichter Berührung</i> - schwache und undeutliche Beschreibungen der Patientin bezogen auf die Berührungserfahrung - keine Wahrnehmung der Richtung der Berührung 	<ul style="list-style-type: none"> - i.V.m. <i>leichter Berührung</i> → Interozeption 	<ul style="list-style-type: none"> - Das untersuchte System, das unter anderem eine Aktivierung der Insula bewirkt, liefert keine differenzierten Eindrücke hinsichtlich einer Berührung. - Die qualitativen Beschreibungen der Patientin deuten zudem darauf hin, dass sich das untersuchte System mit der <i>Signifikanz</i> der affektiven Aspekte von Berührung auseinandersetzt. - Richtung Arousal - Interozeption
Hampton et al. (2007)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i.V.m. dem Kontrast für <i>reversal learning</i> (switch vs. stay) - keine Insula-Aktivierung i.V.m. der <i>Betrachtung von verlustreichen Ergebnissen</i> (punishing outcomes) 	<ul style="list-style-type: none"> → Strategiewechsel 	<ul style="list-style-type: none"> - Die Bedingung <i>Switch</i> steht dafür, dass ein Proband sein Entscheidungsverhalten von der einen Alternative (A) auf die andere (B) verändert. Er tut dies, da er der Meinung ist, dass die andere Variante (B) nun mehr Belohnung mit sich bringt. - Diese Veränderung stört die gewohnte Situation (A ist besser) und ist daher in der Lage Arousal zu erzeugen. Das <i>Switch</i>-Verhalten steht dann für die Reaktion auf eine Veränderung des gegenwärtigen Status. - Durch Lernen der <i>neuen/veränderten</i> Regel (jetzt stellt das andere Symbol die bessere Alternative dar) erfolgt ein Arousalanstieg (Wahrnehmung der Veränderung als kritische Veränderung). - Bei der Bedingung <i>Stay</i> liegt insofern keine Veränderung vor und daher wird hier kein spürbares Arousal ausgelöst.

Autoren (Jahr)	1. Abstraktionsebene	2. Abstraktionsebene	3. Abstraktionsebene
Huettel et al. (2006)	<ul style="list-style-type: none"> - anteriore Insula i. V. m. Entscheidungen, die keine bekannten Eintrittswahrscheinlichkeiten für die Ergebnisse (Spieldausgänge) beinhalten 	<ul style="list-style-type: none"> → Ambiguität (Unsicherheit mit unbekanntem Eintrittswahrscheinlichkeiten) → (eher) negative Emotionen 	<ul style="list-style-type: none"> - Da derartige Situationen mit einem ungewissen Ausgang verbunden sind, erzeugen sie ein hohes Arousal. - Diese Situationen weichen stark von einem Gleichgewichtszustand ab und bringen in diesem Sinne erhöhte Erregung mit sich.
Knutson et al. (2005)	<ul style="list-style-type: none"> - keine Insula-Aktivierung i. V. m. dem Kontrast für Valenz (Gewinn vs. Verlust) - Insula i. V. m. dem Kontrast für Magnitude (5.00\$ vs. 0.00\$) 	<ul style="list-style-type: none"> → Magnitude 	<ul style="list-style-type: none"> - Es lag keine Aktivierung i. V. m. dem Kontrast für Valenz vor. → kein Valenzbezug - Es wurde eine Aktivierung i. V. m. dem Kontrast für Magnitude festgestellt. → Arousalbezug