

**Güte der visuellen und auditiven Geschwindigkeitsdiskriminierung
in einer virtuellen Simulationsumgebung**

Dissertation
zur
Erlangung des Doktorgrades
im Fachbereich Sicherheitstechnik
der
Bergischen Universität
Wuppertal

von
Stephan Scholz
aus Düsseldorf

Düsseldorf 2003

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Assistent im Fachgebiet Verkehrssicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal. Ich möchte an dieser Stelle dem Fachgebietsleiter, Herrn Prof. Dr.-Ing. O.H. Peters, für die jahrelange Zusammenarbeit danken. Mein Dank gilt ferner Herrn Prof. Dr. phil. H.O. Häcker für die Übernahme des Korreferats, Herrn Prof. Dr.-Ing. A. Meyna für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. B.H. Müller als Mitglied der Prüfungskommission.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei allen Freunden und Kollegen, die mich bei dieser Arbeit unterstützt haben. Zu ganz besonderem Dank bin ich meiner Freundin und Lebensgefährtin, Claudia Egdorf, verpflichtet.

Düsseldorf 2003

Stephan Scholz

Kurzfassung

Der Mensch hat insbesondere im Straßenverkehr ständig die Aufgabe, Bewegungsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen einzuschätzen und sein Verhalten situationsbedingt darauf abzustimmen. In der vorliegenden Arbeit wurde zum einen untersucht, wie gut der Mensch anhand des Seh- und Hörsinns die Bewegungsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen unterscheiden kann, und ob sich diese Fähigkeit durch die Kombination beider Sinne verbessert. Zum anderen wurde der Frage nachgegangen, welchen Einfluss die Bewegungsgeschwindigkeit von Fahrzeugen auf die Diskriminierungsleistung des Menschen hat.

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine wahrnehmungspsychologische Untersuchung in einer virtuellen Simulationsumgebung, bei der die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung unter Variation der Geschwindigkeitsgrößenordnung und der Darbietungsform bei insgesamt 45 Versuchspersonen individuell bestimmt wurde. Als Kenngröße für die Güte der auditiven und visuellen Geschwindigkeitsdiskriminierung wurde anhand der gewichteten Up-Down-Methode die Diskriminierungsschwelle ermittelt, bei der mit 75%iger Wahrscheinlichkeit eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen zwei Fahrzeugen richtig erkannt wird. Der Versuch wurde auf der Basis eines 3x3-faktoriellen Versuchsplans durchgeführt, bei dem die beiden unabhängigen Variablen Geschwindigkeitsgrößenordnung und Darbietungsform zwei Messwiederholungsfaktoren darstellen. Die Geschwindigkeitsgrößenordnung variiert dabei zwischen den drei Stufen 120, 60 und 30 km/h (Standardreiz). Bei der Darbietungsform wird zwischen *visueller*, *visuell-akustischer* und *akustischer* Darbietung unterschieden. Zur Beantwortung der Frage, inwieweit sich die Faktorvariationen auf die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung auswirken, wurden die Versuchsdaten mit Hilfe von unterschiedlichen Verfahren der deskriptiven Statistik und der Inferenzstatistik analysiert. Ergänzend wurde der Einfluss von individuellen Merkmalen der Probanden auf die Diskriminierungsleistung untersucht.

Abstract

In traffic human beings constantly have to approximate the speed of vehicles in motion and to adjust their behaviour accordingly. The following thesis deals with two aspects: First, how well are human beings able to differentiate the speed of vehicles by means of their visual and audio senses, and are they able to improve their ability by combining these two senses. Second, the question of the influence of speed of vehicles on humans' ability to discriminate the speed of vehicles is discussed.

The following thesis is an analysis of psychological perception in a virtual simulation environment, in which the quality of velocity discrimination was assessed individually due to the varying order of velocity and the altering types of presentation with 45 test subjects. The parameter for the quality of the visual and audio velocity discrimination was the threshold at which the velocity difference of two vehicles, with a probability of 75%, is correctly perceived. The parameter was determined by using the weighted up-down method. The experiment was conducted on the basis of a 3x3 factorial experiment plan. In this plan, the two within factors were the independent variables order of velocity and type of presentation. The order of velocity varies between the three levels, *120 km/h*, *60 km/h* and *30 km/h* (standard impulse). The types of presentation are *visual*, both *visual and acoustic*, and *acoustic*. In order to answer the question to what extent the factor variation has an effect on the quality of the velocity discrimination, the research data was analysed by means of different methods of descriptive and inferential statistics. In addition, the impact of individual features of test subjects on the ability to discriminate the speed of vehicles was analysed.

Résumé

L'homme, en tant qu'utilisateur de la route, est perpétuellement obligé d'estimer la vitesse des véhicules en circulation et d'y adapter son comportement. D'un côté, la présente étude a examiné la capacité de l'homme à distinguer la différence de vitesse entre véhicules à l'aide du sens visuel et auditif, ainsi que la question si cette capacité s'améliore en combinant les deux sens. De l'autre côté, l'influence de la vitesse des véhicules sur la qualité de la distinction de vitesse a été examinée.

La présente étude est une analyse en psychologie de la perception, effectuée dans un environnement de simulation virtuelle. L'objectif était de déterminer pour chacun des 45 participants de la série d'expériences la qualité de distinction de la vitesse, en variant le degré de vitesse et la forme de présentation. Comme indice pour la qualité de distinction visuelle et auditive de vitesse, le seuil de perception a été déterminé. Celui a été calculé à l'aide de la méthode weighted up-down et représente le point où, avec une probabilité de 75%, la différence de vitesse entre deux véhicules est distinguée correctement. L'expérience s'appuie sur un plan factoriel 3x3, où les facteurs indépendants, ordre de vitesse et forme de présentation, représentent deux facteurs de répétition de mesure. L'ordre de vitesse varie entre les trois niveaux 120, 60 et 30 km/h. Concernant la forme de présentation on différencie les cas *visuelle*, *visuelle-acoustique* et *acoustique*. Pour déterminer l'influence de la variation des facteurs sur la qualité de la distinction de vitesse, les données de l'expérience ont été analysées à l'aide de différents procédés de la statistique descriptive et de l'inférence statistique. Pour compléter, la présente étude a examiné l'influence des caractéristiques individuelles des participants sur la capacité à distinguer des différences de vitesse.

1	<i>Einleitung</i>	1
2	<i>Sinnesphysiologische Aspekte der auditiven und visuellen Wahrnehmung</i>	4
2.1	Allgemeine Überlegungen	4
2.2	Das visuelle System	6
2.3	Das auditive System	15
3	<i>Räumliche Wahrnehmung</i>	28
3.1	Räumliches Sehen	28
3.2	Theorie der mehrfachen Tiefenkriterien	29
3.3	Der wahrnehmungsökologische Ansatz	44
3.4	Räumliches Hören	48
3.4.1	Die Außenohrübertragungsfunktion und ihre messtechnische Erfassung	48
3.4.2	Lokalisation und Lokalisationsunschärfe	53
3.4.3	Faktoren der Entfernungswahrnehmung.....	58
3.4.4	Faktoren der Richtungswahrnehmung.....	66
3.4.5	Ergänzende Faktoren der Rauwahrnehmung.....	76
4	<i>Bewegungswahrnehmung</i>	78
4.1	Visuelle Bewegungswahrnehmung	78
4.2	Auditive Bewegungswahrnehmung	91
4.2.1	Scheinbewegung	91
4.2.2	Auflösung der auditiven Bewegungswahrnehmung.....	94
5	<i>Versuchsbeschreibung</i>	97
5.1	Design und Methodik	97
5.2	Ablauf	102
6	<i>Zugangsbedingungen</i>	103
6.1	Sehtest	103
6.1.1	Sehschärfeprüfung	105
6.1.2	Stereopsis	111
6.1.3	Phorie	112
6.1.4	Zentrales Gesichtsfeld.....	113
6.2	Hörtest	115
7	<i>Internet-Fragebogen</i>	119

8	<i>Simulationsumgebung</i>	122
8.1	Grafiksystem.....	123
8.2	Audiosystem.....	130
8.3	Kopfpositionserfassung.....	132
8.4	Versuchsablaufsteuerung	134
8.5	Datenkommunikation	135
9	<i>Versuchsauswertung</i>	137
9.1	Verfahren	137
9.2	Stichprobenumfang und Altersverteilung	140
9.3	Geschwindigkeitsdiskriminierung	141
9.4	Mittlere Selbsteinschätzung, Reaktions- und Antwortzeit.....	152
9.5	Alter und Geschlecht.....	159
9.6	Versuchsdauer	162
9.7	Fahrpraxis.....	168
9.8	Fahrertyp	178
9.9	Persönlichkeit	183
10	<i>Zusammenfassung und Ausblick</i>	189
11	<i>Literaturverzeichnis</i>	195

1 Einleitung

Der Mensch verfügt über verschiedene Sinnessorgane, die es ihm ermöglichen, seine Umwelt wahrzunehmen. Die auf Aristoteles zurückgehende klassische Einteilung der Sinne ordnet den fünf Sinnesorganen Augen, Ohren, Nase, Zunge und Haut die Sinnesmodalitäten Sehen, Hören, Riechen, Schmecken und Fühlen zu. Die Sinnesmodalität dient hierbei als Sammelbegriff für alle Wahrnehmungen, die durch ein Sinnesorgan vermittelt werden. Nach heutiger Auffassung werden wesentlich mehr Sinnesmodalitäten voneinander unterschieden, was zum einen daraus resultiert, dass die unterschiedlichen Wahrnehmungen nicht nur den einzelnen Sinnesorganen, sondern einer Vielzahl von speziellen Sinneszellen zugeordnet werden. So lassen sich z.B. die Hautsinne in die Modalitäten Schmerz, Berührung, Druck, Wärme und Kälte untergliedern. Zum anderen werden bei der Einteilung der Sinne auch Modalitäten wie Winkelbeschleunigung, Muskellänge usw. berücksichtigt, die keine bewussten Empfindungen beim Menschen auslösen.

Virtuelle Simulationsumgebungen basieren auf der Reproduktion der in der Realität vorhandenen Umweltreize. Der Realitätsgrad bzw. die Qualität der Reiznachbildungen variiert hierbei von Sinnesmodalität zu Sinnesmodalität und hängt, neben der Berücksichtigung naturwissenschaftlicher Kenntnisse im Bereich der Sinnesphysiologie, im Wesentlichen vom "technisch Machbaren" ab, das wiederum wirtschaftlichen Zwängen, wie der Kosten-Nutzen-Relation, unterworfen ist.

Die Vorstellung von einem Mensch-Maschine-Interface, das eine direkte Anbindung der computergenerierten Welten an die Nervenbahnen der Sinnesorgane bzw. das im Gehirn ansässige sinnesverarbeitende neuronale Netz erlaubt, beflügelt schon lange die Fantasie von Science-Fiction-Autoren (*The Neuromancer*, *Matrix* usw.). In der Medizin existieren hierzu bereits einige Ansätze (Cochleaimplantat, künstliches Auge usw.), die dazu dienen, Einschränkungen bzw. Ausfälle von Sinnesmodalitäten, wie dies etwa bei Seh- oder Hörbehinderungen der Fall ist, zumindest teilweise auszugleichen.

Wahrnehmungspsychologische Untersuchungen in virtuellen Simulationsumgebungen haben gegenüber Realversuchen eine Reihe von Vorteilen. So können z.B. Signalformen bzw. Reizkombinationen ausgewählt werden, die in der Realität aus physikalischen Gründen nicht vorkommen. Ferner bietet die Simulationsumgebung die Möglichkeit, die einzelnen Sinne des Menschen ohne größere technische Probleme getrennt voneinander anzusprechen und auf ihre Interaktion hin zu untersuchen. Eine Vorgehensweise, die auch für die vorliegende Studie gewählt wurde, um die visuelle und die auditive Geschwindigkeitswahrnehmung des Menschen sowohl getrennt als auch in Abhängigkeit voneinander zu betrachten.

Zielsetzung und Motivation

Der Mensch hat insbesondere im Straßenverkehr ständig die Aufgabe, Bewegungsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen einzuschätzen und sein Verhalten situationsbedingt darauf abzustimmen. Ein einfaches Beispiel hierfür ist das Überqueren einer Straße. In der vorliegenden Arbeit wurde zum einen untersucht, wie gut der Mensch anhand des Seh- und Hörsinns die Bewegungsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen unterscheiden kann, und ob sich diese Fähigkeit durch die Kombination beider Sinne verbessert. Zum anderen wurde der Frage nachgegangen, welchen Einfluss die Bewegungsgeschwindigkeit von Fahrzeugen auf die Diskriminierungsleistung hat.

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine wahrnehmungspsychologische Untersuchung, bei der die Diskriminierungsleistung für insgesamt 45 Versuchspersonen bestimmt wurde. Die eigens hierfür entwickelte, virtuelle Simulationsumgebung, die es ermöglicht, Verkehrsszenen sowohl visuell als auch akustisch dreidimensional darzustellen, zeigt eine Landstraße, die von zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen unterschiedlich schnell befahren wird. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, zu entscheiden, welches der beiden Fahrzeuge schneller gefahren ist. Die realitätsnahen über ein HMD (*Head-Mounted-Display*) ausgegebenen Bild- und Toninhalte wurden hierbei auf der Grundlage einer Kopfpositionserfassung in "Echtzeit" an die Betrachterperspektive angepasst. Als Kenngröße für die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung wurde anhand der gewichteten Up-Down-Methode die Diskriminierungsschwelle ermittelt, bei der die Versuchsperson mit 75%iger Wahrscheinlichkeit die richtige Entscheidung darüber trifft, welches der beiden Fahrzeuge schneller gefahren ist. Der Versuch wurde auf der Basis eines 3x3-faktoriellen Versuchsplans durchgeführt, bei dem die beiden unabhängigen Variablen Geschwindigkeitsgrößenordnung und Darbietungsform zwei Messwiederholungsfaktoren darstellen. Die Geschwindigkeitsgrößenordnung variiert dabei in den drei Stufen 120, 60 und 30 km/h. Bei der Darbietungsform wird zwischen *visuell*, *visuell-akustisch* und *akustisch* unterschieden.

Um den Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit von Fahrzeugen auf die Güte der visuellen und auditiven Geschwindigkeitsdiskriminierung zu untersuchen, wurde geprüft, ob die Messergebnisse das Webersche-Gesetz bestätigen, dem zufolge die Unterschiedschwelle linear mit dem Reizzuwachs ansteigt. Wird, wie in der vorliegenden Studie, eine Kenngröße gewählt, die die Differenz zwischen zwei Fahrzeuggeschwindigkeiten in Prozent angibt, dürfte die Geschwindigkeit keinen Einfluss auf den Schwellenwert ausüben.

Eine frühere Untersuchung ergab bereits, dass die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung individuell sehr unterschiedlich ist. Durch das in der vorliegenden Untersuchung verwendete Schwellenmessverfahren war es möglich, diese Leistungsunterschiede genauer zu analysieren. Von Interesse war in diesem Zusammenhang ferner die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen der erbrachten Diskriminierungsleistung und den individuellen Merkmalen der Probanden gibt. Zur Auswertung

des Hauptversuchs wurden daher, neben dem Alter und dem Geschlecht, noch weitere personenbezogene Daten herangezogen, die mittels eines Internet-Fragebogens erfasst wurden. Bei diesen Daten handelt es sich um Angaben zur Fahrpraxis sowie um die Beurteilung der eigenen Fahrweise und der eigenen Fahrfertigkeiten (Fahrertyp). Darüber hinaus wurden mit Hilfe des Hamburger Persönlichkeitsinventars (HPI) sechs Basisdimensionen der Persönlichkeit ermittelt. Im Unterschied zum etablierten Fünf-Faktoren-Modell (*Big-Five*) beinhaltet der HPI auch den Basisfaktor Risikobereitschaft, der für die vorliegende Studie von besonderem Interesse ist.

Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Arbeit widmet sich zunächst dem Thema Sinnesphysiologie. Im Vordergrund stehen hierbei die dem räumlichen Sehen, dem räumlichen Hören und der Bewegungswahrnehmung zugrunde liegenden physiologischen Vorgänge in den Sinnesorganen und Nervenbahnen. Auf das räumliche Sehen und das räumliche Hören wird im dritten Kapitel näher eingegangen. Das vierte Kapitel beschäftigt sich mit den verschiedenen Arten der Bewegungswahrnehmung beim Menschen und den Bedingungen, unter denen der visuelle und akustische Eindruck einer Bewegung entsteht.

Auf diesen theoretischen Teil der Arbeit folgt die eigentliche wahrnehmungspsychologische Untersuchung. Zunächst werden das verwendete Versuchsdesign und die zugrunde liegende Methodik erläutert. Nach der Beschreibung der Eingangsvoraussetzungen für die Teilnahme, die sich aus den der Untersuchung vorangestellten Hör- und Sehtests ergeben, wird ausführlich auf den Versuchsaufbau sowie die darin integrierte virtuelle Simulationsumgebung eingegangen. Im Anschluss daran werden die im Wahrnehmungsversuch ermittelten Messwerte analysiert. Am Ende der Arbeit werden die wichtigsten Untersuchungsergebnisse und die sich daraus ergebenden Schlussfolgerungen dargelegt. Ferner werden Perspektiven für mögliche, an diese Studie anknüpfende Folgeuntersuchungen aufgezeigt.

2 Sinnesphysiologische Aspekte der auditiven und visuellen Wahrnehmung

2.1 Allgemeine Überlegungen

Die mit den Wahrnehmungsprozessen des Sehens und Hörens verknüpften physiologischen Vorgänge in den Sinnesorganen und Nervenbahnen detailliert darzulegen und auf alle Aspekte der Informationsverarbeitung im Zentralnervensystem einzugehen, würde den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Im Folgenden wird daher lediglich der Versuch unternommen, den Wahrnehmungsprozess als solchen physiologisch näher zu beleuchten. Im Vordergrund stehen hierbei vor allem die mit dem räumlichen Sehen und Hören sowie der Bewegungswahrnehmung in Verbindung stehenden Vorgänge.

Aus sinnesphysiologischer Sicht lassen sich die verschiedenen Sinne des Menschen nach der Art ihrer Rezeptoren unterteilen. Rezeptoren stellen reizaufnehmende und -verarbeitende Strukturen dar /Dors98/. Die Sensoren bzw. Sinnesrezeptoren von Auge und Ohr, die für die vorliegende Untersuchung von großer Bedeutung sind, werden als Exterozeptoren bezeichnet, da sie Reize aus der Umwelt aufnehmen. Diese Exterozeptoren sind ebenso wie die Entrozeptoren, die Informationen über mechanische und chemische Ereignisse aus den Eingeweiden vermitteln, und die Propriozeptoren, die Körperlage und -bewegung erfassen, auf bestimmte Reize spezialisiert. Für die als Photorezeptoren bezeichneten Stäbchen und Zapfen des Auges stellen elektromagnetische Schwingungen mit einer Wellenlänge von 400 bis 700 nm adäquate Reize dar, wohingegen die Mechanorezeptoren des Ohrs optimal auf Schallwellen mit einer Frequenz zwischen 20 und 16000 Hz reagieren. Die Reizaufnahme erfolgt in beiden Fällen dadurch, dass der Reiz in ein lokales Sensorpotential umgewandelt wird (Transduktion). Dieser Sensorpotential wird anschließend durch einen Prozess, den man als Transformation bezeichnet, in frequenzcodierte Aktionspotentiale überführt. Die Übertragungsfunktion des Sensors liefert hierbei den funktionalen Zusammenhang zwischen der Reizstärke und der Aktionspotentialfrequenz. Die Aktionspotentiale mehrerer Sensoren werden in der Regel auf eine geringere Zahl afferenter Nervenfasern übertragen (Konvergenzprinzip). Diese sind im Zentralnervensystem direkt oder über Intermediärneurone zu Netzwerken verschaltet. Die in den afferenten Neuronen frequenzcodierten sensorischen Informationen erfahren in einem bis heute nur unvollständig verstandenen Prozess (Divergenz und Differenzierung) eine Modulation, als deren Ergebnis in sensorischen Hirnarealen sich Gruppen zentraler sensorischer Neurone über ihre Zugehörigkeit zu abgrenzbaren rezeptiven Feldern unterscheiden lassen. Diese besitzen im Allgemeinen sowohl erregende als auch hemmende Anteile. Bild 2.1 zeigt modellhaft anhand zweier konzentrisch aufgebauter rezeptiver Felder die gegensätzliche

Polung von Zentrum und Peripherie bei On- und Off-Zentrum-Feldern. Die Größe des rezeptiven Feldes und der relative Anteil von Zentrum und Peripherie ist wie bei der Hell-Dunkel-Adaption des Auges durch zentral gesteuerte Vorgänge veränderbar. Die Reizstärke-Erregungsantwort-Beziehung sensorischer Neuronen lässt sich hierbei durch die Übertragungsfunktion, sowie die absoluten und relativen Unterschiedsschwellen beschreiben.

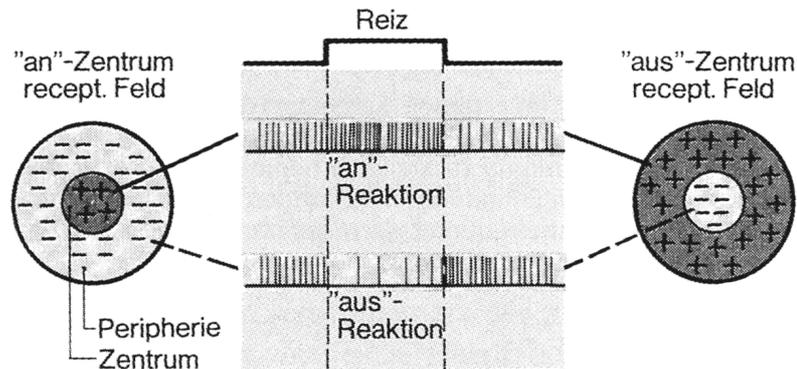


Bild 2.1: Funktionelle Organisation rezeptiver Felder in sensorischen Systemen mit gegensätzlicher Polung von Zentrum und Peripherie /Birb03/

Die sensorischen Systeme der auditiven und visuellen Wahrnehmung erstrecken sich über die jeweiligen Nervenstränge (Bild 2.6 und Bild 2.24) bis hin zu den zugehörigen Großhirnarealen, in denen die kortikale Signalverarbeitung stattfindet. Auf dieser Wegstrecke durchlaufen die neuronalen Erregungspotentiale tiefer gelegene Stammhirn- und Mittelhirnareale, in denen in sog. sensorischen Kernarealen weitere Veränderungen an den einlaufenden Signalen eintreten. Mit der Großhirnrinde besteht eine intensive Rückkopplung, die nicht nur die direkten sensorischen Rindenfelder, sondern auch solche für Emotionen, Motorik, allgemeinen Wachheitsgrad und alle weiteren Projektionen der primären Sinnesfelder umfasst.

Anatomisch gesehen lässt sich die Großhirnrinde mit dem Stirn-, Scheitel-, Schläfen- und Hinterhauptslappen in vier Hauptregionen unterteilen (Bild 2.2). Betrachtet man jedoch ihre Funktionalität, ergibt sich eine andere Form der Aufteilung, da sich im Sinne der Lokalisationstheorie kognitive Prozesse einzelnen Großhirnrindenarealen zuordnen lassen. Neben den motorischen und sensorischen Sprachzentren (Broca- und Wernicke-Region), die ebenfalls in Bild 2.2 dargestellt sind, beschrieb z. B. der Anatom Brodmann 50 verschiedene funktionelle Hirnrindenfelder. Eine Übersicht über diese funktionale Zuordnung der verschiedenen primären, sekundären und tertiären Felder zeigt Bild 2.3.

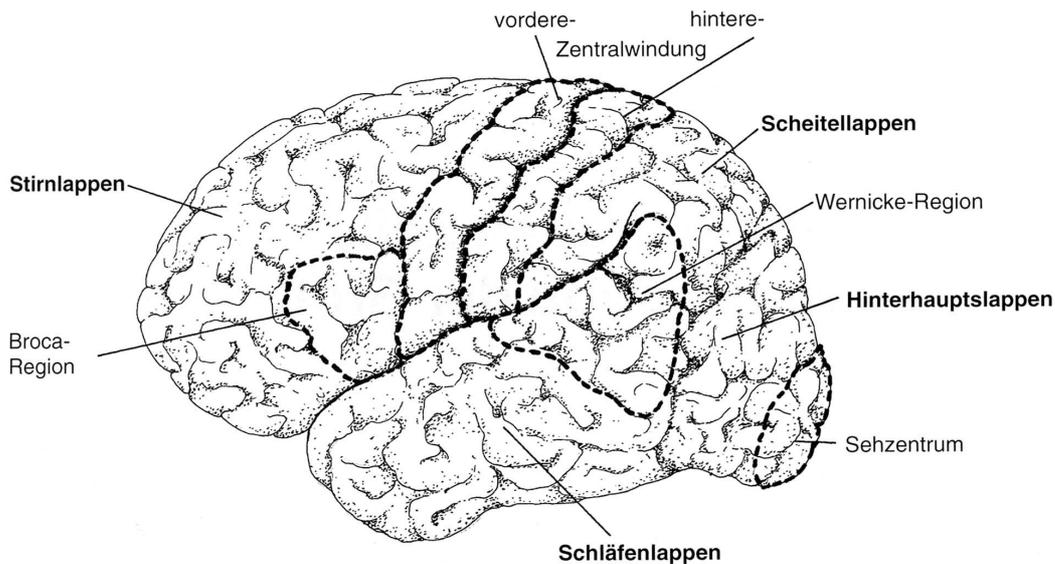
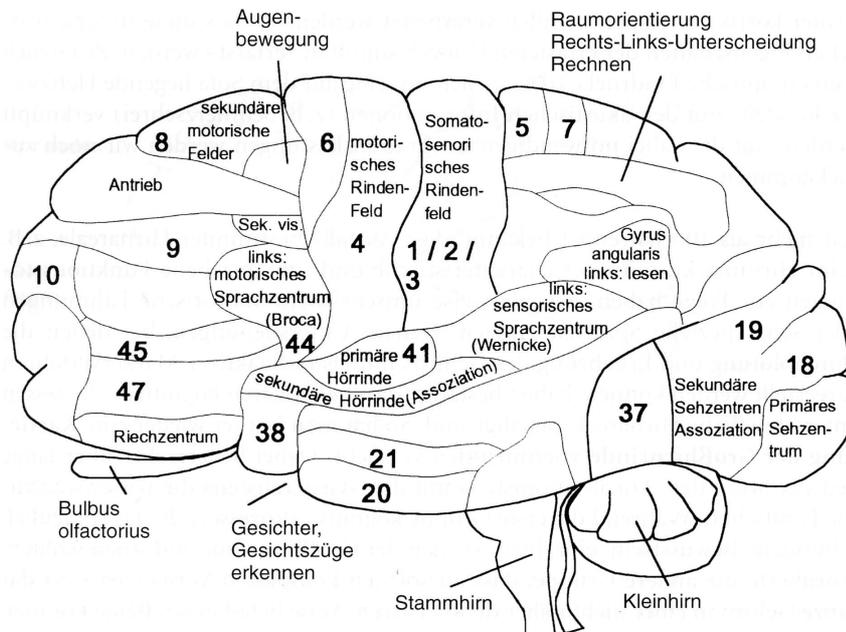


Bild 2.2: Anatomische und funktionelle Gliederung der dominanten Großhirnrinde /Hüls00/



Sekundäre visuelle Felder: 18, 19, 20, 21, 37; Sekundäre somatosensorische Felder: 5, 7; Sekundäre motorische Felder: 6; Tertiäre motorische Felder: 7, 22, 37, 39, 40; Tertiäre somatosensorische Felder: 9, 10, 11, 45, 46, 47

Bild 2.3: Funktionelle Hirnrindenfelder /Hüls00/

2.2 Das visuelle System

Auf der Netzhaut des Auges befinden sich durch die farbempfindlichen Zapfen und die hell-dunkel-empfindlichen Stäbchen zwei verschiedene Sensortypen, die das photopische Sehen bei Tageslicht und das skotopische Sehen in der Dämmerung ermöglichen. Zapfen und Stäbchen haben dabei unterschiedliche Absolutempfindlichkeiten (Duplitätstheorie des Sehens), was den Helligkeitsbereich, in dem gesehen

werden kann, erheblich erweitert. Auf die ungleiche Verteilung der Zapfen und Stäbchen auf der Retina wird im Zusammenhang mit dem Hörtest, der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, näher eingegangen (vgl. Kapitel 6).

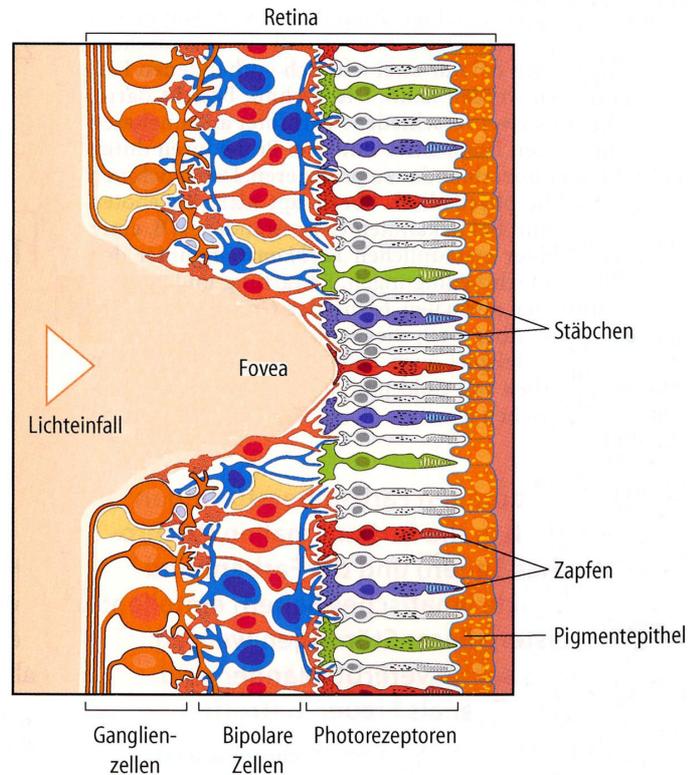


Bild 2.4: Aufbau der Retina / Birb03/

Wie Bild 2.4 zeigt, fällt das Licht nur im Bereich der Fovea direkt auf die Photorezeptoren, wohingegen im übrigen Teil der Retina zuerst die Ganglienzellen und Bipolaren Zellen beleuchtet werden, zwischen denen auch die Horizontal- und Amakrinzellen angeordnet sind.

Der neuronale Aufbau der Retina, der durch eine starke Signalkonvergenz geprägt ist - eine Millionen Ganglienzellen stehen etwa 125 Millionen Photosensoren gegenüber - führt dazu, dass bereits in der Netzhaut eine Informationsverarbeitung stattfindet. Das in Bild 2.5 dargelegte Modell des Farbensehens verdeutlicht, dass die neuronale Signalverarbeitung in der Retina einerseits mit der trichromatischen Theorie des Farbensehens im Einklang steht und andererseits die Farbenpaare Rot/Grün, Blau/Gelb und der Kontrast Schwarz/Weiß als psychophysiologische Gegensatzpaare anzusehen sind, die unvereinbare Empfindungen auslösen (Heringsche Gegenfarbentheorie). Die Farbwelt des Menschen ist folglich aus den vier sog. Urfarben Rot, Gelb, Grün und Blau aufgebaut.

Nach ihrer Art der Verarbeitung von Zapfeninformation lassen sich die retinalen Ganglienzellen in konzentrische Breitbandzellen, die nur auf Helligkeitskontraste reagieren, und einfache Gegenfarbentypen einteilen, die sowohl Helligkeits- als auch Farbkontraste auswerten /Gall02/. Die Gesamtempfindlichkeit wird beim photopischen

Sehen in erster Linie von den beiden im langwelligen Bereich empfindlichen Zapfen bestimmt /Dude01/.

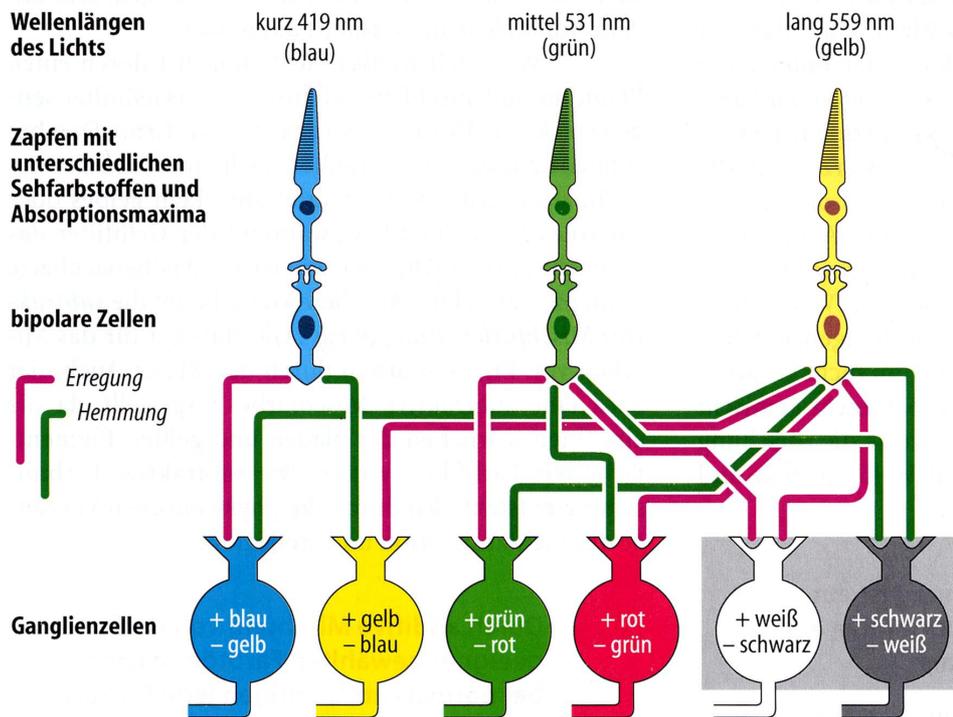


Bild 2.5: Modell des Farbensehens in der Retina /Birb03/

Die rezeptiven Felder der retinalen Ganglienzellen sind konzentrisch aufgebaut. Ihre Ausdehnung wird von der Lage auf der Retina bestimmt und ist im Bereich der Fovea am kleinsten und in der Retinaperipherie am größten. Im Hinblick auf die zeitlichen Eigenschaften der Signalantworten lassen sich die retinalen Ganglienzellen außerdem danach unterscheiden, ob sie nur auf eine Reizänderung reagieren (phasisch), oder solange aktiv bleiben, wie eine Reizung des Zentrums des rezeptiven Felds vorliegt (tonisch). Ein phasisches Antwortverhalten ist für die Bewegungswahrnehmung von besonderer Bedeutung. Eine Klassifikation der Ganglienzellen erfolgt ferner danach, mit welcher Schicht des seitlichen Kniehöckers sie in Verbindung stehen und welcher morphologischen Klasse sie angehören.

Wie Bild 2.6 zeigt, sind die retinalen Ganglienzellen der Augen über sich kreuzende Nervenbahnen mit dem jeweils gegenüberliegenden seitlichen Kniehöcker (Corpus Geniculatum Laterale) verbunden, der verkürzt auch als CGL oder LGN (Lateral Geniculate Nucleus) bezeichnet wird. Der dorsale (rückseitige) Teil des seitlichen Kniehöckers (LGNd) besteht aus vier kleinzelligen (parvozellulären) und zwei großzelligen (magnozellanen) Schichten. Die damit in Verbindung stehenden Ganglienzellen der Netzhaut werden entsprechend als P-Zellen bzw. M-Zellen bezeichnet. Mit den K-Zellen existiert noch eine dritte Gruppe von retinalen Ganglienzellen mit Afferenzen zu Neuronen, die sich zwischen den P- und M-Schichten (koniozellulär) befinden /Gall02/.

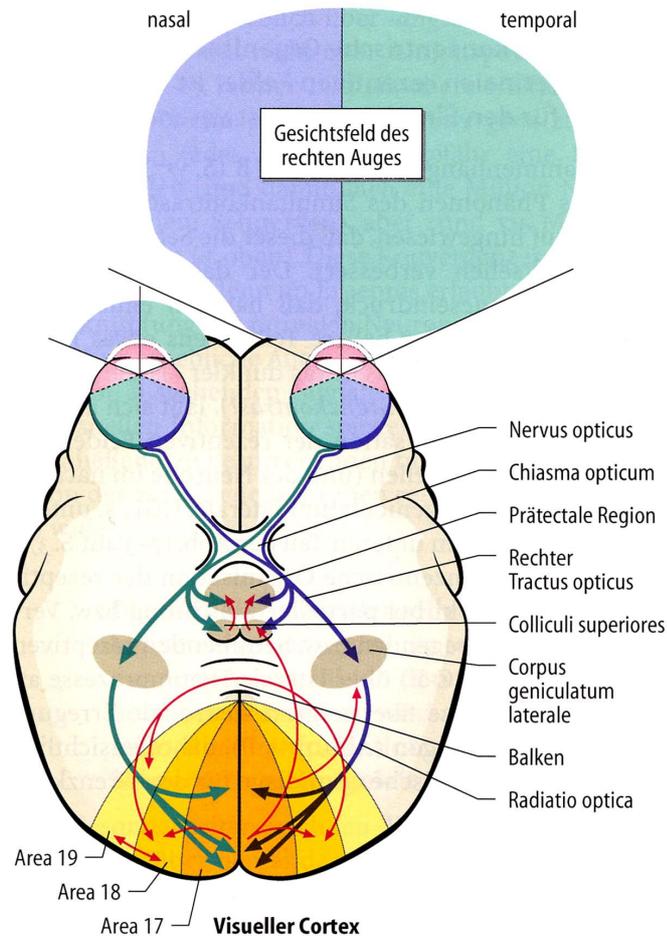


Bild 2.6: Schema der Sehbahn mit den wichtigsten zentralen Sehzentren im Gehirn /Birb03/

Aus morphologischer Sicht lassen sich retinale Ganglienzellen als Alpha, Beta oder Gamma-Zellen klassifizieren. Alpha-Zellen zeichnen sich durch weitreichende Dendriten und dicke Axone aus, wohingegen Beta-Zellen über feine Dendriten und mittelgroße Axone verfügen. Die dünnsten Axone sind bei den Gamma-Zellen zu finden, die aber zum Teil über weitreichende Dendriten verfügen. Die Leitungsgeschwindigkeit der Axone ist mit ihrer Größe derart verknüpft, dass große Axone schneller reagieren als kleine, woraus sich eine entsprechende Einteilung in die Latenzklassen I-III ergibt.

M-Alpha-Neurone können dem Hell-Dunkel-Sehen zugeordnet werden. Vermutlich handelt es sich hierbei ausschließlich um konzentrische Breitbandzellen /Gall02/. Ihr Antwortverhalten ist vorwiegend phasisch. Von P-Beta-Neuronen werden auch Farbinformationen übertragen, wohingegen K-Gamma-Neurone an der Steuerung der Pupillenmotorik und anderen vegetativen Reaktionen beteiligt sind. Das Antwortverhalten der Gamma-Neurone ist heterogen, wohingegen Beta-Neurone sich tonisch verhalten /Dude01/.

In der Sehkreuzung (Chiasma opticum) werden die Sehnerven (Nervi optici) so verknüpft, dass die sensorischen Abbildungen einer Gesichtshälfte ausschließlich in der

kontralateralen Gehirnhälfte verarbeitet werden. Die Fasern der nasalen Retinahälfte werden hierbei gekreuzt, wohingegen die der außen liegenden (temporalen) Hälfte der Netzhaut ungekreuzt weiter verlaufen. Der Tractus opticus verbindet die Sehkreuzung sowohl mit den augenmotorischen Zentren, der prätektalen Region und der vorderen Vierhügelplatte (Colliculi superiores), als auch mit dem seitlichen Kniehöcker, einem Kern des Thalamus.

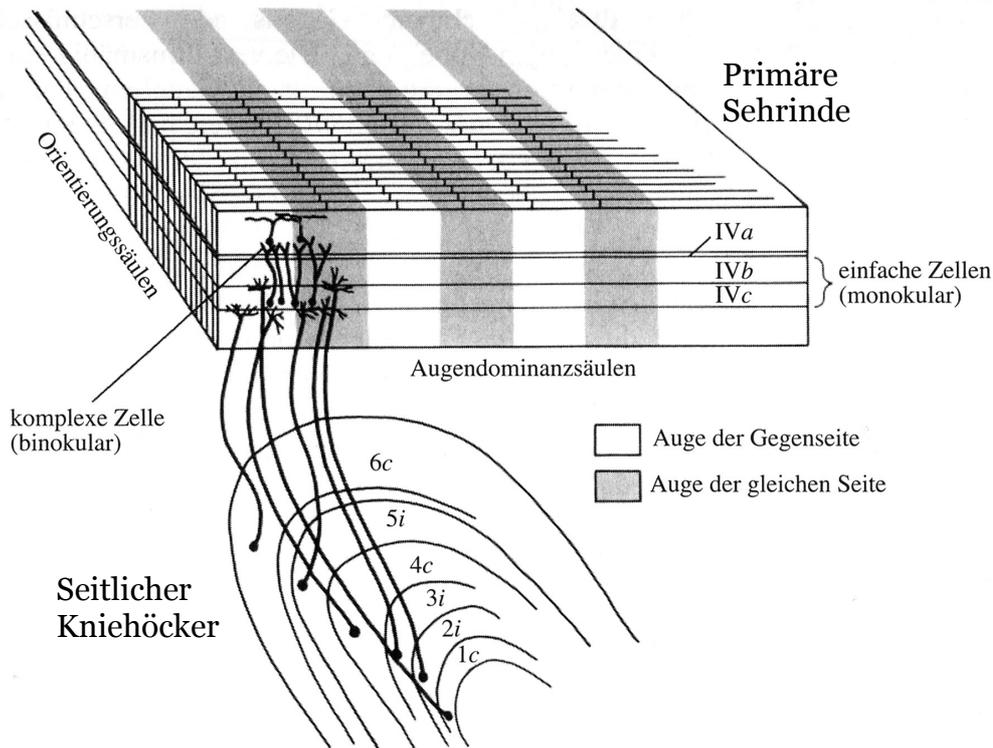


Bild 2.7: Schematischer Aufbau des seitlichen Kniehöckers und der primären Sehrinde nach /Thom01/

Wie bereits dargelegt, ist der dorsale (rückseitige) Teil des seitlichen Kniehöckers (LGNd) aus sechs Zellschichten aufgebaut (1-4 parvo- und 5-6 magnozellular). Wie Bild 2.7 zeigt, enthalten die einzelnen reitrop organisierten Schichten, bei denen benachbarte Punkte der Retina ebenfalls benachbarten Neuronen entsprechen, nur sensorische Abbildungen von einem Auge. Die afferente Anbindung zum visuellen Kortex erfolgt über den letzten Teil der Sehbahn, die Sehstrahlung (Radiatio optica).

Die erste Station der kortikalen Verarbeitung ist die primäre Sehrinde, die nach Brodmann auch als Area 17 bezeichnet oder mit V1 abgekürzt wird. Der wiederum aus morphologischer Sicht schichtartige Aufbau des primären Zentrums erlaubt eine sechsstufige Einteilung, wobei die charakteristischste Schicht IV nochmals in drei Teilregionen untergliedert ist. Die genikulären M- und P-Fasern enden vorwiegend in Schicht IVc, wobei sich senkrecht zur Schichtbildung okuläre Dominanzsäulen ausbilden, bei denen danach unterschieden wird, von welchem Auge die Reize ausgehen. Der Bereich, in dem Reizabbildungen aus beiden Augen zu gleichen Teilen vorliegen (binokulare Fusion), wird von komplexen Zellen abgedeckt.

Bis auf die Schicht IVc reagieren die meisten Neuronen in der primären Sehrinde bevorzugt auf bewegte oder zeitlich in ihrer Intensität modulierte Linien, Kanten oder Gitter einer bestimmten Orientierung. Die rezeptiven Felder sind folglich nicht konzentrisch, sondern eher rechteckig oder kantenförmig aufgebaut. Die rezeptiven Feldereigenschaften der visuellen Kortexneurone lassen sich, wie Bild 2.8 verdeutlicht, untergliedern in Orientierungs-, Richtungs- und Längenspezifität.

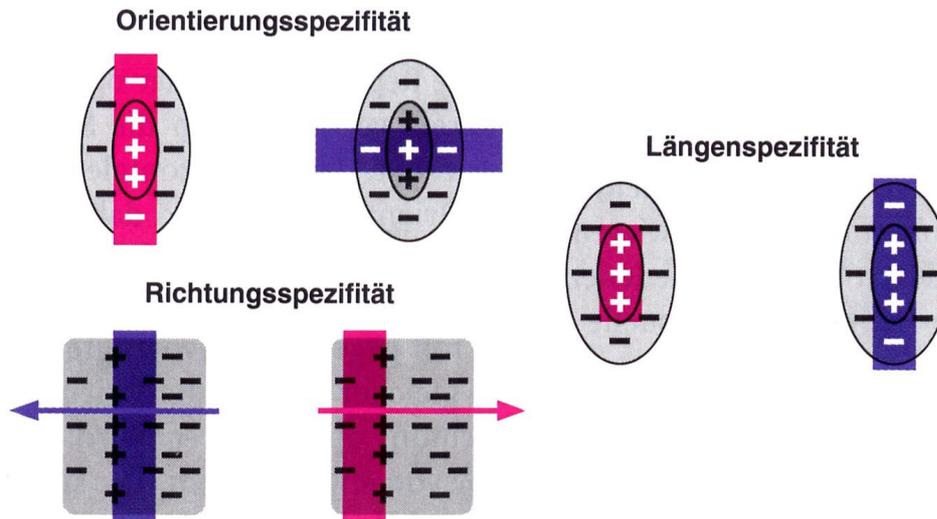


Bild 2.8: Spezifität kortikaler Zellen /Schm01/

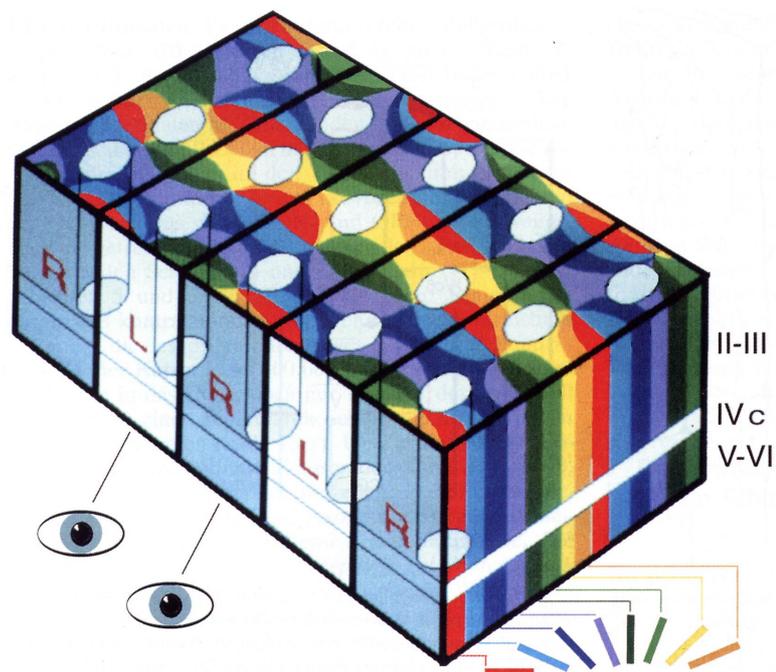


Bild 2.9: Anordnung orientierungsspezifischer Neurone in einem Ausschnitt aus V1 /Dude01/

Neurone gleicher Orientierungsspezifität sind, wie Bild 2.9 anhand einer Farbcodierung zeigt, nicht wahllos in der Sehrinde verteilt, sondern bilden senkrecht zur Schichtung sog. Orientierungssäulen. Der Winkel der Hauptorientierung ändert sich stetig von einer

Orientierungssäule zur anderen. Die weißen Ovale symbolisieren die sog. "Blobs", die keine Orientierungsspezifität erkennen lassen und sich durch ihre besonders hohe Stoffwechselaktivität auszeichnen. In der unmittelbaren Nachbarschaft von "Blobs" ist die Stoffwechselaktivität geringer. Diese als "Interblob" bezeichnete Region enthält orientierungsselektive Neuronen mit meist geringer Farbsensitivität /Gall02/. Der Grund für die erhöhte Stoffwechselaktivität von "Blobs" scheint mit ihrer besonderen Eigenschaft verknüpft zu sein, auf farbige Reize zu reagieren /Thom01/.

Neben dem primären Sehzentrum V1, das aufgrund seines spezifischen Schichtaufbaus auch als Area Striata bezeichnet wird, verfügt der Mensch über eine Vielzahl weiterer kortikaler Areale, die als extrastriär bezeichnet werden. Hierzu zählen die visuellen Elementarregionen V2, V3 und V4 und die visuellen Assoziations- und Integrationsregionen, die sich, wie Bild 2.10 zeigt, bestimmten Verarbeitungspfaden und Funktionen zuordnen lassen.

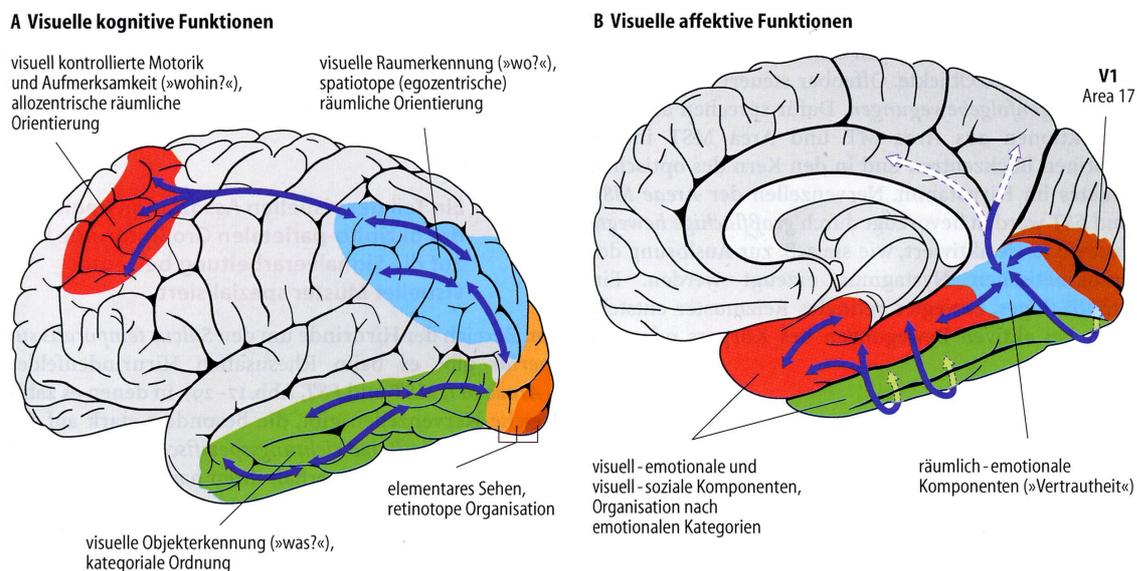


Bild 2.10: Schema der Verteilung unterschiedlicher visueller integrativer und kognitiver Funktionen über die äußere (A) und innere (B) Hirnoberfläche /Birb03/

Nach klassischer Auffassung wird davon ausgegangen, dass die visuelle Signalverarbeitung in zwei parallel arbeitenden Systemen erfolgt. Das Parvo-System gilt, aufgrund der bereits dargelegten Eigenschaften der zugehörigen Ganglienzellen (P-Beta-Neuronen), als farbensensitiv, relativ langsam mit geringer Kontrastsensitivität und hoher räumlicher Auflösung. Dem Magno-System, das seine retinalen Informationen von M-Alpha-Neuronen erhält, werden hingegen die Eigenschaften achromatisch, relativ schnell, hohe Kontrastsensitivität und niedrige räumliche Auflösung zugeordnet. Bild 2.11 zeigt in einer Übersicht die wichtigsten Pfade und Stationen der Parallelverarbeitung der Struktur- und Bewegungseigentümlichkeiten der visuellen Reizmuster im magnozellulären und parvozellulären System.

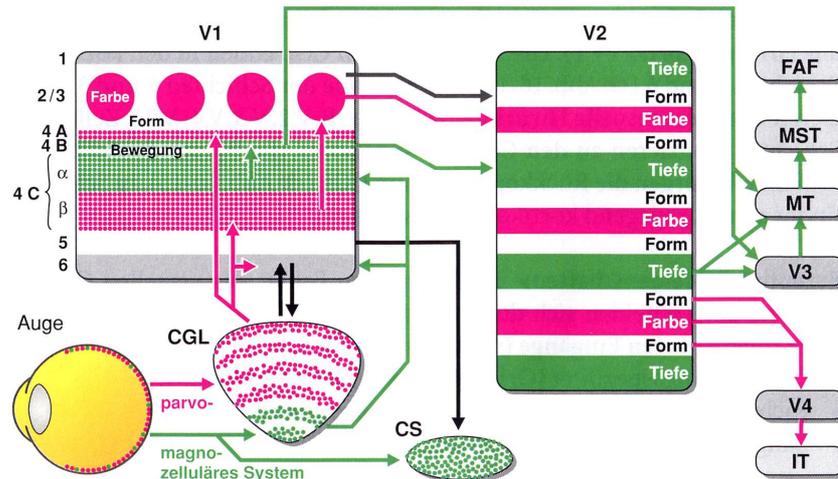


Bild 2.11: Parallelverarbeitung im mangelzellulären (grün) und parvozellulären System (rot) /Schm01/

Die sekundäre Sehrinde umgibt ringförmig die primäre, von der sie auch in erster Linie ihren Input erhält. Ebenso wie alle extrastriären Areale sind die meisten Neuronen von V2 binokular. Tangentialschnitte ergeben eine Einteilung in dunkle und blasser Streifen, wobei zusätzlich die dunklen Streifen danach unterschieden werden, ob sie dünn oder dick sind. Neuronen in den dicken Streifen reagieren selektiv auf Bewegungs- und Tiefeninformationen, wohingegen solche in den dünnen Streifen vornehmlich farbselektiv sind. Orientierungsselektive Neuronen, die für die Formerkennung relevant sind, sind dagegen in überwiegender Zahl in den blassen Streifen vertreten.

Aufgrund neuerer Erkenntnisse werden sowohl die strenge Trennung der beiden Verarbeitungssysteme als auch die postulierte Aufgabenteilung zwischen den beiden Systemen, nach denen Bewegungsinformationen ausschließlich im M-Pfad und Farbinformationen nur im P-Pfad verarbeitet werden, kritisch betrachtet /Gall02/. Dennoch gilt, wie Bild 2.11 zeigt, dass bei der Verarbeitung von Bewegungsreizen die M-Zellen in den Schichten IVC α , IVB von der primären Sehrinde (V1) und in den dicken Streifen von V2 sowie in V3 und V5 (MT) besonders aktiv sind, wohingegen bei der Verarbeitung von Farbinformationen die P-Zellen in den "Blobs" von V1, den dünnen Schichten von V2 und in V4 erhöhte Aktivität zeigen.

Die Antworteigenschaften der V3-Neurone zeigen eine ausgeprägte Orientierungsselektivität und deuten auf eine starke Interaktion zwischen der Verarbeitung von Farb- und Bewegungsinformationen hin. V3 wird eine wichtige Rolle bei der Beurteilung der Bewegungsrichtung eines Gesamtmusters zugesprochen.

Zum ventralen Pfad des visuellen Systems zählt die als V4 bezeichnete kortikale Region, die entgegen der traditionellen Vorstellung nicht nur Informationen vom parvozellulären, sondern auch vom magnozellulareren Typ verarbeitet. Auch die Annahme, diese Region sei ausschließlich auf Farbwahrnehmung spezialisiert, wurde um Aspekte der Formdiskriminierung und Objekterkennung erweitert /Gall02/. Die komplexe

Fähigkeit des Erkennens und Wiedererkennens, z.B. von Gesichtern, wird dem infero-temporalen Kortex (IT) zugeordnet.

Das medio-temporale Areal (MT, V5) wird zum dorsalen Pfad des visuellen Systems gezählt und ist für die Verarbeitung von visueller Bewegungs- und Tiefeninformation von besonderer Bedeutung. Die Neurone, mit ihren zur Peripherie des Gesichtsfelds hin immer größer werdenden rezeptiven Feldern, reagieren vorwiegend richtungsselektiv. Darüber hinaus reagieren viele Neurone in diesem Bereich der Hirnhaut selektiv auf die Geschwindigkeit und Orientierung eines Reizes. Eine Farbselektion findet dagegen kaum bzw. nur sehr vereinzelt statt. Neurone des ebenfalls zum dorsalen Pfad zählenden medio-superior-temporalen Areal (MST) erhöhen ihre Aktivität bei Darbietung expandierender oder kontrahierender Muster, wie sie z.B. durch Eigenbewegungen auf der Retina erzeugt werden.

In Bild 2.12 sind die wichtigsten Hirnrindenstrukturen, die zur Bewegungswahrnehmung beitragen, in einem Schema zusammengetragen. Die bewegungsempfindlichen Neurone der kortikalen Areale projizieren zu den bewegungsspezifischen Hirnrindengebieten im Bereich des superioren temporalen Sulcus (STS). Die Abkürzungen AST und FST stehen hierbei für den anterioren Teil und den Fundus des Sulcus Temporalis.

Dieses Schema berücksichtigt neben den bereits aufgeführten Arealen auch die Eingänge des medio-temporalen Areals (MT, V5) über den Colliculus superioris (s.o. Bild 2.11) und des Pulvinars. Ebenso fließt die Rückkopplung des medio-superior-temporalen Areals (MST) über den vestibulären Kortex mit in die Betrachtung ein. Diese Ergänzungen verdeutlichen, dass die visuellen Assoziations- und Integrationsregionen über Informationen bezüglich der Stellung bzw. Bewegung der Augen, des Kopfes und des Körpers verfügen, die es u.a. erst ermöglichen, die retinalen Reizmuster so zu verarbeiten, dass die extrapersonale Welt als raum- und richtungskonstant wahrgenommen werden kann (Konstanzleistung). Ebenso fließt mit der Einbeziehung des Pulvinars (Kern des posterioren Thalamus) der Aspekt der aufmerksamkeitsabhängigen Modulation der neuronalen Aktivität mit ein /Gall02/.

Eine Übersicht über die Areale, die für die Objektwahrnehmung am wichtigsten sind, zeigt Bild 2.13. Hier wurde der inferotemporale Kortex in die beiden Areale TEO und TE untergliedert, um die Aufgabenteilung zwischen dem Erkennen komplexer Reize (TEO) und dem visuellen Gedächtnis (TE) hervorzuheben.

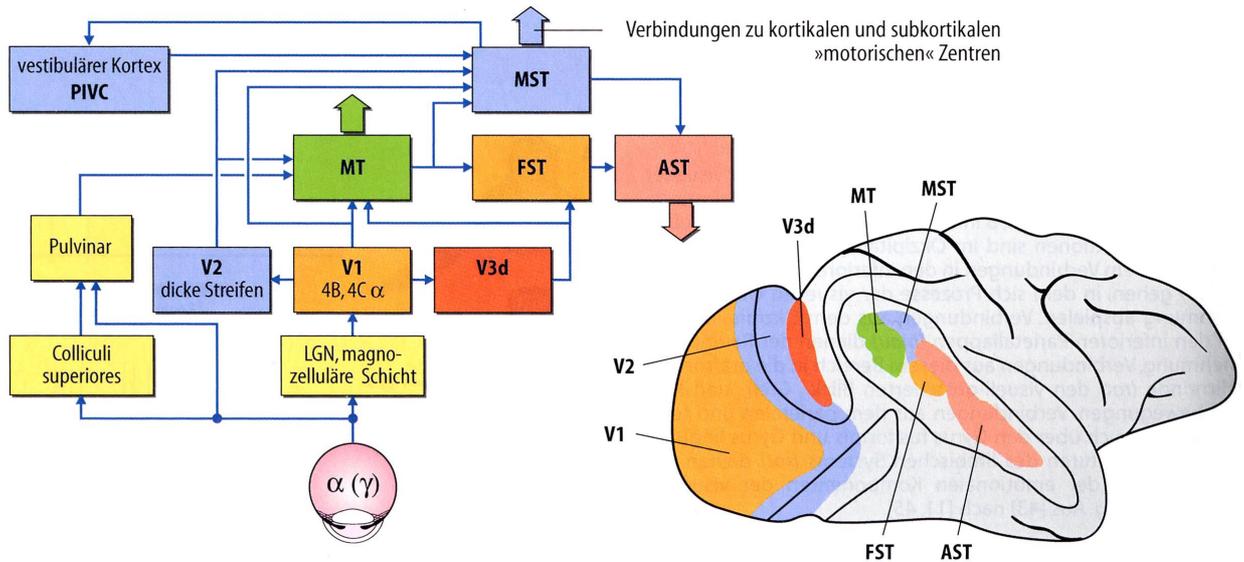


Bild 2.12: Schema der wichtigsten Hirnrindenstrukturen zur visuellen Bewegungswahrnehmung (Dorsale Bahn) /Birb03/

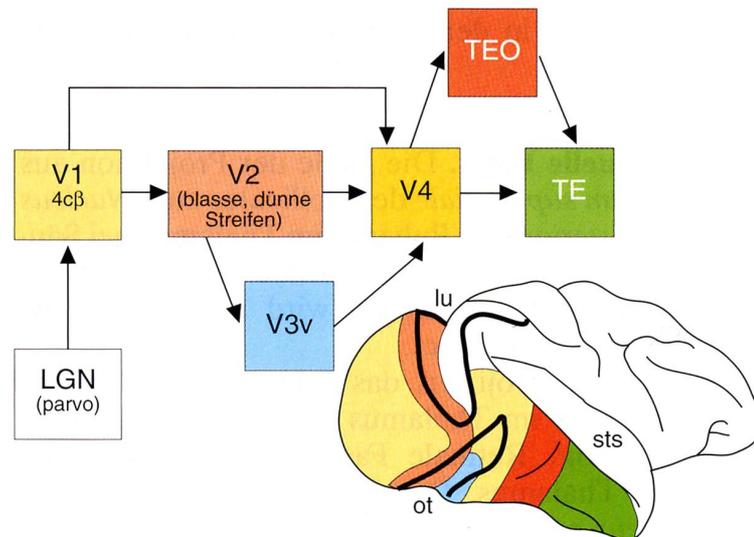


Bild 2.13: Schema der wichtigsten Hirnrindenstrukturen zur visuellen Objekterkennung (Ventrale Bahn) /Dude01/

2.3 Das auditive System

Der Aufbau des Außen- und Mittelohrs ist geprägt von der Übertragung der Schallwellen des Mediums Luft auf die wässrigen Flüssigkeiten der Innenohrschnecke (Cochlea). Die mit einem Schallsignal einhergehenden Luftdruckschwankungen werden über den äußeren Gehörgang zum Trommelfell geleitet und versetzen die mit den Mittelohrknöchelchen verbundene Membran in Schwingung. Aufgrund des drastischen Flächenunterschieds zwischen Trommelfell und der Steigbügelfußplatte, die mit dem ovalen Fenster verbunden ist, sowie der Hebelwirkung, der aus den Mittelohrknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel bestehenden Verbindung zum Innenohr,

werden die Schwingungen verstärkt auf die Innenohrschnecke (Cochlea) übertragen. Dieser Verstärkungseffekt von etwa 30 dB /Dude01/ gleicht dem Unterschied zwischen den Schallkennimpedanzen von Luft und den Innenohrflüssigkeiten teilweise wieder aus.

Auf die Übertragungseigenschaften des Gehörs und die messtechnische Überprüfung der Hörfunktion wird im Zusammenhang mit dem Hörtest, der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurde, näher eingegangen (vgl. Kapitel 6).

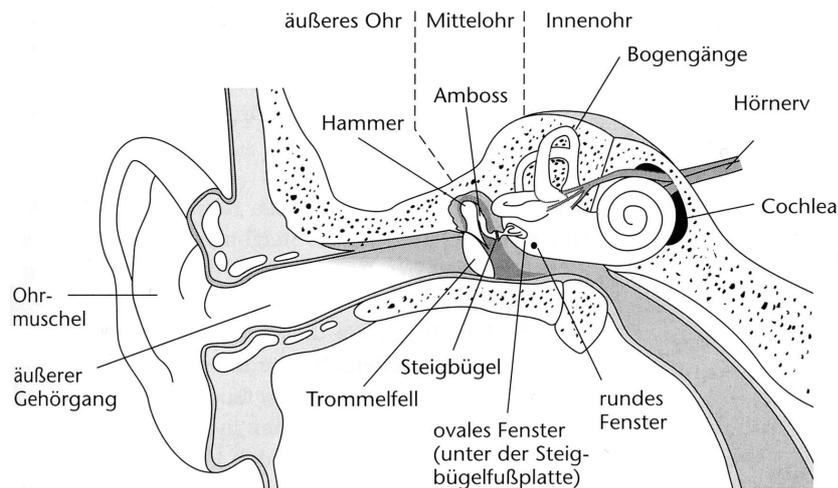


Bild 2.14: Das Ohr mit seinen drei Teilen - äußeres Ohr, Mittelohr und Innenohr /Gold02/

Die knöcherne Innenohrschnecke ist beim Menschen in zweieinhalb Windungen aufgerollt. Wie Bild 2.15 insbesondere durch die schematische Darstellung einer entrollten Cochlea im linken Teil, zeigt, existieren mit der oben liegenden Scala vestibuli (Vorhoftrappe) und der Scala tympani (Paukentreppe) zwei mit Perilymphe gefüllte Kanäle, die an der Schneckenspitze über ein kleines Loch, das sog Helicotrema, miteinander verbunden sind. Im übrigen Schneckenverlauf sind die beiden Skalen durch eine dritte, die Scala media, voneinander getrennt, die mit Endolymphe gefüllt ist (Cochleare Trennwand). Die unterschiedlichen Potentiale der beiden Innenohrflüssigkeiten sind für die Reizübertragung des in der Scala media ansässigen eigentlichen Hörorgans, des sog. Cortischen Organs, von elementarer Bedeutung.

Das Cortische Organ besteht, wie der untere Teil von Bild 2.15 zeigt, aus zwei Membranen, wobei die als Mechanorezeptoren fungierenden Haarzellen in der Basilar-membran sitzen und durch Relativbewegungen zur Tectorialmembran erregt werden. Die Tectorialmembran ist an der inneren Seite der Schnecke befestigt, berührt die Stereozilien der Haarzellen und hat mit ihnen relativ festen Kontakt /Birb03/. Der adäquate Reiz für Haarzellen ist die Abscherung der Zilien. Eine entsprechende Erregung führt zu Änderungen der Membranpermeabilitäten der Haarzellen, wodurch entsprechende Ionenflüsse eingeleitet werden, die Sensorpotentiale ausbilden. Von besonderer Bedeutung für die einzelnen in Bild 2.16 dargestellten Transduktionsschritte ist, dass durch Deflektion (lat. deflectere: "abbiegen") des Haarbündels die als *Tip link* bezeichnete Verbindung zwischen den hintereinanderstehenden Zilien gespannt und erst

dadurch der Ionenkanal geöffnet wird. Dies hat ferner zur Folge, dass nur eine Auslenkung in Richtung des längsten Stereozilien die Zugspannung erhöht, was wiederum bewirkt, dass Aktionspotenziale im Hörnerv nur bei der Einwärtsbewegung des Steigbügels auftreten.

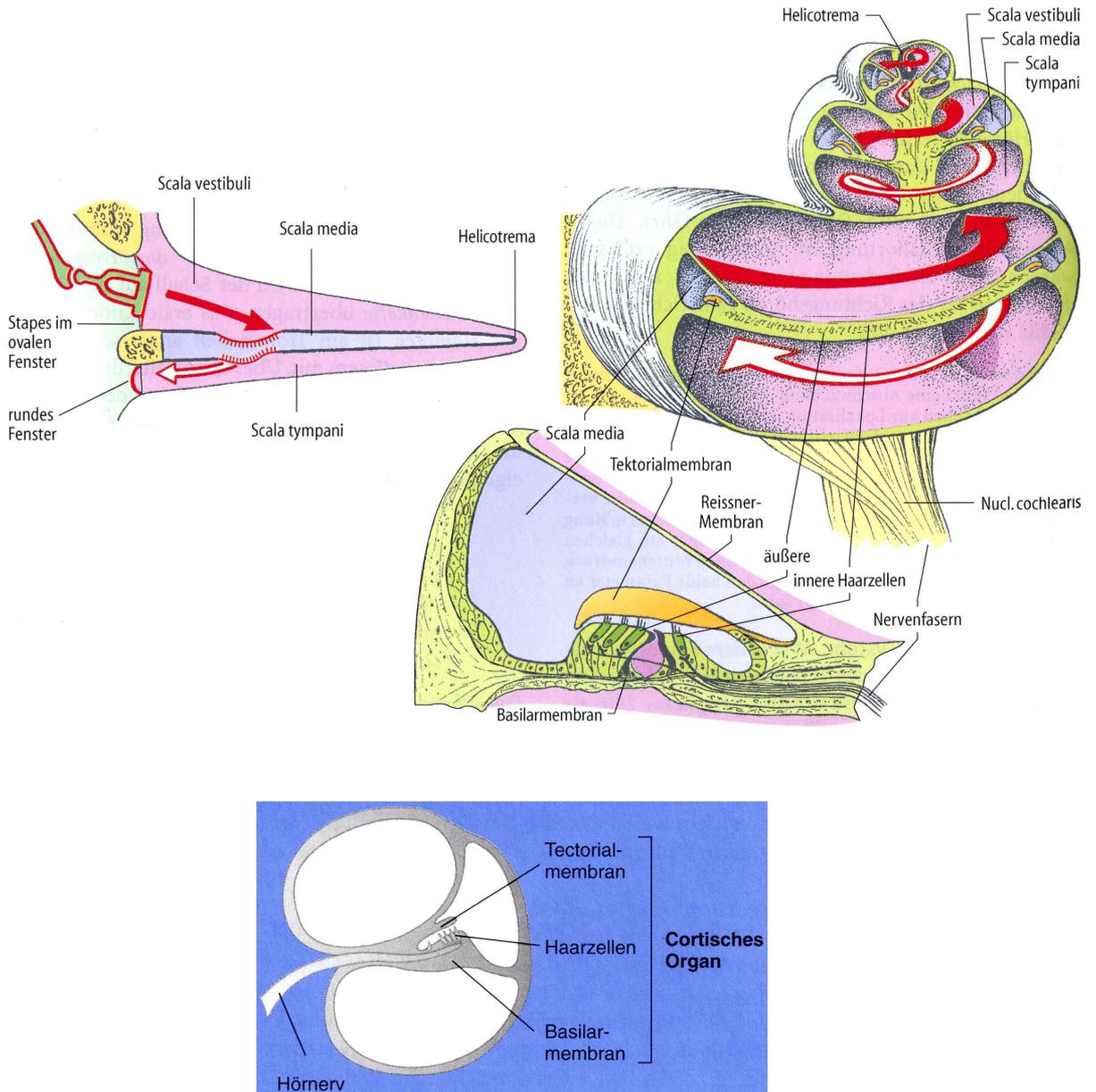


Bild 2.15: Aufbau Cochlea und Cortisches Organ nach /Birb03/ und /Pine01/

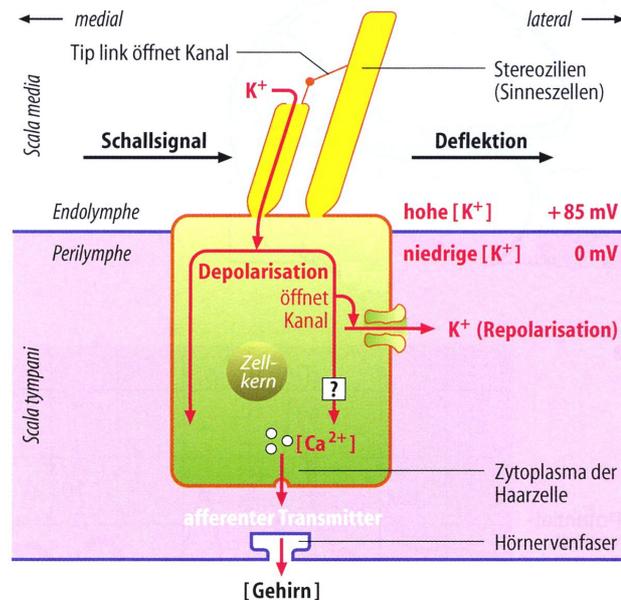


Bild 2.16: Transduktionsschritte bei Reizung der Haarzellen /Birb03/

Es existieren mit den inneren und äußeren Haarzellen zwei unterschiedliche Haarzellentypen, die sich vor allem dadurch unterscheiden, dass jede der insgesamt etwa 3500 inneren Haarzellen mit etwa 8 bis 30 Hörnervenfasern verbunden ist (Divergenz), wohingegen mehrere der etwa 12000 äußeren Haarzellen jeweils mit Verzweigungen derselben Hörnervenfasern verbunden sind (Konvergenz) /Gold02/. Zusätzlich zu den etwa 30-40000 affferenten Nervenfasern existieren im Cortischen Organ noch etwa 1800 efferente Nervenfasern, die zu 90 % mit äußeren Haarzellen in Verbindung stehen und in der Lage sind sowohl die Erregbarkeit der Zilien als auch die synaptische Übertragung auf die affferenten Nervenfasern zu modulieren /Birb03/.

Die über das ovale Fenster eingebrachten Schwingungen breiten sich in Form einer Wanderwelle über der Basilarmembran aus. Die Art der Wellenausbreitung auf der Basilarmembran ist dadurch gekennzeichnet, dass das Membranende am ovalen Fenster (Basis) drei- bis viermal schmaler ausfällt als an der Spitze der Cochlea (Apex). Zum anderen ist die Basilarmembran am ovalem Fenster etwa 100 mal steifer als am Apex /Gold02/.

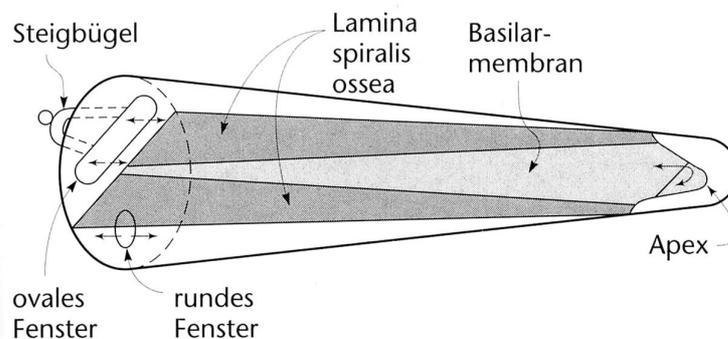


Bild 2.17: Perspektivische Darstellung der entrollten Cochlea /Gold02/

Wird, wie Bild 2.18 verdeutlicht, die Ausbreitung der Wanderwelle auf der Basilarmembran durch die Umhüllende (Amplitudenhüllkurve) dargestellt, so ergeben sich für verschiedene Frequenzen an unterschiedlichen Orten auf der Basilarmembran eng abgestimmte Maxima. Dies führt zu einer örtlichen Kodierung der Frequenz des akustischen Signals insofern, als in Abhängigkeit von der Position auf der Basilarmembran eine Haarzelle nur auf einen schmalen Frequenzbereich anspricht. Bild 2.19 zeigt hierzu die Tuningkurve einer einzelnen Haarzelle und die tonotopie Karte der Cochlea.

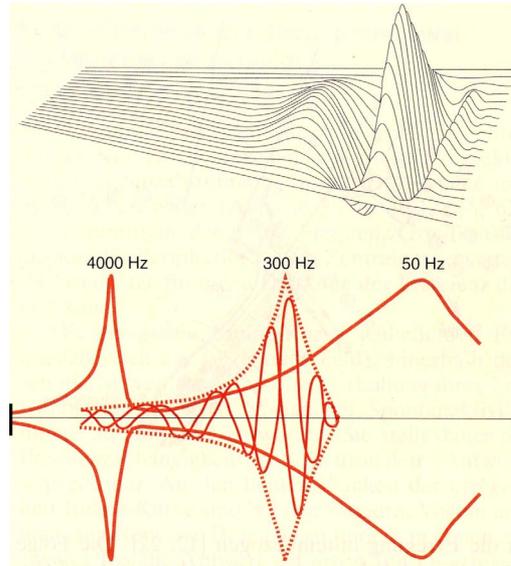


Bild 2.18: Hüllkurvenverläufe der Wanderwelle auf der Basilarmembran für drei unterschiedliche Signalfrequenzen /Dude01/

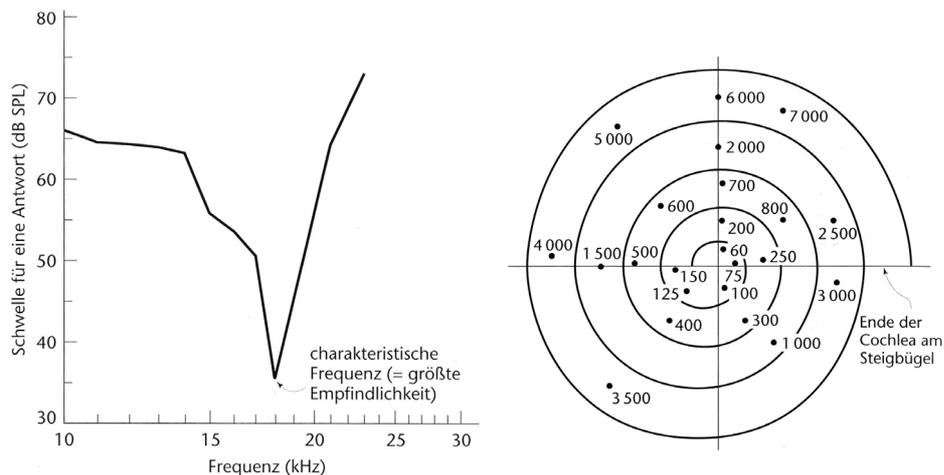


Bild 2.19: Tuningkurve einer einzelnen Haarzelle und tonotopie Karte der Cochlea /Gold02/

Für die Frequenzabbildungen längs der Basilarmembran kann die Frequenz/Orts-Transformation durch die Formel:

$$f = 165,4 \cdot (10^{0,06x} - 1)$$

angenähert werden /Dude01/, wobei x den Ort auf der Basilarmembran als Abstand in mm vom Helicotrema angibt (Bild 2.20).

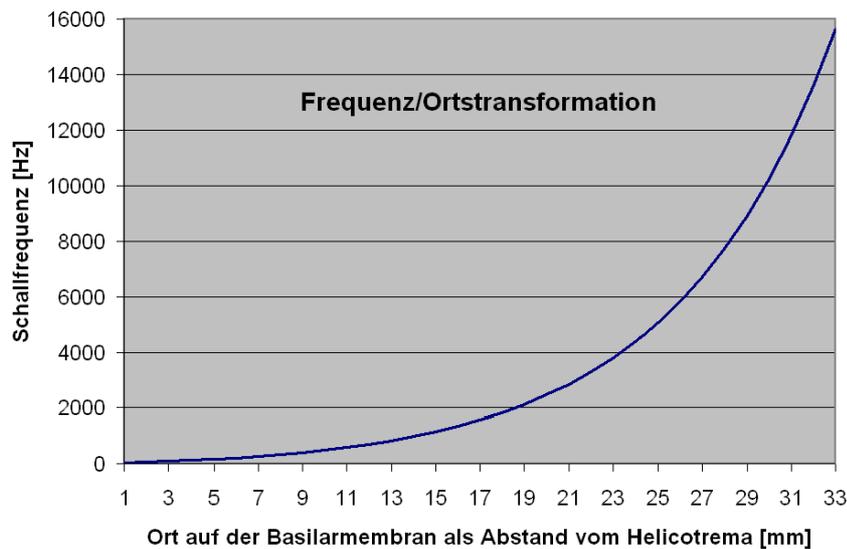


Bild 2.20: Angenährter funktionaler Zusammenhang der Frequenz/Ortstransformation auf der Basilarmembran

Auf das Auflösungsvermögen des Gehörs und die verschiedenen psychoakustischen Größen, wie z.B. die Lautheit als Maß für die empfundene Lautstärke eines Schallsignals, kann im Rahmen dieser Arbeit nicht näher eingegangen werden. Bezüglich der Ausbreitung der Wanderwelle auf der Basilarmembran sei hier jedoch angemerkt, dass die einzelnen Wellenmaxima durch den sog. cochlearen Verstärker stark hervorgehoben werden, wodurch die räumliche Abgrenzung bzw. das scharfe Tuning erst möglich wird. Der exakte Mechanismus des cochlearen Verstärkers ist noch nicht vollständig erforscht /Gall02/. Von großer Bedeutung ist jedoch das in Bild 2.21 dargestellte Zusammenwirken der inneren und äußeren Haarzellen, wobei insbesondere die extrem schnelle Kontraktionsfähigkeit der äußeren Haarzellen hervorzuheben ist, die eine aktive Verstärkung der Auslenkung der Basilarmembran bewirkt /Gold02/.

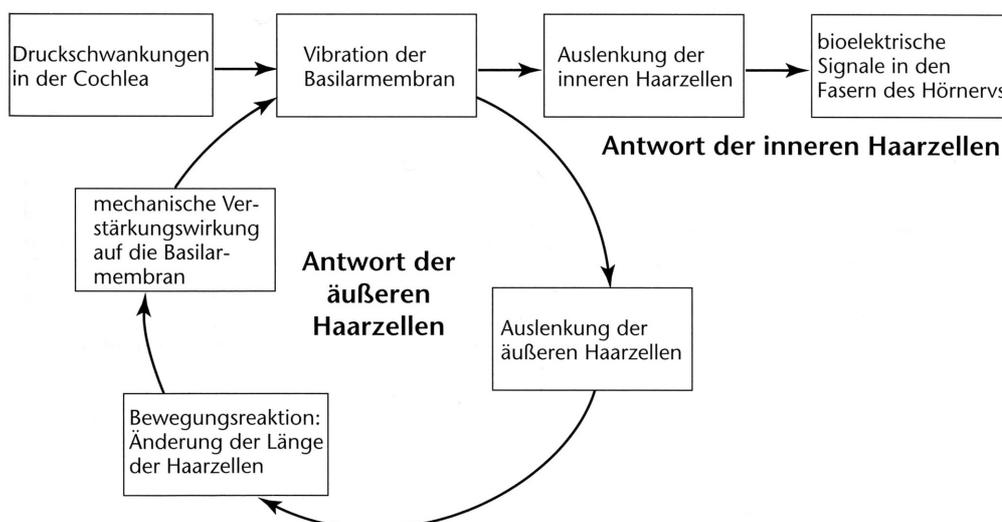


Bild 2.21: Zusammenarbeit der inneren und äußeren Haarzellen /Gold02/

Neben der örtlichen Kodierung der Signalfrequenz findet im Gehör auch zeitliche Frequenzkodierung in der Form statt, dass Neuronen synchron mit der Phase eines Schallsignals feuern (Phasenkopplung). Die Antwort der phasengekoppelten Nervenfasern müssen, wie Bild 2.22 verdeutlicht, nicht zwangsläufig bei jeder Periode des Schallsignals feuern. Sie tun dies nur im Bereich des Signalscheitelpunkts /Gold02/. Die Antwortsalven (*Burst*) einer Gruppe von Nervenfasern sind durch inaktive Intervalle getrennt. Das entstehende Entladungsmuster ist, wie die Abbildung verdeutlicht, von der Signalfrequenz abhängig. Die Pausenlängen ändern sich hierbei umgekehrt proportional zur Signalfrequenz.

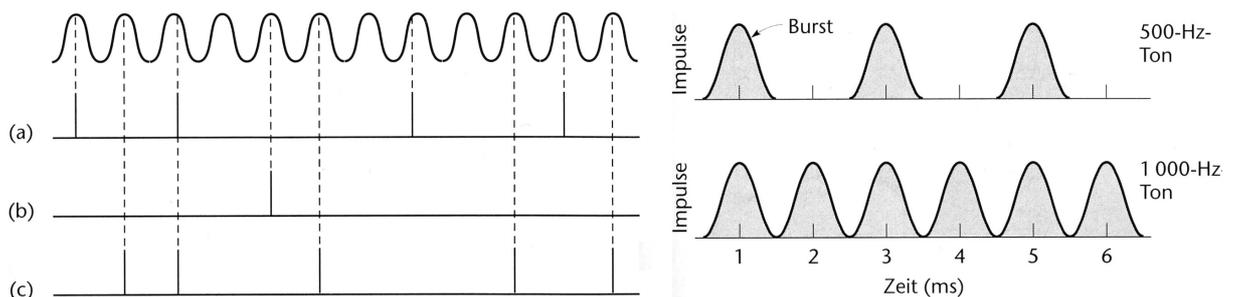


Bild 2.22: Antwort dreier phasengekoppelter Neurone (a-c) sowie das entstehende Entladungsmuster bei unterschiedlichen Signalfrequenzen /Gold02/

In Bezug auf die Wahrnehmung der Tonhöhe eines Schallsignals ist anzumerken, dass die Existenz eines zentralen Tonhöhenprozessors postuliert wird, der auf kortikaler Verarbeitungsebene das Muster der harmonischen Oberschwingungen analysiert, um daraus die wahrscheinlichste Grundfrequenz abzuleiten. Dieser Frequenz wird dann die Tonhöhe zugeordnet, auch wenn der eigentliche Grundton eigentlich gar nicht vorhanden ist (virtuelle Tonhöhe). Das Phänomen der virtuellen Tonhöhe zeigt sich z.B., wenn aus dem Klangbild der eigentliche Grundton herausgefiltert wird, oder aber über Kopfhörer zwei für jedes Ohr getrennte Sinustöne eingespielt werden, was zur Folge hat, dass der Frequenzunterschied die Tonhöhenempfindung bestimmt /Gold02/.

Zur Kodierung der Schallintensität erhöhen Hörnervenfasern innerhalb ihres spezifischen Dynamikbereiches mit steigendem Signalpegel ihre Entladungsrate. Bild 2.23 zeigt hierzu am Beispiel zweier Hörnervenfasern mit unterschiedlich großem Dynamikbereich (25 bzw. 40dB), dass oberhalb ihrer jeweiligen Schwellenwerte der Anstieg der Entladungsraten bis zum Sättigungsbereich relativ linear verläuft. Der Verlauf der Intensitätskennlinien ist, wie dem rechten Teil der Abbildung zu entnehmen ist, frequenzabhängig. Da die Antwortschwellen von Hörfasern mit gleicher oder sehr ähnlicher charakteristischer Frequenz (BF: Bestfrequenz) stark voneinander abweichen können, werden mit steigendem Schallpegel immer mehr Fasern aktiviert. Zudem gilt, dass sich bei größerem Schallpegel auch der Bereich der Auslenkung auf der Basilar-membran verbreitert /Dude01/.

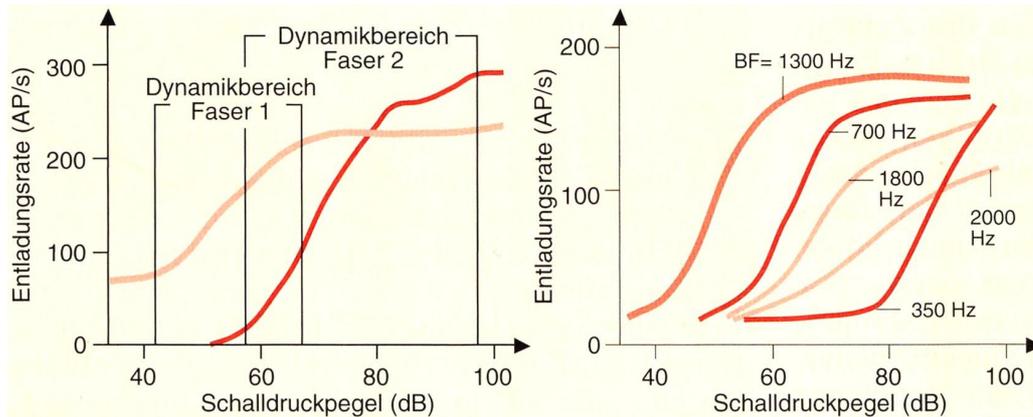


Bild 2.23: Intensitätskennlinien von Hörnervenfaser /Dude01/

Die Verbindung von der Cochlea zum primären auditorischen Kortex, der in der Tiefe der Sylvischen Furche (Fissura lateralis) liegt, besteht aus einem Netzwerk afferenter Verbindungen, von denen die wichtigsten in Bild 2.24 aufgeführt sind. Der Hörnerv führt zunächst, wie die Abbildung verdeutlicht, zu den Schneckenkernen (Nuclei cochleares), von wo aus viele Projektionen zunächst zu den oberen Olivenkernen (Nuclei olivares superior) geleitet werden bevor sie die im Mittelhirn befindlichen unteren Hügel der Vierhügelplatte (Colliculi inferiores) erreichen. Bevor die aufsteigende, afferente Hörbahn zum primären auditorischen Kortex gelangt, führen die synaptischen Kontakte zunächst zu den mittleren Kniehöckern (Corpora geniculata mediales) im Thalamus.

Wie komplex die parallele/hierarchische Verarbeitung des zentralnervösen Hörsystems tatsächlich ist, wird erst dann deutlich, wenn man bedenkt, dass nicht nur verschiedene Pfade zum auditorischen Kortex führen, die jeweils parallel verarbeitet werden, sondern die beiden Gehirnhälften auf den verschiedenen Verarbeitungsniveaus miteinander verschaltet sind. Zudem gehen von den verschiedenen Ebenen absteigende, efferente Bahnen aus, die sowohl erregend als auch hemmend auf die verschiedenen Ebenen der afferenten Hörbahn einwirken können. In Bild 2.25 sind die für Säugetiere typischen Schemata der afferenten und efferenten Hörbahnen gegenübergestellt. Die Darstellungen beschränken sich hierbei auf die Projektionen, die für das Innenohr einer Seite relevant sind. Sie zeigen, dass die Nervenfasern eines Innenohrs in den höheren Verarbeitungsstufen im Wesentlichen mit der kontralateralen Gehirnhälfte verschaltet sind. Die Abkürzungen m.F. und m.K. stehen hierbei für mehrere Felder bzw. mehrere Kerne, in die sich die verschiedenen auditorischen Zentren weiter untergliedern lassen.

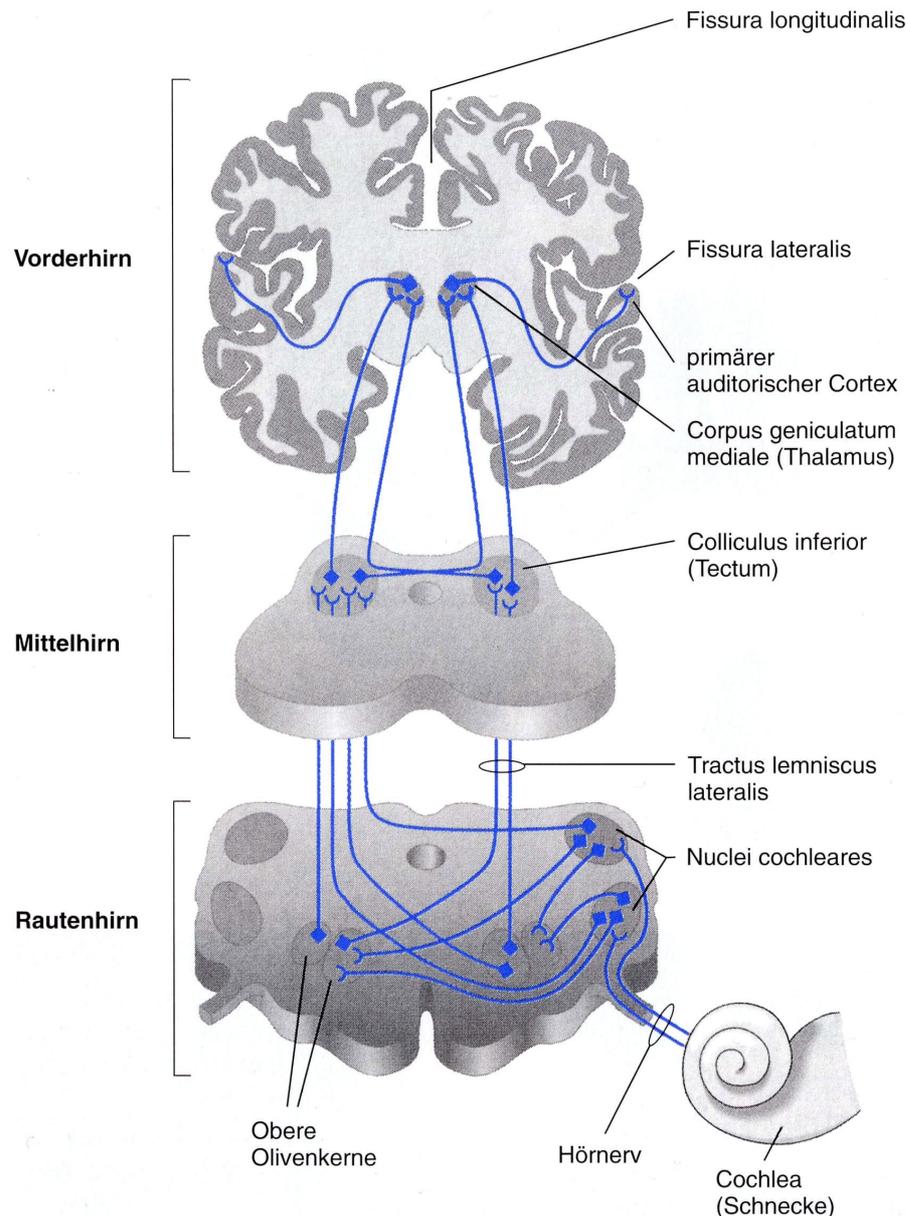


Bild 2.24: Schematische Darstellung der zentralen Hörbahn /Pine01/

Bereits auf der Verarbeitungsebene der oberen Olive werden die von den Hörnervenfasern ausgehenden Entladungsmuster binaural verarbeitet. Dies geschieht u.a. in der Weise, dass einige der Neuronen, je nachdem, ob sie im medialen oder lateralen Teil des oberen Olivenkerns liegen, spezifisch auf interaurale Zeit- oder Pegeldifferenzen reagieren /Pine01/. Zusammen bilden sie die Basis für die Lokalisation von Schallquellen im Raum (vgl. Kapitel 3). Ihre Signalantworten werden sowohl auf den Colliculus superior als auch auf den Colliculus inferior übertragen. Bild 2.26 verdeutlicht die Auswirkungen der interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen bei seitlichem Schalleinfall auf die Latenzzeitdifferenzen kontralateraler Signalantworten.

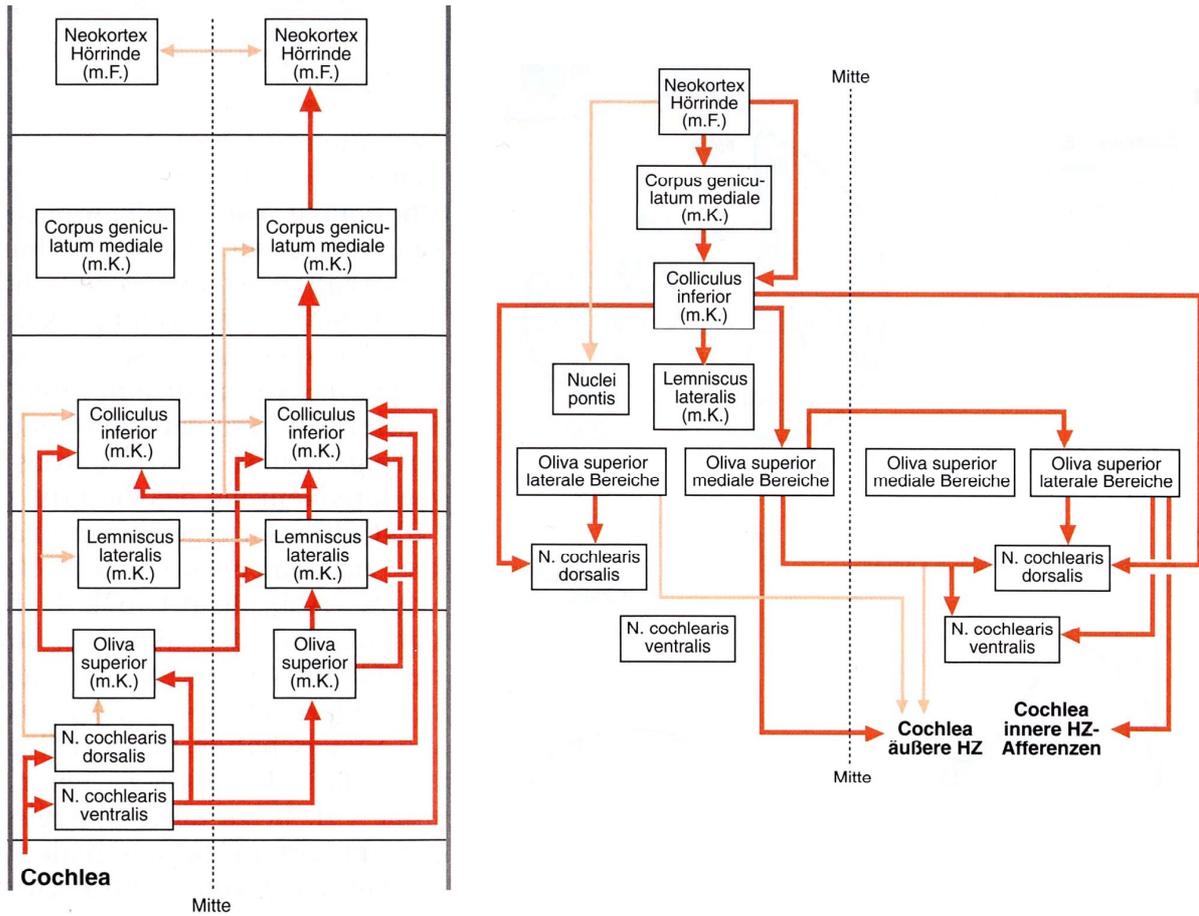


Bild 2.25: Schemata der afferenten und efferenten Hörbahnen eines Säugers /Dude01/

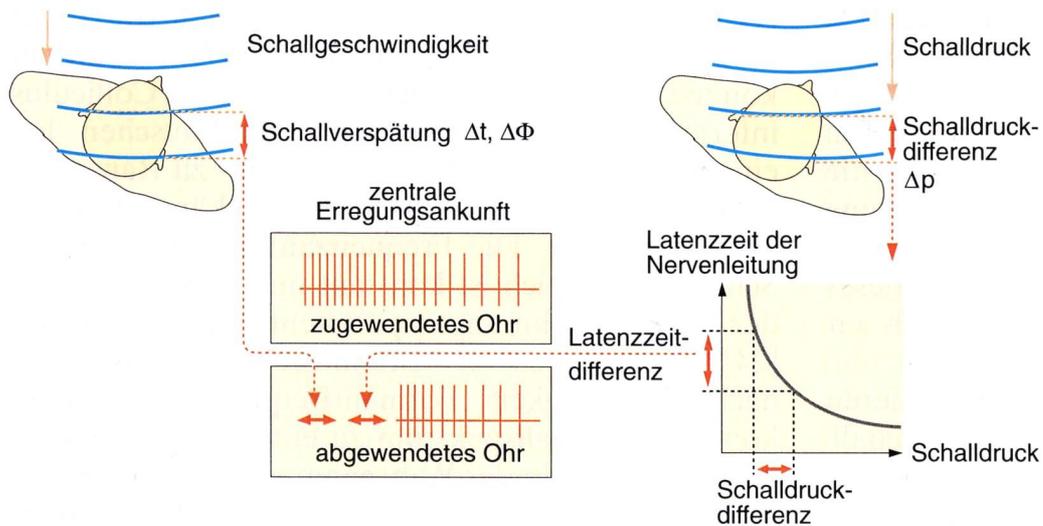


Bild 2.26: Auswirkungen interauraler Zeit- und Pegeldifferenzen auf die Latenzzeitdifferenzen kontralateraler Signalantworten /Dude01/

Der Colliculus superior erhält neben den auditiven auch visuelle und somatosensorische Eingangssignale. In seinen unteren vier Schichten existieren auf der Basis dieser multisensorischen Signale Karten bzw. Repräsentationen des Raums /Gall02/. Ein solcher Aufbau weicht jedoch von der sonst üblichen Organisationsform des Hörsystems ab. Der tonotope Aufbau der Cochlea findet sich in den verschiedenen Verarbeitungsebenen der Hörbahn bis zum auditorischen Kortex wieder. Insbesondere aufgrund von Tierversuchen konnte eine tonotope Kartierung auf der Oberfläche des primären auditorischen Kortex (A1) nachgewiesen werden. Senkrecht zu dieser Oberfläche existiert zudem eine säulenförmige Anordnung mit Neuronen der gleichen charakteristischen Frequenz /Gold02/. Die Phasenkopplung der zeitlichen Frequenzkodierung, die im Hörnerv bis zu einer Frequenz von etwa 5000 Hz vorliegt, ist in den einzelnen Stationen der Hörbahn ebenfalls vorhanden. Bis zum auditorischen Kortex verringert sich der relevante Frequenzbereich der Phasenkopplung jedoch auf Frequenzen bis 500 Hz.

Bezüglich des Antwortverhaltens auf den verschiedenen Stufen der Hörbahn ist festzustellen, dass mit wachsender Entfernung von der Cochlea die Neuronen tendenziell erst durch komplexere Schallsignale aktiviert werden /Birb03/. So führen Sinustöne z.B. nicht zu einer Reaktion, wohingegen ein frequenz- oder amplitudenmoduliertes Signal bei einigen Neuronen sehr wohl zu einer spezifischen Reizantwort führt. Es findet demnach eine Spezialisierung auf bestimmte Signalkriterien statt. Ein exakter Kriterienkatalog für die verschiedenen Ebenen ist jedoch noch nicht ausreichend erforscht.

Der auditorische Kortex besteht neben dem in Bild 2.27 dargestellten primären und sekundären Kortex (A1 und A2) aus weiteren auditorischen Regionen, die sich in erster Linie im superioren Temporallappen befinden. Hierbei ist jedoch sowohl die Anzahl als auch die Bezeichnung der Assoziationsgebiete des auditorischen Kortexes wissenschaftlich umstritten. Ferner ist die kortikale Verarbeitung akustischer Signale beim Menschen noch nicht ausreichend erforscht. Dies gilt insbesondere auch bezüglich der Schallquellenlokalisation und der auditiven Bewegungswahrnehmung, die im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit von besonderer Bedeutung ist. Eine kortikale Repräsentation des auditorischen Raums konnte bisher nicht nachgewiesen werden. Gruppen von Neuronen mit ähnlichen räumlichen Eigenschaften scheinen zwar zu existieren, sind in ihren Eigenschaften allerdings stark vom Signalpegel abhängig /Gall02/. Forschungsergebnisse belegen jedoch, dass in den Regionen des auditorischen Kortexes verschiedene Gebiete mit Neuronen existieren, die überwiegend auf bestimmte Schalleinfallrichtungen oder Schallquellenbewegungen reagieren. Bild 2.28 zeigt hierzu, dass nicht nur Neuronen existieren, die auf eine bestimmte bevorzugte Schalleinfallrichtung reagieren, die sich durch das entsprechende Rezeptorfeld darstellen lässt, sondern auch solche, die gleichzeitig auf mehrere Einfallrichtungen ansprechen, wobei sie jedoch ihr Entladungsmuster ändern.

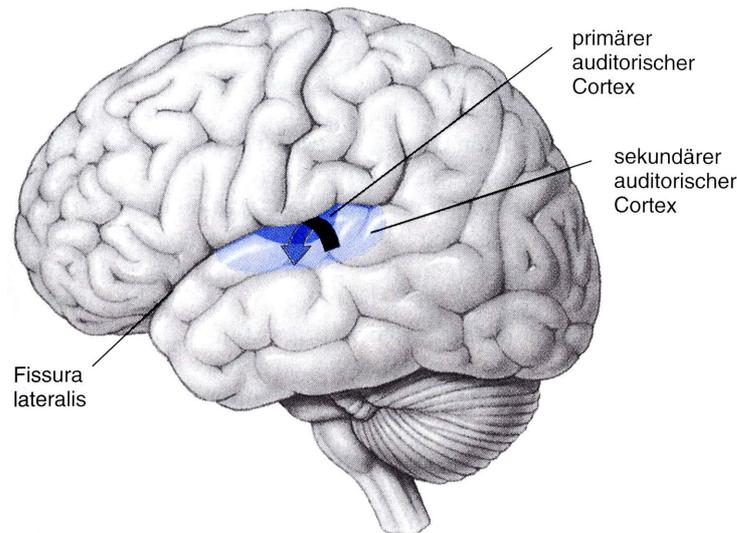


Bild 2.27: Lage der auditorischen Zentren /Pine97/

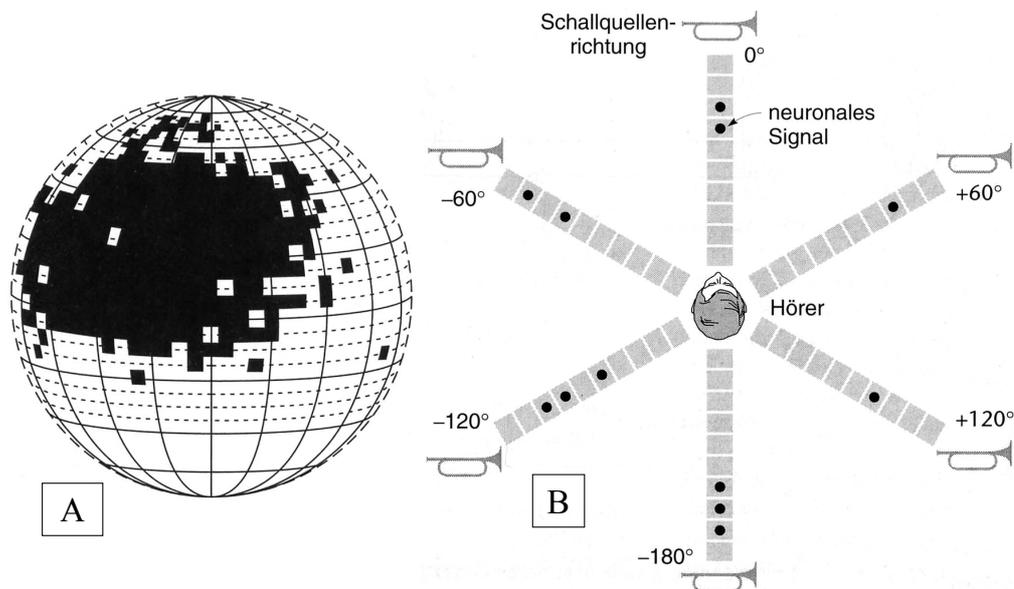


Bild 2.28: Beispiel für unterschiedliche Formen der Richtungs codierung A: Hörraumbezogenes Rezeptorfeld B: Richtungsselektives Entladungsmuster /Gold02/

Die Tatsache, dass das Rezeptorfeld der bisher identifizierten richtungsselektiven Neuronen, wie Bild 2.28 zeigt, recht groß ausfällt, bedeutet nicht, dass die hierauf basierenden Richtungsbestimmungen zwangsläufig ungenau ausfallen müssen. Wie anhand eines künstlichen neuronalen Netzwerks nachgewiesen werden konnte, ist es durch entsprechende Verschaltung mehrerer Neuronen mit ähnlich großen Rezeptorfeldern möglich, die Richtungsauflösung deutlich zu erhöhen. Ferner konnte gezeigt werden, dass die Rezeptorfelder in sich nicht homogen sind, sondern Gradienten und Schwerpunkte aufweisen, wodurch sich das Rezeptorfeld in weitere kleinere Teilbereiche untergliedern lässt. Die Bedeutung der verschiedenen Formen der Richtungskodierung ist derzeit noch nicht ausreichend geklärt. Hinzu kommt, dass auch Neuronen gefunden wurden, die nur im Nahbereich, d.h. bei entsprechend geringer Schallquellen-

entfernung, zur Lokalisation beitragen und/oder gleichermaßen auf verschiedene Sinnesmodalitäten reagieren /Gold02/.

Im Zusammenhang mit der auditiven Bewegungswahrnehmung konnten Neuronen identifiziert werden, die nur auf bestimmte Bewegungsrichtungen ansprechen. Bild 2.29 zeigt hierzu das Antwortverhalten eines Neurons, das nur auf Schallquellenbewegungen in Richtung des schwarzen Pfeils mit einer erhöhten Entladungsrate reagiert. Mit Hilfe der Magnetresonanztomographie lässt sich nachweisen, dass in der rechten Gehirnhälfte (Hemisphäre) ein Bereich im nichtprimären auditorischen Kortex existiert, der durch Schallquellenbewegungen verstärkt aktiviert wird. Es existieren aber auch Bereiche außerhalb des auditorischen Kortexes, wo Objektbewegungen polymodal verarbeitet werden /Gold02/.

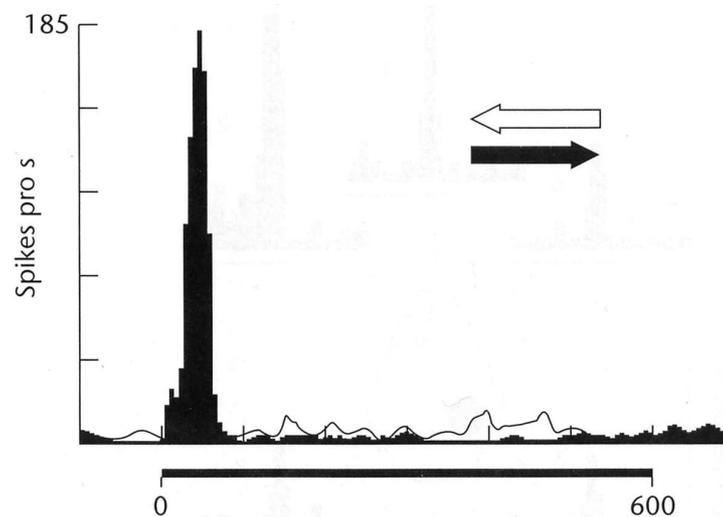


Bild 2.29: Richtungsselektive Entladungsrate eines auf Schallquellenbewegung empfindlich reagierenden Neurons /Gold02/

Die akustische Mustererkennung von Kommunikationslauten ist für die Spracherkennung von elementarer Bedeutung. Sie wird in erster Linie dem sekundären auditorischen Kortex (AII) zugeordnet /Birb03/. Das Speichern, Erinnern und Einordnen von Wörtern in einen Kommunikationskontext ist jedoch erst unter Beteiligung höherer Stufen der kortikalen Verarbeitung im Bereich der auditorischen Vorderhirnzentren möglich /Pine01/. Das auch als Wernicke-Areal bezeichnete Brodmannareal 22 wird klassischerweise als das Zentrum der Sprachverarbeitung angesehen, obwohl auch angrenzende Gebiete (perisylvische Region) hieran beteiligt sind /Gall02/. Bei den meisten Menschen sind die Sprachfunktionen stärker auf die linke Hemisphäre konzentriert.

3 Räumliche Wahrnehmung

3.1 Räumliches Sehen

Obwohl die dreidimensionale Umwelt auf der Retina nur zweidimensional abbildet wird, ist der Mensch, wie viele andere Lebewesen auch, dazu in der Lage, räumlich zu sehen. Der Wahrnehmung von räumlicher Tiefe und Größe liegen Prozesse zugrunde, die diejenigen Informationen aus den zweidimensionalen Abbildungen auswerten, die Rückschlüsse auf die räumliche Anordnung des Gesehenen zulassen. Hierbei müssen insbesondere auch Mehrdeutigkeiten der zweidimensionalen Projektion auf der Netzhaut aufgelöst werden. Bild 3.1 zeigt in diesem Zusammenhang, dass die beiden Objekte A und B sowie die Konturen auf einer Glasplatte P zu ein und demselben Netzhautbild führen.

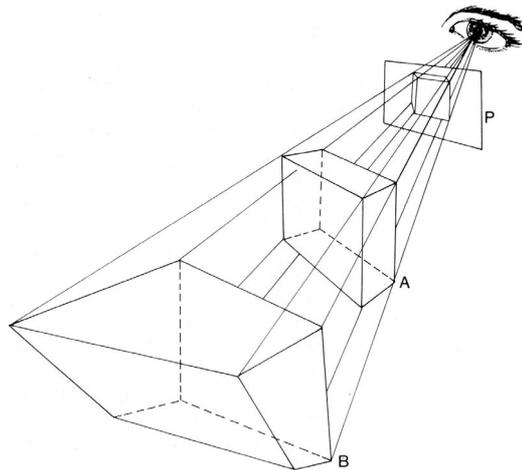


Bild 3.1: Mehrdeutigkeiten im Netzhautbild /Camp93/

Für das räumliche Sehen existieren mit der Theorie der mehrfachen Tiefenkriterien und dem wahrnehmungsökologischen Ansatz zwei bedeutende Erklärungsansätze. Die einzelnen Kriterien bzw. Teilfaktoren, die diesen beiden Ansätzen zugeordnet werden, sind in Bild 3.2 zusammengefasst.

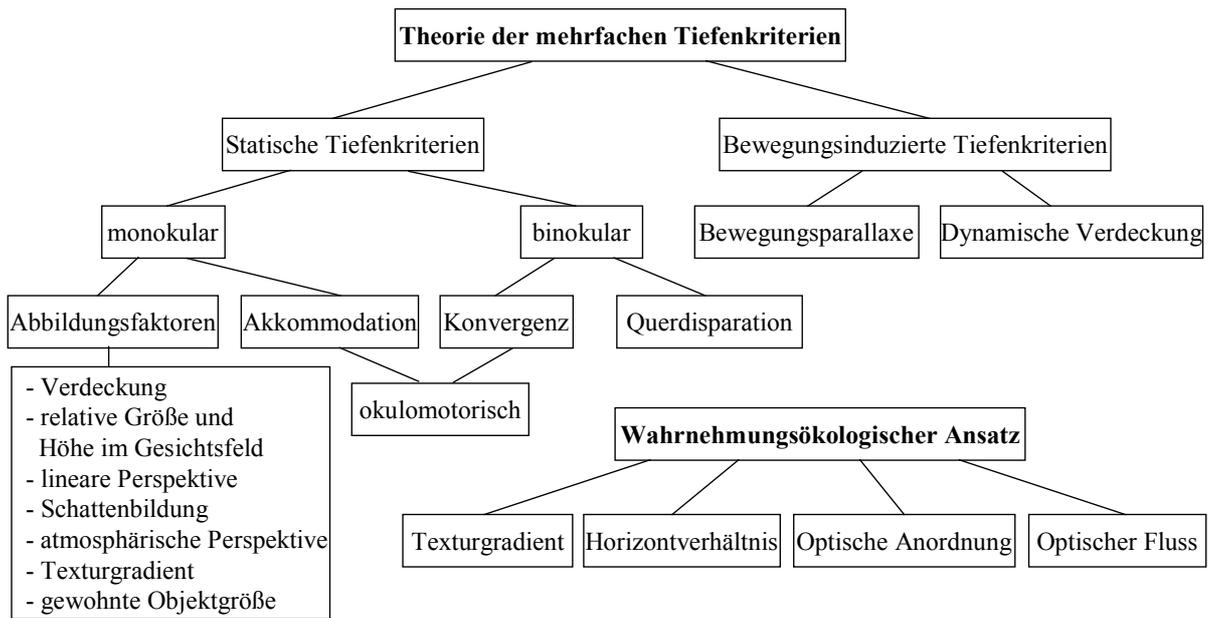


Bild 3.2: Übersicht zur Theorie der mehrfachen Tiefenkriterien und dem wahrnehmungsökologischen Ansatz

3.2 Theorie der mehrfachen Tiefenkriterien

Die Theorie der mehrfachen Tiefenkriterien geht davon aus, dass prinzipiell alle Informationen, die in den Netzhautabbildungen über die räumliche Tiefe enthalten sind, dazu beitragen, eine dreidimensionale Vorstellung des Gesehenen zu entwickeln. Die einzelnen Tiefenkriterien lassen sich, wie Bild 3.2 zeigt, zunächst danach unterscheiden, ob sie nur bei Eigen- und Fremdbewegungen auftreten (bewegungsinduzierte Tiefenkriterien) oder auch dann vorhanden sind, wenn die optischen Informationen statisch sind (statische Tiefenkriterien). Bei den statischen Tiefenkriterien wird danach unterschieden, ob diese sich bereits monokular ergeben oder davon abhängig sind, dass die räumliche Szene binokular betrachtet wird.

Die okulomotorischen Tiefenkriterien Konvergenz und Akkommodation stützen sich auf die Rückmeldung der für die Augenbewegung und Linsenverformung zuständigen Muskeln und Sehnen über die jeweilige Augenstellung und Linsenkrümmung. Diese Kriterien greifen jedoch nur, wenn Objekte in einem Entfernungsbereich fokussiert werden, der kleiner als anderthalb bis drei Meter ist, da ansonsten der Winkel zwischen den beiden Blicklinien der Augen (Konvergenzwinkel) und die Linsenverdickungen zu vernachlässigen sind /Zimb99/. Die Akkommodation entspricht der Fähigkeit des Auges, die Brechkraft der Linse so an die Entfernung des fixierten Reizes anzupassen, dass auf der Netzhaut ein scharfes Bild entsteht. Auf die Akkommodation und die möglichen Ursachen für die Einschränkung der Akkommodationsbreite wird im Zusammenhang mit dem durchgeführten Sehtest näher eingegangen.

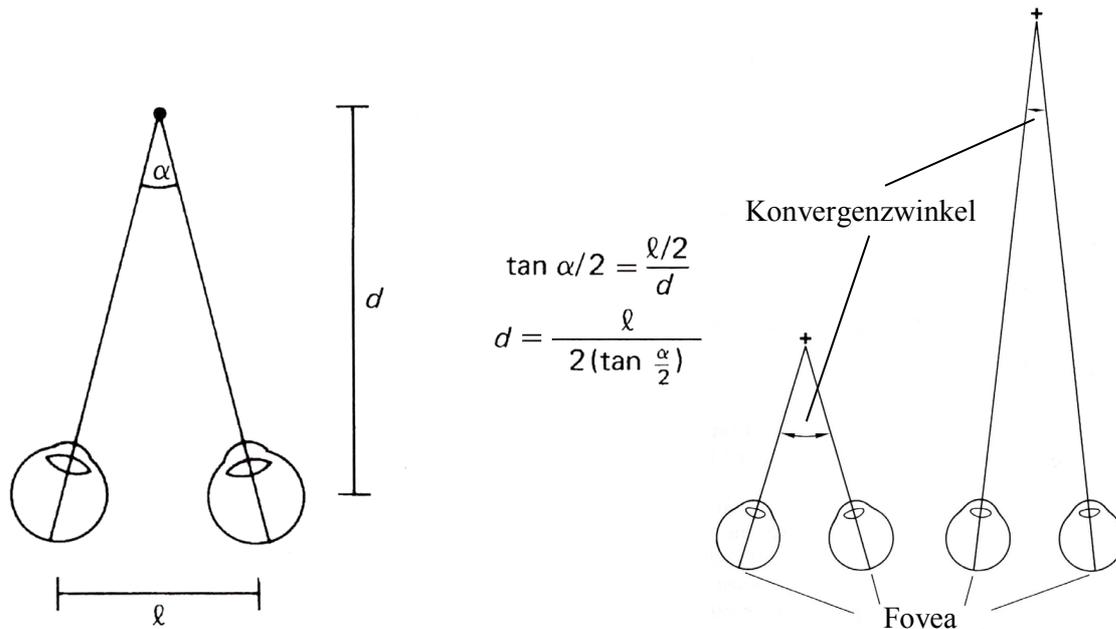


Bild 3.3: Konvergenzwinkel bei verschiedenen Entfernungen zum Fixationspunkt und deren Berechnung /Zimb99/Levi01/

Die Bilder 3.3 und 3.4 verdeutlichen den Zusammenhang zwischen Konvergenzwinkel und Objektentfernung, wobei der Kurvenverlauf der zweiten Grafik deutlich davon geprägt ist, dass sich der Konvergenzwinkel nur im Nahbereich stark mit der Entfernung zum Fixationspunkt ändert. Untersuchungen haben ergeben, dass selbst in diesem Nahbereich die okulomotorischen Tiefenkriterien keine ausreichende Basis für das Entfernungssehen darstellen. Im Allgemeinen weichen die geschätzten Entfernungen deutlich von der objektiven Entfernung ab, und sind zudem, wie Bild 3.5 zeigt, von der retinalen Abbildungsgröße abhängig.

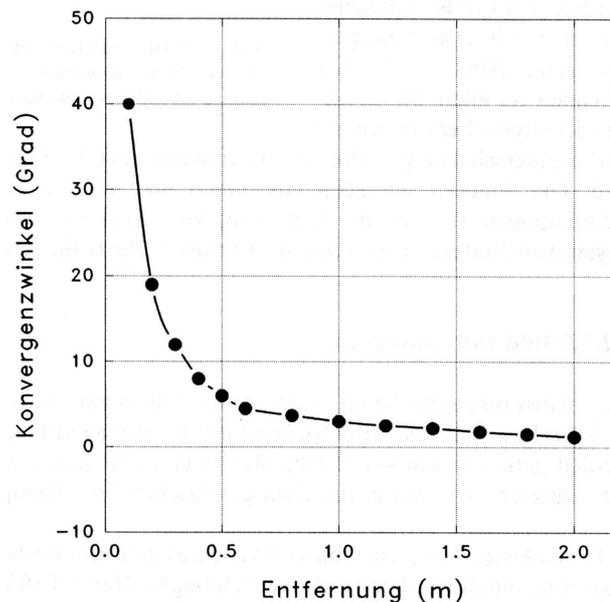


Bild 3.4: Konvergenzwinkel in Abhängigkeit von der Entfernung des Fixationspunktes /Gusk96/

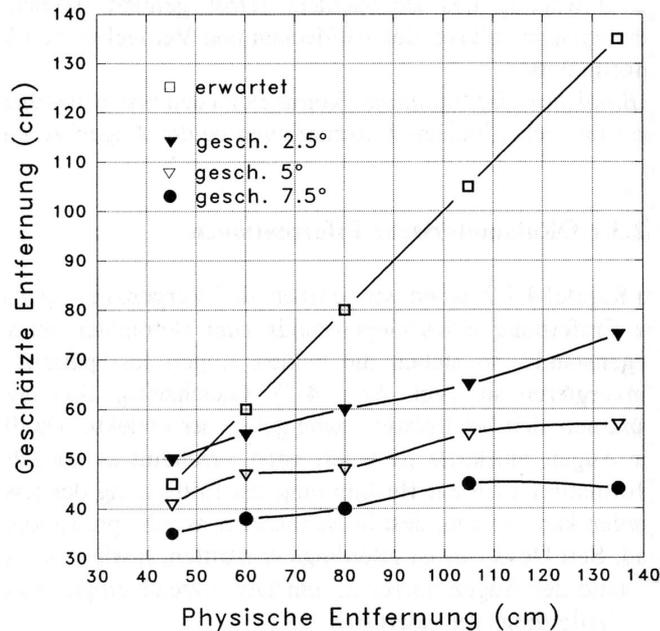


Bild 3.5: Mittlere Entfernungseinschätzung auf der Basis okulomotorischer Informationen in Abhängigkeit von der physischen Entfernung und der retinalen Abbildungsgröße /Gusk96/

Zu den monokularen Tiefenkriterien zählen neben der Akkommodation vor allem die als Abbildungsfaktoren bzw. Bild-Informationen bezeichneten Faktoren. Hierzu zählen im Wesentlichen:

- Verdeckung
- relative Größe und Höhe im Gesichtsfeld
- Helligkeit
- gewohnte Größe von Objekten
- atmosphärische und lineare Perspektive
- Licht und Schatten
- Texturgradient

Verdeckte Objekte erscheinen im Vergleich zu denen die sie verdecken, als weiter entfernt. Die Wirksamkeit dieses Tiefenkriteriums zeigt sich vor allem dann, wenn es, wie Bild 3.6 verdeutlicht, durch eine künstlich erzeugte Verdeckung, in diesem Fall durch entsprechendes Zuschneiden der beiden vorderen Karten, zu einer Fehlinterpretierung der realen Tiefenstaffelung kommt. Diese falsche Entfernungszuordnung impliziert, dass die Objektgrößen, wie der rechte Teil der Abbildung zeigt, falsch wahrgenommen werden. Die Karte mit der am größten wahrgenommenen Entfernung scheint am größten zu sein, obwohl eigentlich alle Karten gleich groß sind.

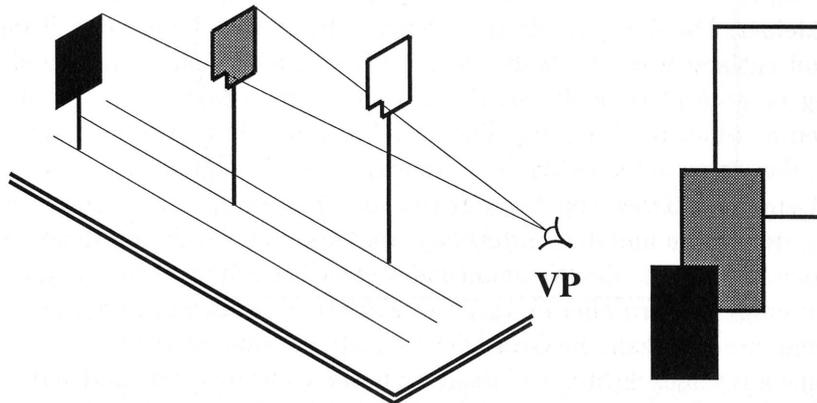


Bild 3.6: Karten-Demonstration von Ames /Luka96/

Dass die Größenwahrnehmung proportional zur Tiefenwahrnehmung verläuft, zeigt sich im umgekehrten Fall darin, dass auch die Objektgröße die wahrgenommene Entfernung beeinflusst. Relativ große Objekte suggerieren eine geringe Entfernung. So scheinen etwa für die Mehrzahl der Betrachter zwei gleich weit entfernte, aber unterschiedlich stark aufgeblasene Luftballons bei monokularer Betrachtung unterschiedlich weit entfernt zu sein. Dieser Effekt verstärkt sich insbesondere bei einer kontinuierlichen Größenänderung, die (monokular) eine Scheinbewegung hervorruft. Einen ähnlichen Einfluss auf die Entfernungswahrnehmung hat die Helligkeit. Von zwei gleich großen und gleich weit entfernten, in einem dunklen Raum dargebotenen Lichtpunkten wird der hellere als näher wahrgenommen. Dass es sich bei der Objektgröße im Vergleich zur Objekthelligkeit jedoch um das dominantere Tiefenkriterium handelt, zeigt sich daran, dass bei monokularer Betrachtung die wahrgenommene Entfernung auch dann fast ausschließlich von der Größe der Objekte abhängig ist, wenn die dynamische Größenänderung von einer gegenläufigen Variation der Helligkeit begleitet wird /Luka96/.

Die Kenntnis bzw. Annahme der tatsächlichen physikalischen Größe von Objekten hat ebenfalls einen Einfluss auf die Einschätzung der relativen Entfernung. Vertrauten Objekten (Buch, Auto, Haus usw.) werden die normalerweise üblichen Abmessungen zugesprochen. Dies führt unter der Voraussetzung, dass keine weiteren Tiefeninformationen vorliegen, dazu, dass etwa gleich großen Abbildungen von normalerweise unterschiedlich großen Objekten, intuitiv unterschiedliche Objektentfernungen zugeordnet werden (Bild 3.7).



Bild 3.7: Größenordnung vertrauter Objekte als Faktor der Tiefenwahrnehmung

Neben der relativen Größe im Gesichtsfeld, die bei geringen Objektentfernungen zunimmt, übt auch die relative Höhe im Gesichtsfeld einen Einfluss auf die Tiefenwahrnehmung aus. Ein Objekt, das im Gesichtsfeld tiefer angeordnet ist als ein zweites, erscheint, vorausgesetzt dass beide Objekte unterhalb des Horizonts liegen, eine geringere Entfernung zum Betrachter zu haben. Oberhalb des Horizonts kehrt sich die Gesetzmäßigkeit, wie Bild 3.8 zeigt, um. Diese Gesetzmäßigkeit gilt jedoch nur für Objekte, die sich auf der gleichen Ebene befinden, da in perspektivischer Darstellung jede Flächenneigung zu einem anderen Horizont führt (Bild 3.9).

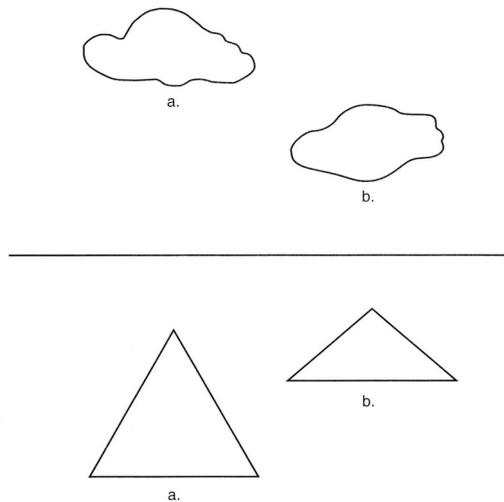


Bild 3.8: Einfluss der relativen Höhe im Gesichtsfeld auf die Tiefenwahrnehmung /Matl97/

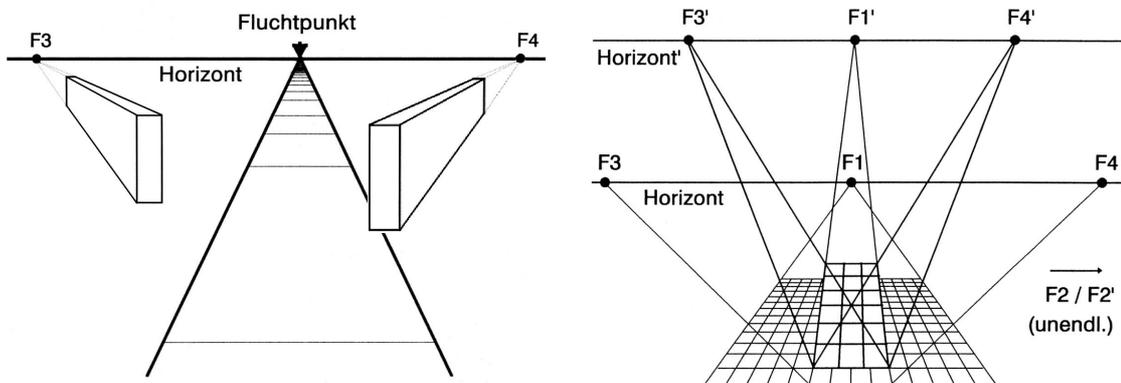


Bild 3.9: Horizontlinien und deren Abhängigkeit vom Betrachterstandpunkt und Flächenneigung nach /Gusk96/

Die lineare Perspektive ist definiert als Gesetzmäßigkeit der räumlichen Wahrnehmung /Dors98/. Sie beschreibt wie dreidimensionale Objekte auf einer zweidimensionalen Projektionsfläche abgebildet werden. Mit zunehmender Entfernung vom Betrachter erscheinen gleich große Objekte verkürzt, parallele Linien scheinen in einem Punkt in der Ferne zusammenzulaufen usw. Der Fluchtpunkt, bei dem die parallelen Linien zwar physikalisch ihren Abstand beibehalten, sie für den Betrachter jedoch einen so kleinen Sehwinkel einnehmen, dass sie (im Unendlichen) nicht mehr voneinander zu unter-

scheiden sind, liegt, wie aus Bild 3.9 hervorgeht, auf der Horizontlinie. Die Höhe der Horizontlinie ist neben der Flächenneigung auch vom Betrachterstandpunkt abhängig und verhält sich zu diesem insofern umgekehrt proportional, als sich mit zunehmender Höhe des Betrachterstandpunktes die Horizontallinie nach unten verlagert und umgekehrt.

Die Bedeutung der linearen Perspektive für die Tiefenwahrnehmung verdeutlicht Bild 3.10 anhand dreier gleich großer Figuren, die unter dem Einfluss einer durch einzelne Linien angedeuteten linearen Perspektive verschieden groß wirken. In der rechten Bildhälfte sind zum direkten Vergleich die entsprechenden Figuren lösgelöst von der perspektivischen Darstellung abgebildet.

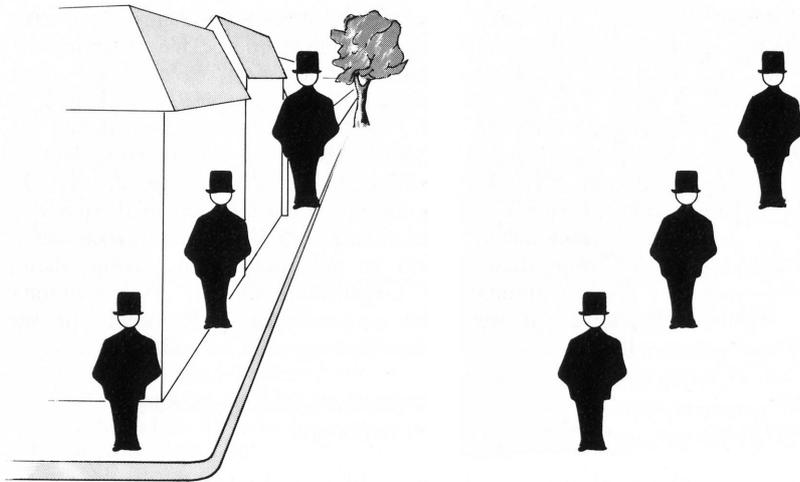


Bild 3.10: Durch einzelnen Linien angedeutete lineare Perspektive und ihr Einfluss auf die Größenvahrnehmung /Camp93/

Die Tatsache, dass Objekte mit wachsender Entfernung aufgrund der sich in der Luft befindlichen Partikel zunehmend unscharf, verzerrt und bläulich auf der Netzhaut abgebildet werden, wird unter dem Begriff "atmosphärische Perspektive" zusammengefasst - ein Tiefenkriterium, das sich in der Regel erst bei relativ großen Objektentfernungen auswirkt, jedoch je nach Zustand bzw. Beschaffenheit der Atmosphäre, etwa bei hoher Staub- und Rauchbelastung, auch für geringe Entfernungen von Bedeutung sein kann.

Bei der Schattenbildung ist danach zu unterscheiden, ob ein Objekt einen Schatten auf andere Objektflächen wirft (Schlagschatten) oder von sich aus Hell-Dunkel-Schatten aufweist. Neben der Form des beleuchteten Objekts und der relativen Lage zur Fläche, auf der ein Schlagschatten entsteht, bestimmt die Einfallrichtung, Entfernung und Streuung der Lichtquelle die Schlagschattenausprägung. Die Richtung der Lichtquelle kann hier von Fall zu Fall variieren. Beim Hell-Dunkel-Schatten geht der Betrachter dagegen evolutionsbedingt zunächst davon aus, dass das Objekt von oben beleuchtet wird. Beide Schattenarten liefern aufgrund ihrer Lage und Form eine verwertbare Tiefeninformation. Wie sehr die Interpretation der Hell-Dunkel-Schatten von der an-

genommenen Beleuchtungsrichtung bestimmt wird, verdeutlicht Bild 3.11 durch den Vergleich zweier identischer Abbildungen, die lediglich um 180° gegeneinander verdreht sind. Da keine weiteren Anhaltspunkte bezüglich der tatsächlichen Beleuchtungssituation vorliegen, wird in beiden Fällen davon ausgegangen, dass ein von oben einfallendes Licht die Hell-Dunkel-Schatten erzeugt.

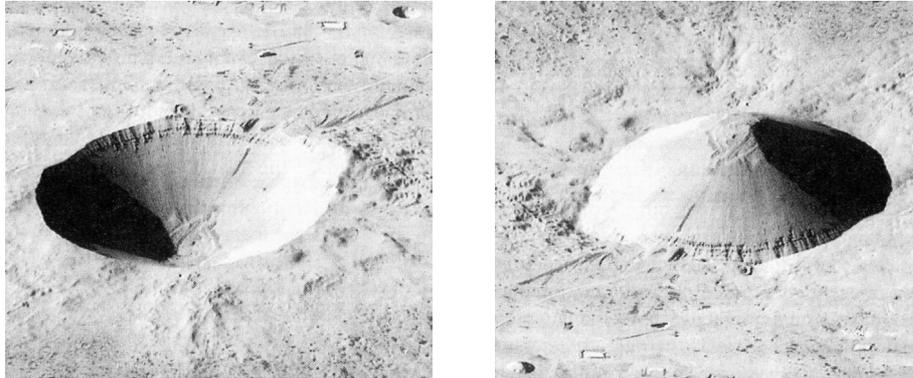


Bild 3.11: Eine durch 180° Drehung verursachte gegenteilige Interpretation der Hell-Dunkel-Schatten /Levi01/

Oberflächen sind für gewöhnlich insofern strukturiert, als ihre sichtbaren Elemente (Textur) mehr oder weniger regelmäßig angeordnet sind. Die Anordnung der Oberflächenelemente folgt dabei den Regeln der linearen Perspektive. So erscheinen die Elemente einer Oberfläche, die in einer Szene ungefähr gleich weit voneinander entfernt sind, mit zunehmendem Abstand als immer dichter gedrängt (Bild 3.12).



Bild 3.12: Texturgradient aus Sandwellen /Gold97/

Der Texturgradient entspricht formal der ersten Ableitung, z.B. der horizontalen Ausdehnung nach der Distanz /Dors98/, und liefert dem Betrachter Informationen über die räumliche Tiefe einer Szene. Sprünge bzw. starke Veränderungen des Texturgradienten deuten, wie Bild 3.13 zeigt, auf angrenzende Ebenen verschiedener Höhe oder Steigungen bzw. auf stark gekrümmte Ebenen hin.

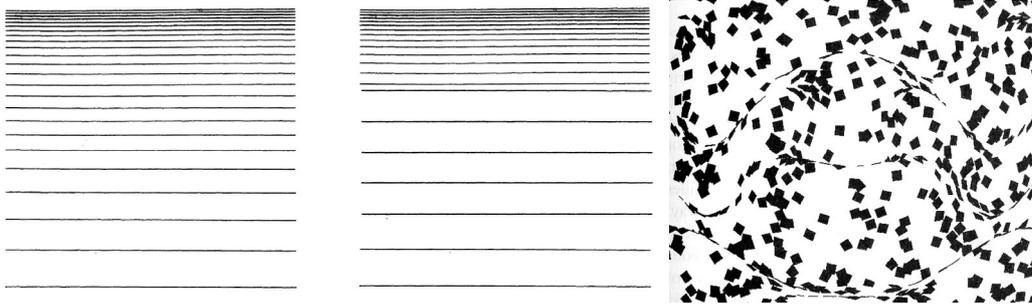


Bild 3.13: Beispiele nichtkonstanter Texturgradienten /Levi01/

Neben der Rückmeldung über die Stellung der beiden Augen zueinander (Konvergenz), ergibt sich aus den horizontalen Abweichungen der beiden Netzhautbilder des rechten und linken Auges ein bedeutendes binokulares Tiefenkriterium, das als Querdisparation bezeichnet wird. Auf das stereoskopische Sehen und die Überprüfung der Stereopsis wird ebenfalls im Zusammenhang mit dem durchgeführten Sehtest eingegangen (vgl. Kapitel 6).

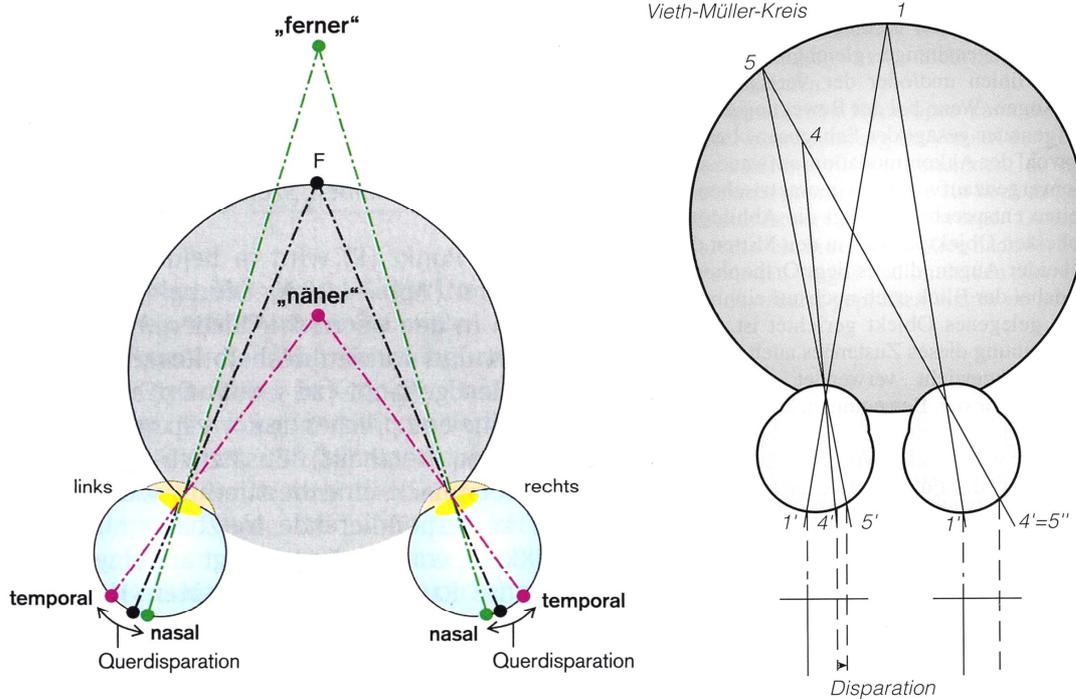


Bild 3.14: Horizontalschnitt durch den geometrischen Horopter /Klin99/Meth96/

Alle Punkte, die bei beidäugigem Sehen und einer unveränderten Augenstellung zu einem einheitlichen visuellen Eindruck führen, da sie auf korrespondierenden Netzhautpunkten abgebildet werden, liegen auf dem sog. Horopter. Wie Bild 3.14 zeigt, hat der Durchmesser des geometrischen Horopters, der auch als Vieth-Müller-Kreis bezeichnet wird, eine Länge, die der Entfernung des Fixationspunkts (Punkt 1 bzw. F) vom optischen Mittelpunkt beider Augen entspricht. Je nachdem, ob Objekte vor oder hinter dem Horopter liegen, führt dies zu sog. gekreuzten oder nicht gekreuzten Querdisparationen. Bei Objekten in Frontalrichtung, die nicht auf dem Horopter liegen,

ergeben sich spiegelsymmetrische, nicht korrespondierende (disparate) Netzhautpunkte, die je nachdem, ob das Objekt hinter oder vor dem Fixationspunkt liegt, zur Nase (nasal) oder zu den Schläfen hin (temporal) verschoben sind. Außerhalb der Frontalrichtung sind die Netzhautpunkte nicht symmetrisch verschoben. Die Summe der Einzeldisparationen beider Augen entspricht dem Effektivwert der Querdisparation, wobei nasal gerichtete im Unterschied zu den temporal gerichteten Disparationen mit einem negativen Vorzeichen behaftet sind /Meth96/.

Die Querdisparation lässt sich, wie Bild 3.15 verdeutlicht, aus der stereoskopischen Parallaxe herleiten. Sie entspricht, gemäß DIN5340, dem Abstand zwischen den auf einen Objektpunkt gerichteten Knotenpunktstrahlen beider Augen, gemessen in einer frontparallelen Ebene mit anderer Entfernung. Bei (separater) Darbietung stereoskopischer Bildpaare wird die stereoskopische Parallaxe in der Ebene der Bildpaare gemessen. Der rechte Teil der Darstellung verdeutlicht letzteren Zusammenhang: Wenn zwei horizontal versetzte (querdisparate) Testobjekte T_1 und T_2 in einer frontparallelen Ebene so abgebildet werden, dass sie jeweils nur für ein Auge sichtbar sind, wird nur ein Objekt, T_{12} , wahrgenommen, welches vor der Bildebene zu liegen scheint. Würden die beiden Testobjekte hierbei nicht über Kreuz dargeboten, sondern so abgebildet, dass T_2 für das rechte und T_1 für das linke Auge sichtbar wäre, so ergäbe sich im Vergleich zur Bildebene eine um die Stereo-Tiefenunterscheidungsstrecke Δa vergrößerte Entfernung. Hierbei gilt im Allgemeinen folgende Bestimmungsformel, bei der für den Fall nichtgekreuzter Querdisparation im Nenner nicht die Summe, sondern die Differenz aus Pupillenabstand und stereoskopischer Parallaxe zu bilden ist:

$$\Delta a = \frac{y_p a}{p \pm y_p}$$

Neben der Abhängigkeit der Stereo-Tiefenunterscheidungsstrecke von der stereoskopischen Parallaxe, ergibt sich aus der obigen Darstellung auch der Zusammenhang zwischen der stereoskopischen Parallaxe und dem Stereowinkel. Der Stereowinkel entspricht im linken Teil der Darstellung dem Knotenpunktswinkel, unter dem die stereoskopische Parallaxe erscheint, wohingegen im rechten Teil der Abbildung definitionsgemäß (DIN5340) der stereoskopische Winkel dem Schwinkel entspricht, unter dem die stereoskopische Parallaxe von einem hypothetischen Mittelaugen (Zyklopaugen) aus erscheint.

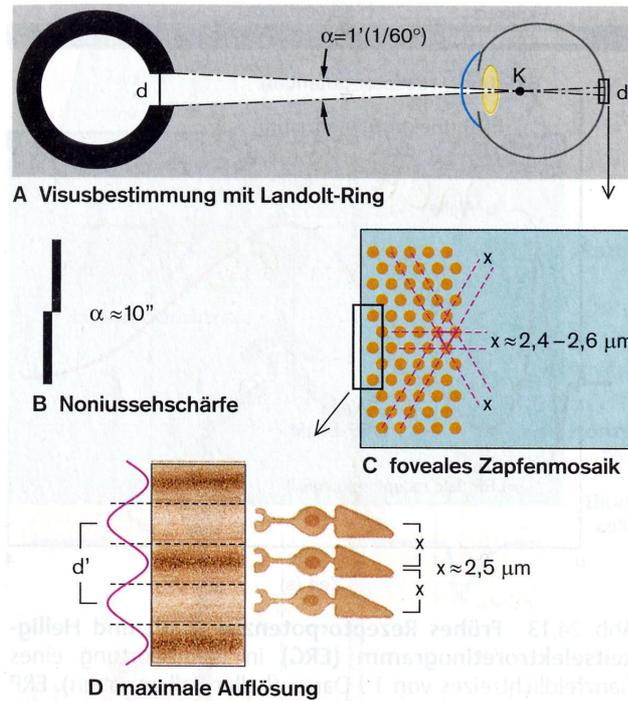


Bild 3.16: Herleitung der normalen Sehschärfe (Visus=1) aus dem mittleren Zapfenreihenabstand x in der Fovea /Klin01/

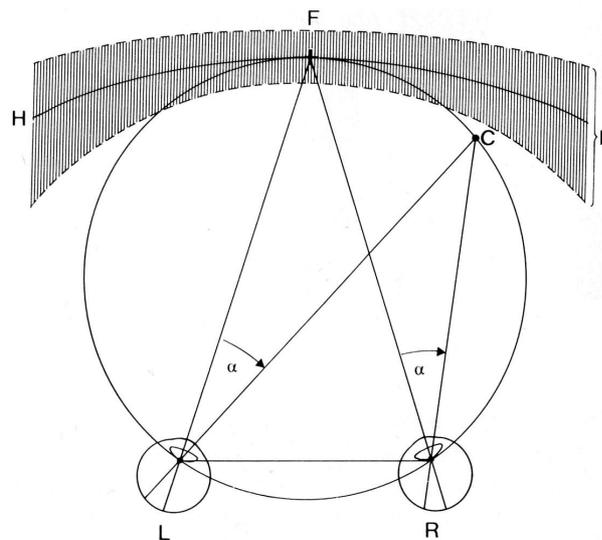


Bild 3.17: Empirischer Horopter H mit Tiefenbereich E im Vergleich zum Vieth-Müller-Kreis /Camp93/

Wie Bild 3.17 zeigt, sind die möglichen geometrischen Orte, bei denen keine Doppelbilder entstehen, nicht nur auf den empirischen Horopter beschränkt, sondern um das sog. "Panum-Areal" erweitert. Der zentrale Mechanismus, der dafür sorgt, dass trotz relativ großer Querdisparationen (mit einem Stereowinkel) von bis zu 16 Winkelminuten ein einheitlicher Sinneseindruck entsteht, wird als binokulare Fusion bezeichnet /Klin01/. Die binokulare Fusion bleibt innerhalb des Tiefenbereichs erhalten. Abweichungen vom Horopter führen zu einem Tiefeneindruck. Das Fusionsareal ist im Bereich der Fovea am kleinsten und nimmt zur Netzhautperipherie hin zu. In der

Literatur weichen die Angaben über die Ausdehnung des Panum-Areals voneinander ab, was sich aus den individuellen Unterschieden und den verschiedenen experimentellen Bedingungen erklärt. Des Weiteren ist die Tiefenwahrnehmung nicht nur auf den Fusionsbereich beschränkt, sondern erstreckt sich, wie Bild 3.18 zeigt, zum Teil auch auf den Bereich des Doppeltsehens (Diplopie) /Klin01/. Die maximale Grenze für das Raumsehen entspricht im Bereich der Fovea etwa einem Stereowinkel von 25 Winkelminuten und erhöht sich außerhalb des Schärfezentrums auf etwa 90' /Kuhn99/. Viele Autoren geben für größtmögliche Querdisparation bei Stereopsis einen Stereowinkel von 70 Minuten an und beziehen sich dabei auf eine Veröffentlichung von Lüscher /Lüsc31/.

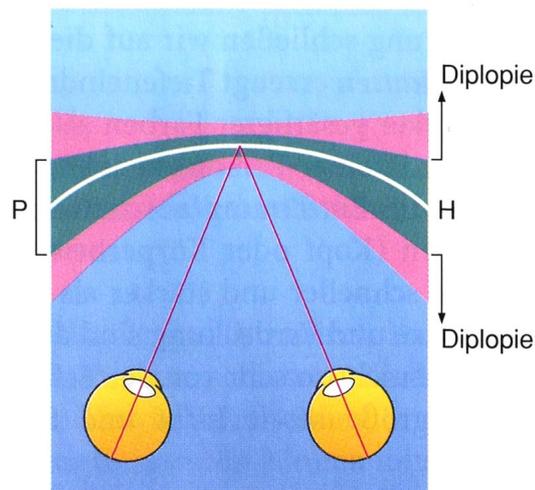


Bild 3.18: Panum-Areal (grün) und weiterer Bereich des binokularen Tiefensehens (rot) /Schm00/

Bei gegebener Querdisparation hängt die wahrgenommene Tiefe vom Abstand zum Fixationspunkt ab. Dies bewirkt etwa, dass ein dreidimensionales Objekt, unabhängig von der Objektentfernung, bei gleichbleibendem Betrachtungswinkel immer die gleiche räumliche Tiefe aufweist. Hierbei nimmt jedoch die Genauigkeit der Tiefenunterscheidung mit der Entfernung ab, da sich der Stereowinkel (für kleine Winkel) mit dem Abstand quadratisch verringert. Eine Vergrößerung des Augenabstands hingegen bewirkt eine lineare Verbesserung der Tiefenwahrnehmung:

$$\tan \vartheta \approx \vartheta = \frac{p\Delta a}{g(g + \Delta a)}$$

Auf die kortikale Verarbeitung retinaler Abbildungen und die Existenz von Neuronen, die spezifisch auf räumliche Tiefe reagieren, wurde bereits in Kapitel 2 eingegangen. Abschließend sei noch darauf hingewiesen, dass die Anzahl der für eine bestimmte (optimale) Querdisparation empfindlichen Neuronen, wie das Histogramm in Bild 3.19 belegt, nicht gleichmäßig auf den Bereich des binokularen Tiefensehens verteilt ist, und dass die Existenz der Querdisparationsneuronen nicht erklärt, wie die beiden Netzhautbilder inhaltlich miteinander verglichen bzw. ausgewertet werden und auf welche Weise die jeweils (inhaltlich) entsprechenden Netzhautpunkte beider Augen einander zugeordnet werden. Für dieses Korrespondenzproblem existieren verschiedene

Erklärungsansätze, auf die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht weiter eingegangen werden kann.

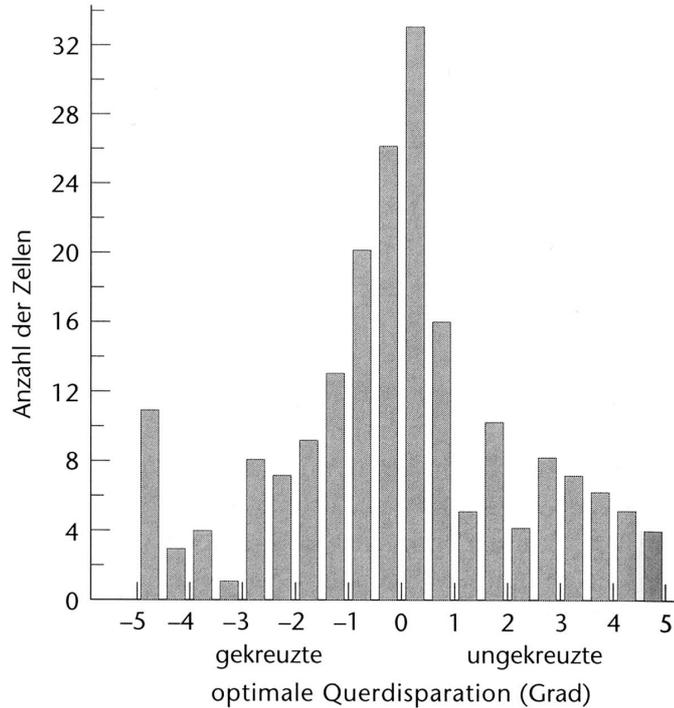


Bild 3.19: Histogramm von 271 Neuronen, aus dem die Anzahl der Zellen hervorgeht, die optimal auf verschiedene Querdisparationen reagieren /Gold02/

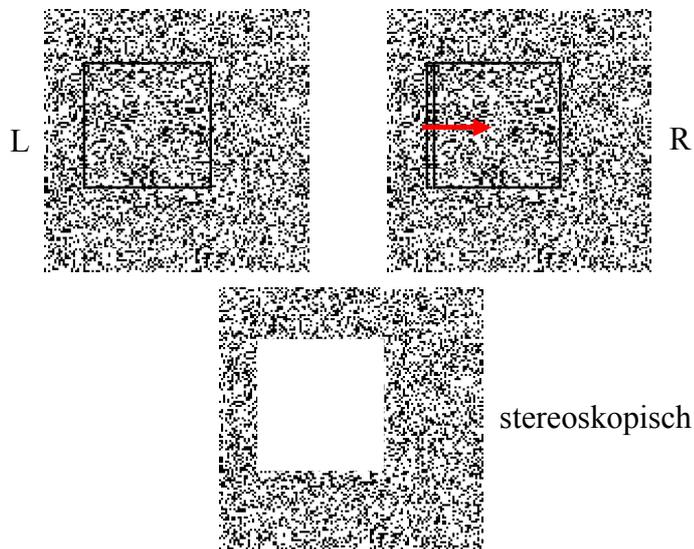


Bild 3.20: Konstruktionsprinzip eines Zufallsstereogramms

Zur Überprüfung der Stereopsis eignen sich u.a. Zufallsstereogramme. Wie den Ausführungen zur Versuchsdurchführung in Kapitel 5 zu entnehmen ist, wurden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Random-Dot-Stereogramme eingesetzt, um den korrekten Sitz des HMDs zu überprüfen. Dies ist möglich, da bei Zufallsstereogrammen die wahrzunehmende Gestalt ausschließlich durch die Stereoverarbeitung der dargebotenen Punktmuster entsteht und die Querdisparationen nur bei geeigneter Dar-

bietung erkannt werden. Bild 3.20 verdeutlicht das Konstruktionsprinzip eines Zufallsstereogramms insofern, als sich bei stereoskopischer Betrachtung, durch den Versatz eines willkürlich bestimmten Ausschnitts aus dem Zufallsmuster (in Querrichtung), die entsprechende Fläche vom Hintergrund abhebt.

Mit der Bewegungsparallaxe und der dynamischen Verdeckung existieren zwei bewegungsinduzierte Tiefenkriterien, die erst durch eine Relativbewegung zwischen Betrachter und Umwelt zustande kommen. Durch Veränderung der Kopf- oder Körperposition wird relativ zur Umwelt eine Bewegung ausgeführt, die dazu führt, dass sich zwei in unterschiedlicher Entfernung gelegene Objektpunkte, bedingt durch die veränderte Perspektive, scheinbar gegeneinander verschieben. Herman von Helmholtz stellte bereits 1866 fest, dass Bewegung die Wahrnehmung von räumlicher Tiefe insofern verstärkt, als nahe im Vergleich zu weiter entfernten Objekten ihre Abbildungsposition schneller ändern. Die Objektentfernung zum Fixationspunkt hat nicht nur einen Einfluss auf die Geschwindigkeit, sondern auch auf die Richtung der Verschiebung. Bei einer Seitwärtsbewegung des Betrachters entsteht eine gegenläufige Bewegung, d.h. Objekte, die weiter vom Fixationspunkt entfernt sind, weisen eine mitläufige Bewegung auf, während sich näher gelegene Bildpunkte scheinbar gegenläufig bewegen. Bild 3.21 verdeutlicht diesen Zusammenhang mit Hilfe entsprechender Pfeile, die die Richtung und den Betrag der veränderten Abbildungspositionen, die sich bei einer Seitwärtsbewegung nach links für ein bestimmtes Zeitintervall ergeben, anzeigen.

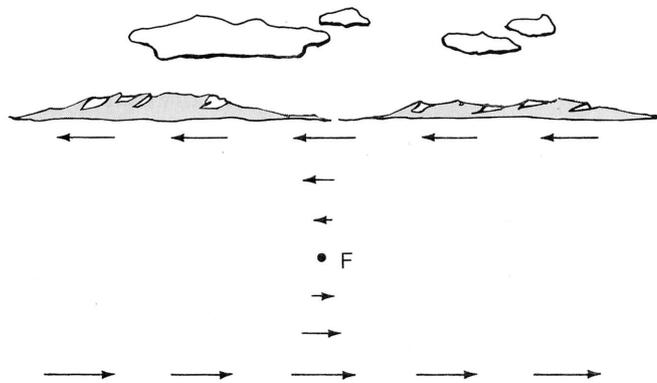


Bild 3.21: Die sich innerhalb eines diskreten Zeitintervalls aufgrund einer Seitwärtsbewegung ergebenden Richtungs- und Betragsänderungen der Abbildungspositionen in Abhängigkeit von der Entfernung der Objektpunkte vom Fixationspunkt /Levi01/

Bei der mathematischen Beschreibung der Bewegungsparallaxe unterscheidet man die Beziehung zwischen Beobachter und einem Objekt (absolute Bewegungsparallaxe) und die Beziehung zwischen Beobachter und zwei Objekten, die sich in unterschiedlicher Entfernung zum Beobachter (relative Bewegungsparallaxe) befinden. Ausgehend von der Annahme, dass sich der Betrachter bei der Seitwärtsbewegung (im Zeitintervall t_2-t_1) mit einer linearen Geschwindigkeit v fortbewegt, ergeben sich in Entsprechung zu den in Bild 3.22 verwendeten Variablenbezeichnungen folgende Gesetzmäßigkeiten /Kell95/Sedg86/:

$$d = s \frac{\sin \vartheta'}{\sin(\vartheta' - \vartheta)} \quad ; \quad d' = s \frac{\sin \vartheta}{\sin(\vartheta' - \vartheta)} \quad ; \quad d \cong \frac{s}{C}$$

$$d \cong \frac{\frac{ds}{dt}}{\frac{d(\vartheta' - \vartheta)}{dt}} \cong \frac{v}{\omega} \quad ; \quad \frac{d_1}{d_2} \approx \frac{\omega_2}{\omega_1}$$

Hierbei wurden für kleine Winkel bzw. Winkeländerungen folgende Näherungen angenommen:

$$\sin \vartheta' \approx \sin \vartheta \quad ; \quad \sin(\vartheta' - \vartheta) \approx \vartheta' - \vartheta = C$$

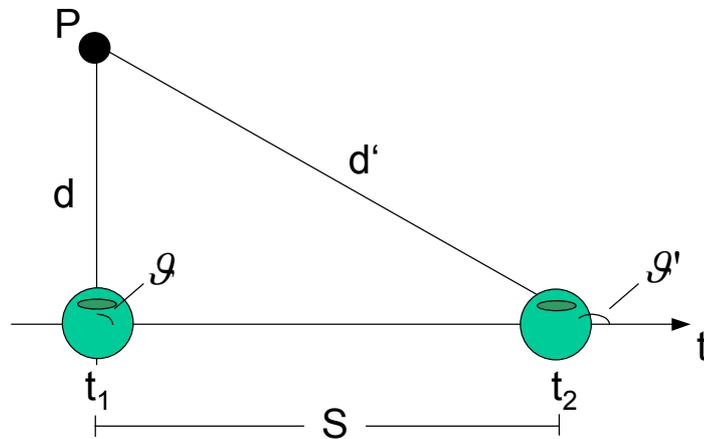


Bild 3.22: Absolute Bewegungsparallaxe nach /Kell95/Sedg86/

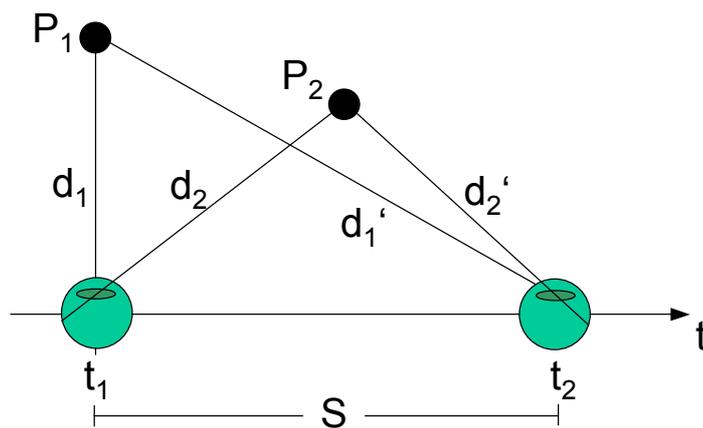


Bild 3.23: Relative Bewegungsparallaxe nach /Kell95/Sedg86/

Lassen auch einige Experimente den Schluss zu, dass Bewegungsparallaxen nicht als Informationsquelle für die räumliche Wahrnehmung genutzt werden, so finden sich ebenso Untersuchungen, die belegen, dass die Bewegungsparallaxe sehr wohl zum nicht

querdisparaten Raumsehen beiträgt. Bei einem von Rock und Wheeler durchgeführten Wahrnehmungsversuch /Rock98/, bei dem auf unterschiedlich weit entfernten Glas-scheiben Kreise aufgebracht wurden, gelang es den Probanden z.B. nicht, aus der Bewegungsparallaxe (bei monokularer Betrachtung) einen Tiefeneindruck zu gewinnen. Die perspektivisch gleich groß wirkenden Punkte schienen sich lediglich in einer Ebene gegeneinander zu verschieben. Unter anderen Versuchsbedingungen, bei denen z.B. die Bewegungsparallaxe mit anderen Tiefenkriterien kombiniert wird, kann die Wirksamkeit dieses Tiefenkriteriums jedoch sehr wohl belegt werden /Kell95/Rock98/Sedg86/.

Ein eng mit der Bewegungsparallaxe in Verbindung stehendes Tiefenkriterium ist die dynamische Verdeckung. Wie bereits erwähnt, führt die Bewegungsparallaxe dazu, dass Flächen, die sich in unterschiedlicher Entfernung zum Betrachter befinden und nicht senkrecht zur Bewegungsrichtung ausgerichtet sind, sich scheinbar gegeneinander verschieben. Wird dabei eine weiter hinten liegende Fläche von einer vorderen verdeckt, so ergibt sich aus einer in eine Richtung verlaufenden Betrachterbewegung, wie in Bild 3.24 verdeutlicht, ein fortschreitendes Zu- oder Aufdecken der hinteren Fläche. Der Verdeckungsgrad wird dabei von der aktuellen Perspektive bestimmt.

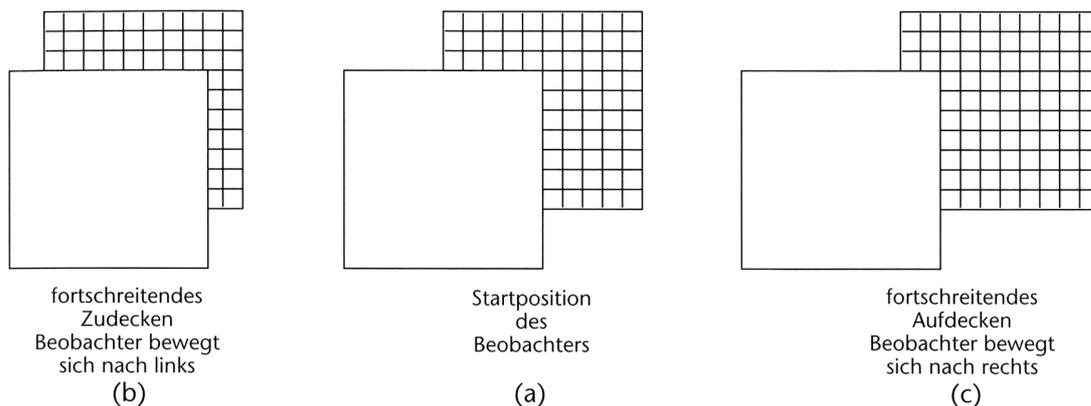


Bild 3.24: Fortschreitendes Zu- oder Aufdecken von Flächen /Gold02/

3.3 Der wahrnehmungsökologische Ansatz

Der wahrnehmungsökologische Ansatz nach Gibson geht davon aus, dass für die räumliche Tiefe und Entfernung nicht die kognitive Verarbeitung, sondern die unmittelbare Wahrnehmung invarianter Informationen entscheidend ist. Hierzu zählen im Wesentlichen:

- die Flächenanordnung des Erdbodens
- das Horizontverhältnis
- die umgebende optische Anordnung
- optische Fluss

Der erste Punkt entspricht dem bereits erläuterten monokularen Tiefenkriterium Texturgradient. In diesem Zusammenhang wird vor allem betont, dass die Flächenanordnung des Erdbodens, abgesehen von Veränderungen innerhalb größerer Zeiträume, als konstant anzusehen ist, und dass der vom Standpunkt des Betrachters abhängige Texturgradient unmittelbar wahrgenommen wird. Neben der Entfernungsinformation erschließt sich aus Texturgradienten, wie Bild 3.25 zeigt, auch unmittelbar die Anordnung bzw. Orientierung von Flächen zueinander.

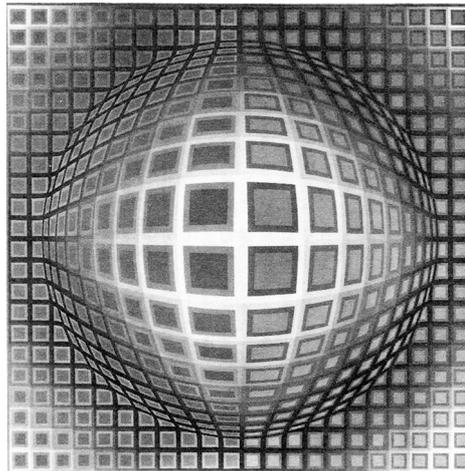


Bild 3.25: Beispiel eines Gemäldes, das mit Hilfe von Texturgradienten einen unmittelbaren Eindruck einer räumlichen Anordnung von Einzelflächen erzeugt - Vega-Nor von Vasarely /Gold97/

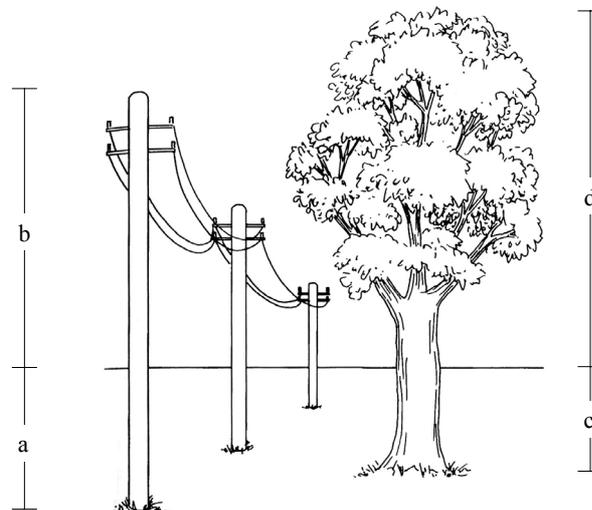


Bild 3.26: Horizontverhältnis nach /Gold97/

Das Horizontverhältnis eines Objekts bestimmt sich aus dem Anteil des Objektes, der über den Horizont hinausragt in Relation zu dem Anteil, der sich unter dem Horizont befindet. In Bezug auf die Position des Betrachters ist das Horizontverhältnis als invariant anzusehen. Der relative Größenvergleich von Objekten ergibt sich aus dem direkten Vergleich der Horizontverhältnisse. Bild 3.26 veranschaulicht dies insofern, als

der Baum im Verhältnis zu den Telegrafmasten als größer wahrgenommen wird, weil sein Horizontverhältnis ($HV_B=d/c$) das der Telegrafmasten ($HV_T=b/a$) übersteigt.

Unter dem Begriff der optischen Anordnung sind alle Objektmerkmale zusammengefasst, die die komplexe Struktur des über die Retina aufgenommenen Lichts bestimmen. Objekte werden folglich erst dadurch wahrgenommen, dass ihre Objektmerkmale den Lichteinfall beeinflussen. Die von der Umwelt geprägte optische Anordnung ist, wie Bild 3.27 zeigt, an den jeweiligen Standort des Betrachters gebunden.

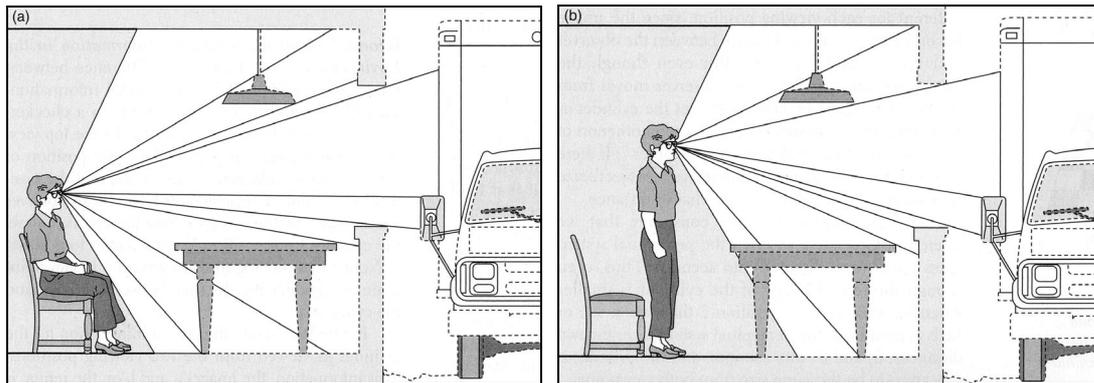


Bild 3.27: Standortabhängigkeit der umgebenden optischen Anordnung /Gold02/

Für die Bewegungserkennung ist die Änderung der optischen Anordnung ausschlaggebend. Die Art und Weise einer Veränderung lässt sich bei einer Eigenbewegung durch den optischen Fluss beschreiben. Er wird von der Art und Weise bestimmt, wie Umweltelemente an einem sich bewegenden Betrachter vorbeifließen, bzw. mit welchem optischen Bewegungsmuster diese auf der Retina abgebildet werden. Als dynamisches Tiefenkriterium ist der optische Fluss von zentraler Bedeutung. Im Unterschied zur Bewegungsparrallaxe werden hier sämtliche sich in einer Umwelt bietende Objektelemente gemeinsam betrachtet, was auch durch den Begriff der Bewegungsperspektive zum Ausdruck kommen soll. Bild 3.28 zeigt z.B., dass bei einer Vorwärtsbewegung auf der Retina ein expandierendes Flussfeld entsteht, das in seiner spezifischen Form Rückschlüsse auf die Art der Bewegung und die Struktur der Umwelt zulässt. Im vorliegenden Fall des Landeanflugs wird ein Punkt auf der Landebahn anvisiert, was dazu führt, dass die Fließgeschwindigkeit für die optischen Elemente in diesem Bereich, auch "Zentrum des optischen Auseinanderfließens" genannt, gegen "Null" strebt. Die Richtung der Bewegungsgradienten ist im Fall des Sinkflugs sternförmig. Bild 3.29 verdeutlicht, dass diese sternförmige Anordnung auch bei einer Bewegung in der Ebene auftritt, wenn sich, wie bei diesem mit Bücherregalen ausgestatteten Gang, Bildelemente oberhalb des anvisierten Bewegungsziels befinden. Im Wesentlichen wird der optische Fluss von den folgenden drei Faktoren bestimmt:

- Geschwindigkeit der relativen Bewegung der Objekte zueinander
- Entfernung der retinalen Projektionsstelle von der Fovea
- egozentrische Distanz

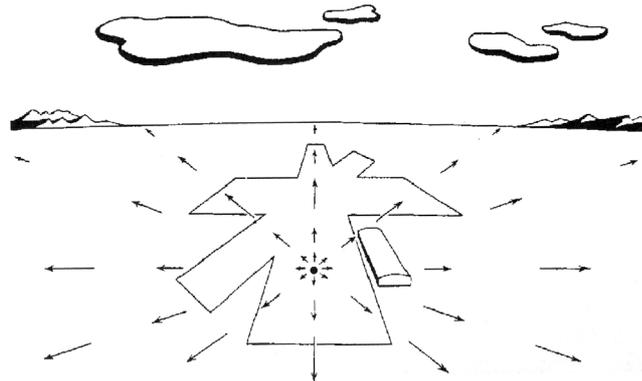


Bild 3.28: Optischer Fluss beim Landeanflug auf einen Flughafen /Gold02/

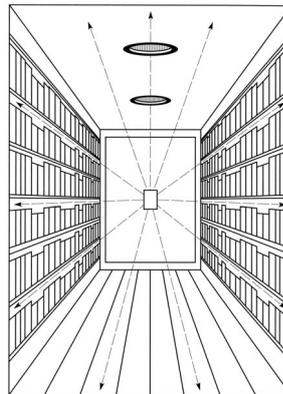


Bild 3.29: Optischer Fluss beim Durchschreiten eines mit Bücherregalen ausgestatteten Gangs einer Bibliothek /Matl98/

Die bei einer Bewegung auftretende Änderung des Texturgradienten lässt sowohl Rückschlüsse auf die Struktur der Umwelt als auch auf die in der Umwelt stattfindende Bewegung einschließlich der eigenen Fortbewegung zu. Der Gradient des optischen Flusses stellt in diesem Zusammenhang ein Maß für die graduelle Änderung der Bewegungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Entfernung dar. Der optische Fluss liefert dem Beobachter somit wichtige Informationen, um die Eigenbewegung zu kontrollieren bzw. voranzuplanen. Bild 3.30 verdeutlicht dies insofern, als dem Kraftfahrzeugführer bei einer Fahrt auf einer Landstraße ein Vergleich aus der Streckenführung und dem optischen Fluss signalisiert, ob und in welcher Form eine Korrektur der Fahrtrichtung erfolgen muss, damit das Fahrzeug nicht von der Fahrbahn abkommt. Inwieweit die Muster des optischen Fließens tatsächlich für die Bewegungssteuerung genutzt werden bzw. welchen Stellenwert sie im Vergleich zu anderen Faktoren der Raumwahrnehmung besitzen, ist jedoch umstritten und scheint sehr von der spezifischen Aufgabenstellung bzw. Situation abzuhängen /Gold02/.

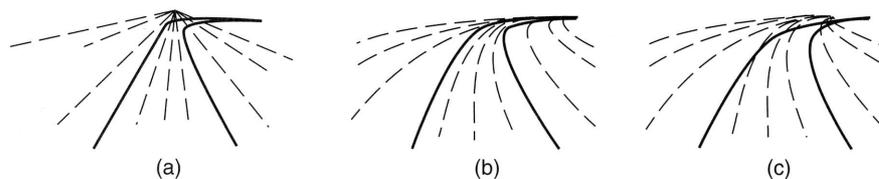


Bild 3.30: Optische Fließmuster (a) gerades Straßenstück (b) korrekte Kurvenfahrt (c) Abkommen von der Fahrbahn /Gold02/

3.4 Räumliches Hören

Das natürliche räumliche Hören ist geprägt vom Hören mit unverdeckten Ohren bei gleichzeitiger Kopfbewegung und in Interaktion mit anderen Sinnesreizen. Das räumliche Hören beschränkt sich jedoch nicht auf das binaurale Hören, sondern stellt sich, wengleich nur sehr eingeschränkt, auch beim monauralen Hören ein.

In Analogie zur Theorie der mehrfachen Tiefenkriterien beim räumlichen Sehen kann auch beim räumlichen Hören davon ausgegangen werden, dass prinzipiell jede physikalische Eigenschaft einer Schallwelle, die durch die relative Schallquellenposition beeinflusst wird, zur räumlichen Wahrnehmung beiträgt.

3.4.1 Die Außenohrübertragungsfunktion und ihre messtechnische Erfassung

Der Prozess des Hörens lässt sich in die Einzelfunktionen Reizleitung, Reiztransformation und neuronale Verarbeitung untergliedern. Die Reizleitung wird von den drei Bestandteilen des Ohrs, dem Außen-, Mittel- und Innenohr, erbracht und lässt sich anhand der sog. Freifeldübertragungsfunktion des Ohres beschreiben. Sie liefert einen funktionalen Zusammenhang zwischen dem Schalldruck, der im Freifeld bei Abwesenheit des Hörenden zu messen wäre, und der Auslenkung der Basilarmembran im Innenohr. Die Auslenkung der Basilarmembran bewirkt eine spezifische Aktivierung der beteiligten Nervenfasern und ist als eine im Innenohr stattfindende Reiztransformation aufzufassen. Die neuronale Verarbeitung wird von der Hörbahn und dem Zentralnervensystem übernommen.

Die Freifeldübertragungsfunktion des Ohres kann als eine aus den einzelnen Übertragungsfunktionen des Außen-, Mittel-, und Innenohrs zusammengesetzte Funktion betrachtet werden. Die Außenohrübertragungsfunktion ist ebenfalls eine Freifeldübertragungsfunktion und beschreibt das Verhältnis zwischen dem Schalldruck am Trommelfell und dem Schalldruck im Freifeld, wohingegen die Mittelohrübertragungsfunktion das Verhältnis zwischen Steigbügelschnelle und Schalldruck am Trommelfell angibt. Die Beschreibung der Reizleitung wird durch die Übertragungsfunktion des Innenohrs komplettiert, die vom Verhältnis der Auslenkung der Basilarmembran zur Steigbügelauslenkung geprägt ist. Die Außenohrübertragungsfunktion ist, im Unterschied zu den beiden anderen Übertragungsfunktionen, nicht nur von den anatomischen Ausprägungen des Individuums, sondern auch von der Richtung und der Entfernung der Schallquelle abhängig. Dies liegt darin begründet, dass die am Trommelfell eines Ohrs auftreffenden Schallsignale zuvor richtungs- und entfernungsabhängig verschieden stark an Kopf, Oberkörper, Schulter und Ohrmuschel reflektiert, gestreut und gebeugt werden.

Die Signalveränderung kann messtechnisch z.B. dadurch erfasst werden, dass, wie Bild 3.31 verdeutlicht, ein pulsförmiger, akustischer Stimulus aus verschiedenen Richtungen

ausgesendet wird und die im Gehörgang gemessenen Impulsantworten miteinander verglichen werden.

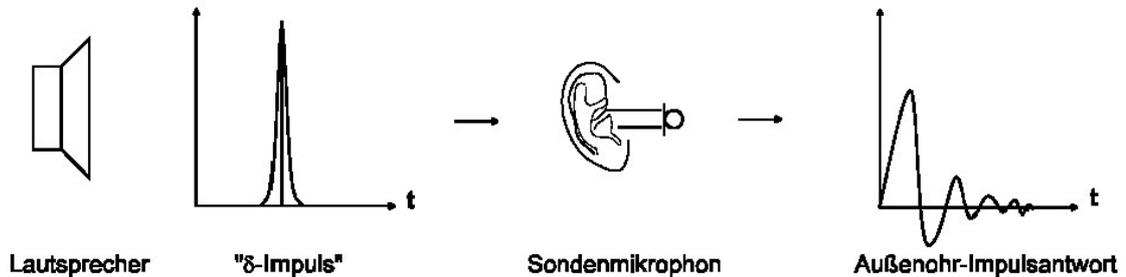


Bild 3.31: δ-Impuls-Meßmethode zur Bestimmung der Außenohr-Impulsantwort

Die so gemessenen Impulsantworten zeigen bestimmte Pegel- und Zeitunterschiede sowie spektrale Verfärbungen. Die Bedeutung, die den einzelnen Faktoren für die räumliche Wahrnehmung zukommt, ist zum einen von der Vertrautheit (a priori-Wissen) und der spektralen Zusammensetzung der Schallquelle abhängig. Zum anderen wird sie von der Reliabilität und Plausibilität der Faktoren bestimmt /Leit00/.

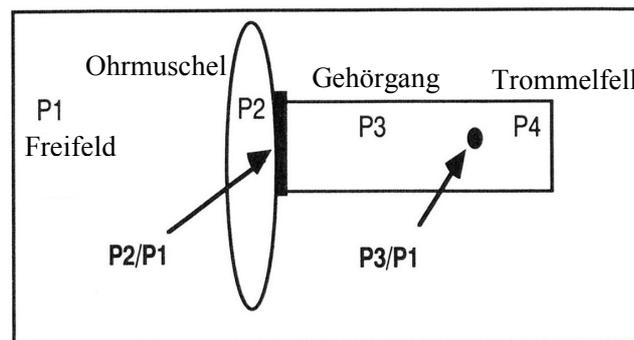


Bild 3.32: Messpunkte zur Bestimmung der HRTF /Møll92/

Zur messtechnischen Bestimmung der Außenohrübertragungsfunktion existieren verschiedene Methoden, die sich zum einen durch die Stelle (Referenzpunkt) unterscheiden, an der der Schalldruck im Ohr gemessen wird. Wie Bild 3.32 zeigt, existieren mit:

- direkt am Trommelfell (P4)
- im Gehörgang (P3)
- am Eingang zum Gehörgang (P2)

prinzipiell drei verschiedene Positionen, an denen die Messsonde im Außenohr angebracht werden kann, wobei zu unterscheiden ist, ob diese den Gehörgang offen lässt oder blockiert.

Zum anderen werden verschiedene Signalarten (periodische Schwingung, *Sweep*, stochastisches Rauschen, Impuls usw.) und unterschiedliche Messverfahren dazu ein-

gesetzt, aus den Signalantworten die richtungsabhängigen Veränderungen im Zeit- und Frequenzbereich abzuleiten. Als Testsignal ist in diesem Zusammenhang der δ -Impuls hervorzuheben, der, gemäß des Unschärfeprinzips, als einmaliger Impuls mit $\Delta t \rightarrow 0$ ein theoretisch unendlich breites Frequenzband ($\Delta f \rightarrow \infty$) aufweist, in dem alle enthaltenen Teilschwingungen die gleiche Amplitude besitzen. Wird der δ -Impuls periodisch ausgesendet, so enthält er im Abstand $\Delta f = 1/T$ alle ganzzahlig vielfachen Frequenzen mit stets gleicher Amplitude.

Zur Bestimmung der Außenohrübertragungsfunktion haben sich, neben dem als Maximallängenfolgen (MLS: *Maximum Length Sequence*) bekannten Verfahren, auch solche etabliert, die deterministische Signale mit FFT-Blocklänge verwenden. Im Vergleich zu einem einfachen δ -Impuls-Messvorgang zeichnen sich diese Verfahren durch einen größeren Signal/Rauschabstand und eine größere Robustheit gegenüber Nichtlinearitäten aus.

Maximallängenfolgen sind periodisch binäre pseudostochastische Rauschsignale. Gegenüber einem weißen Rauschen haben sie den Vorteil, völlig vorhersehbar zu sein. Die Impulsantwort wird beim MLS-Verfahren durch Kreuzkorrelation des Messsignals mit dem Ausgangssignal gewonnen. Bild 3.33 zeigt die mittels Autokorrelation gewonnene Impulsantwort einer Maximalfolge bei idealer Übertragungsfunktion. Hierbei entspricht die Signalantwort genau der Maximalfolge, so dass die Kreuzkorrelation in eine Autokorrelation übergeht.

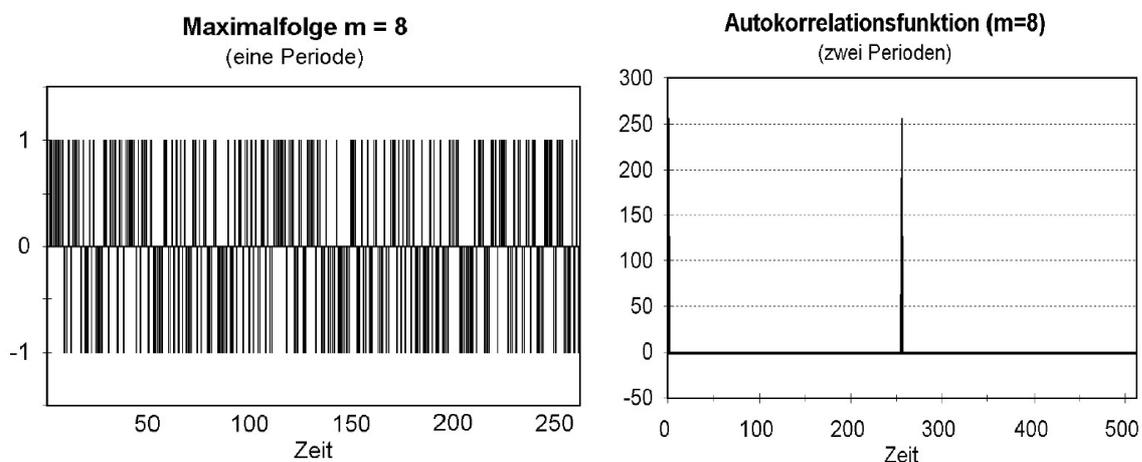


Bild 3.33: Die mittels Autokorrelation gewonnene Impulsantwort einer Maximalfolge /Vorl01/

Deterministische Signale mit FFT-Blocklänge lassen sich mittels IFFT (*Inverse Fast Fourier Transformation*) generieren. Hierbei bietet sich, mit Hilfe von geeigneter Software, nicht nur die Möglichkeit, beliebig gefärbte Rauschsignale aus vorgegebenen Amplitudenspektren zu erstellen, sondern auch die Phasenlage der Einzelschwingungen vorzugeben. Wird hierbei, wie Bild 3.34 zeigt, die Phase in Abhängigkeit von der Signalfrequenz kontinuierlich verändert, ergibt sich ein sog. *Sweepsignal*, das sich, aufgrund seiner Robustheit gegenüber Verzerrungen, in besonderem Maße für die Bestimmung der Übertragungsfunktion eignet /Müll99/. Die Übertragungsfunktion wird

dadurch gebildet, dass die fouriertransformierte Signalantwort in Relation zum Anregungsspektrum (Division im Frequenzbereich) gesetzt wird. Die Impulsantwort liefert die IFFT.

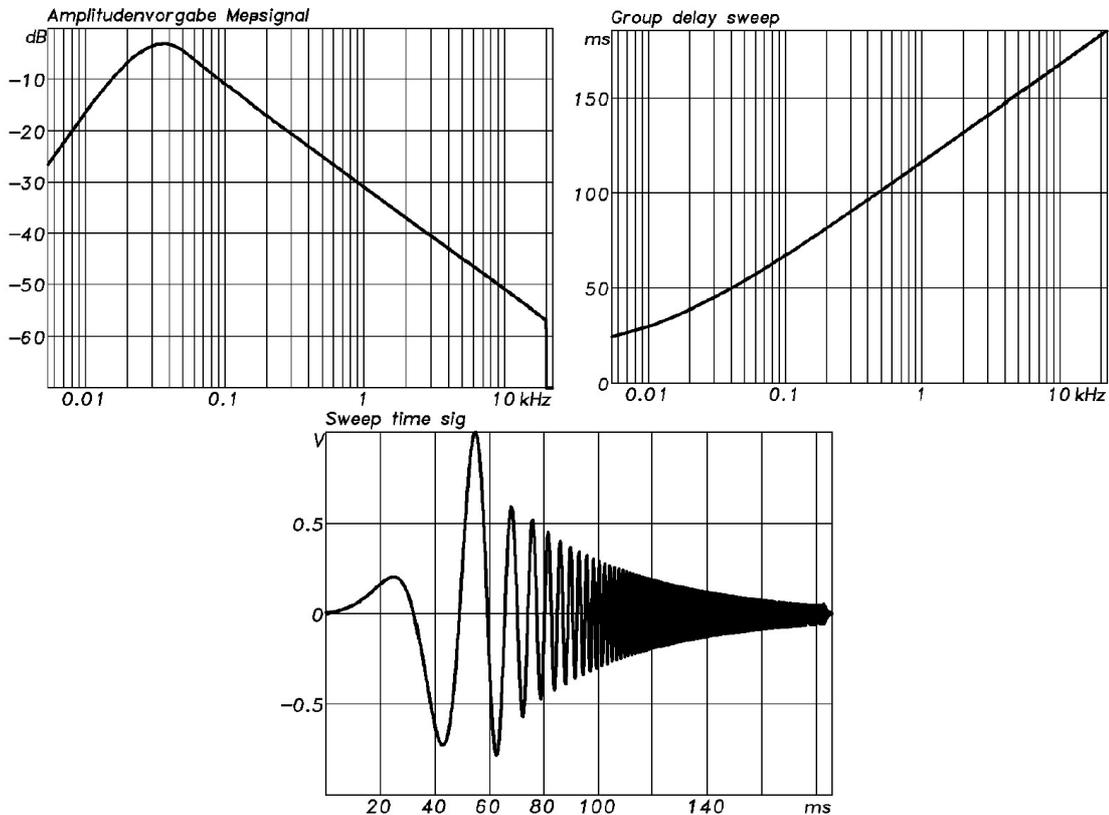


Bild 3.34: Deterministisches Signal mit FFT-Blocklänge am Beispiel eines Sweeps (Amplitudenspektrum, Gruppenlaufzeitspektrum und Zeitsignal) /Müll99/

Die zumeist in einem schalltoten Raum durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Außenohrübertragungsfunktion können aus Gründen der einfacheren Messdurchführung und besseren Vergleichbarkeit alternativ auch mit Kunstköpfen durchgeführt werden. Kunstköpfe sind so konstruiert, dass sie eine möglichst repräsentative Außenohrübertragungsfunktion aufweisen. Je nach Einsatzzweck sind bei einem Kunstkopf nicht nur der Kopf, sondern auch Hals, Schulter und Oberkörper nachgebildet. Bild 3.35 zeigt, am Beispiel des KEMAR, einen Kunstkopf, der zur Bestimmung der Außenohrübertragungsfunktion unter Laborbedingungen geeignet ist, wohingegen der KU100 von Neumann für den mobilen Einsatz entwickelt wurde und vorwiegend für Musikaufnahmen und binaurale Messungen eingesetzt wird. Der dritte dargestellte Kunstkopf wurde für alle Einsatzbereiche konzipiert. Obwohl inzwischen eine neue Version des letztgenannten Kunstkopftyps auf dem Markt existiert, wurde diese Darstellung gewählt, da sie die vereinfachten Entsprechungen des menschlichen Kopfes, Halses, der Schultern und des Oberkörpers gut herausstellt.



Bild 3.35: Kunstkopftypen (Knowles Kemar, Neumann KU100, Head-Acoustics HMS II)

Bild 3.36 zeigt die empirisch ermittelte Außenohrübertragungsfunktion einer Versuchsperson bei seitlichem Schalleinfall. Aus der Darstellung der Übertragungsfunktion im Zeitbereich lassen sich die Pegel- und Laufzeitunterschiede der Impulsantworten erkennen. Die Darstellung im Frequenzbereich verdeutlicht dagegen die spektralen Verfärbungen, indem die mittels der Fourier-Analyse gewonnenen Pegelunterschiede der sinusförmigen Einzelschwingungen über der Frequenz aufgetragen werden. Im angelsächsischen Sprachraum werden die beiden Darstellungsformen mit HRTF (*Head Related Transfer Function*) und HRIR (*Head Related Impulse Response*) abgekürzt.

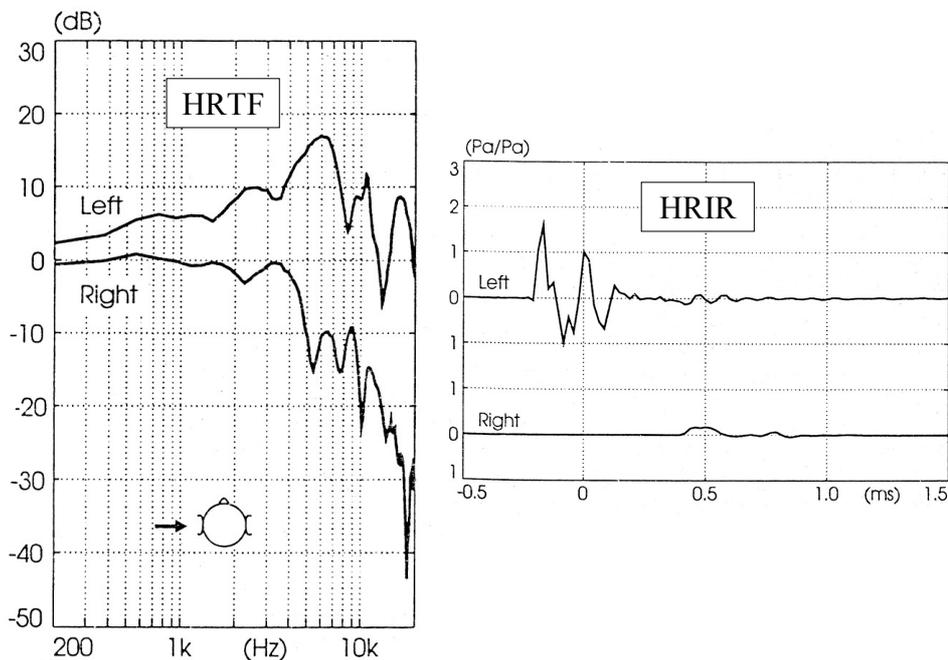


Bild 3.36: Beispiel einer Außenohrübertragungsfunktion im Zeit- und Frequenzbereich /Møll195/

Bei der Bestimmung der hier dargestellten Außenohrübertragungsfunktion setzte Møller Messkapseln ein, die am Eingang des Gehörgangs angebracht wurden und den Gehör-

gang abschließen. Anhand entsprechender Messungen konnte nachgewiesen werden, dass das Verhältnis zwischen dem Druck im Gehörgang und dem Druck am Eingang des Gehörgangs unabhängig von der Schalleinfallrichtung ist.

Um den richtungsabhängigen Einfluss auf die Außenohrübertragungsfunktion möglichst umfassend bestimmen zu können, ist es notwendig, die Schalleinfallrichtung sukzessive zu verändern. In der zuvor erwähnten Studie wurden bei 40 Probanden für 100 verschiedene Einfallrichtungen die Übertragungsfunktionen bestimmt. Bei Messungen mit einem Kunstkopf ist es möglich, die Richtungsauflösung weiter zu erhöhen und bis zu mehrere Hundert Messungen durchzuführen /Gard94/. Zur Richtungsangabe wird hierbei im Allgemeinen ein kopfbezogenes Koordinatensystem verwendet und zwischen der Median-, Horizontal- und Frontalebene unterschieden. Abweichungen aus der Vorwärtsrichtung werden mit der Angabe der beiden vorzeichenbehafteten Azimut- und Elevationswinkel beschrieben (Bild 3.37).

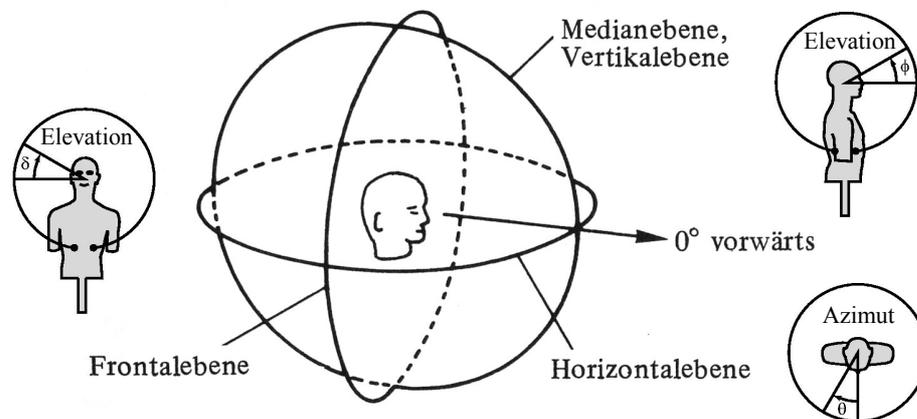


Bild 3.37: Kopfbezogenes Koordinatensystem für die Beurteilung der Hörereignisrichtung
/Dick97/Alga02/

3.4.2 Lokalisation und Lokalisationsunschärfe

Um zu erforschen, wie gut die Fähigkeit der auditiven räumlichen Wahrnehmung beim Menschen ausgeprägt ist, wurden bereits seit Beginn des 20. Jahrhunderts verschiedene Hörversuche durchgeführt. Ein Hörversuch ist meistens so aufgebaut, dass ein Proband mit einem Schallereignis, dessen räumliche und zeitliche Struktur bekannt ist, konfrontiert wird. Gemäß eines zuvor definierten Verfahrens wird er anschließend aufgefordert, das wahrgenommene Hörereignis zu beschreiben bzw. zu quantifizieren. Die Beschreibung der Lokalisiertheit eines Hörereignisses erfolgt durch Angabe des Ortes und der Ausdehnung im Vergleich zu weiteren Hörereignissen oder Wahrnehmungen anderer Sinnesorgane. Hierbei ist, aufgrund der hohen räumlichen Auflösung, insbesondere das Sehen hervorzuheben. Es wurden aber auch schon Versuche unter Einbeziehung des taktilen Sinns durchgeführt (Luftdüse).

Die bei Hörversuchen verwendeten psychometrischen Methoden sind sehr unterschiedlich. Zum einen bedient man sich verschiedener Skalenniveaus, um das

Hörereignis zu quantifizieren. Zum anderen ist die Art der akustischen Darbietung sehr unterschiedlich. Neben der verwendeten Signalart Sinus, Breitbandrauschen usw. ist hierbei vor allem danach zu unterscheiden, ob der Proband ein konstantes Eingangssignal dargeboten bekommt und eine Abfrage- bzw. Schätzmethode zum Einsatz kommt (Konstanzmethode) oder ob sich die Eingangsgröße kontinuierlich verändern lässt, und die Methode des Einregelns bzw. Ausgleichens (Herstellungsmethode) Anwendung findet.

Generell kommen als Eingangsgrößen bei einem Hörversuch nicht nur akustische, sondern alle Merkmale physikalischer Phänomene und Vorgänge in Betracht, die auf irgendeine Weise das physiologische Zustandekommen des Hörereignis beeinflussen. Die Definition der Lokalisationsunschärfe ist folglich nicht nur auf die kleinste Merkmalveränderung des Schallereignisses beschränkt, die gerade zu einer Ortsänderung des Hörereignisses führt, sondern schließt die Merkmalsveränderung anderer Ereignisse, die mit dem Hörereignis korrelieren, mit ein. Theorien, die sich auf den auditiven Kanal beschränken, werden als homosensorisch bezeichnet, während man Theorien, die andere Sinnesorgane mit in die Betrachtung einbeziehen, heterosensorisch nennt.

Neben der Lokalisationsunschärfe stellt sich auch die Frage nach der Lokalisation, d.h. danach, wo das Hörereignis bei gegebenem Schallquellenort erscheint. Die Lokalisation hängt dabei neben dem Schallquellenort noch von weiteren Einflussfaktoren, wie Signalart, Signalvertrautheit usw. ab. Im Allgemeinen ist die Lokalisation definiert als Zuordnungsgesetz oder -regel (*Operator*) zwischen dem Ort des Hörereignisses und einem oder mehreren bestimmten Schallereignismerkmalen /Blau74/. Dass das Hörereignis keineswegs am Schallereignisort entstehen muss, wird besonders deutlich, wenn mehrere verschiedene Hörereignisse bei ein und derselben Schallquelle nebeneinander auftreten. So können unter bestimmten Bedingungen, etwa bei Schmalbandsignalen, Vorne-Hinten-Inversionen auftreten, bei denen der zugeordnete Punkt des Hörereignisraums sich erheblich von der Position der Schallquelle unterscheidet. Bild 3.38 zeigt, dass die Richtung der Hörereignisse in diesen Fällen einer Spiegelung der Schalleinfallrichtung an der Ohrenachse entspricht. Dieses Phänomen wird zu einem späteren Zeitpunkt unter den Stichwörtern *Cone of Confusion* und Blauertbänder nochmals aufgegriffen.

Bei der Bestimmung der Lokalisation und der Lokalisationsunschärfe ist das Richtungshören vom Entfernungshören zu unterscheiden. Als Resümee der verschiedenen Hörversuche kann festgehalten werden, dass der "Bereich des schärfsten Hörens", bei dem die Lokalisationsunschärfe unter optimalen Bedingungen einen Minimalwert annimmt, in oder nahe der Vorwärtsrichtung liegt. Für die Genauigkeit der Richtungsbestimmung gilt, dass die räumliche Auflösung in der Horizontalebene am höchsten ist und unter günstigen Bedingungen Werte zwischen 2-3° annimmt und bei seitlichem Schalleinfall die Lokalisationsunschärfe auf etwa 4,5 ° ansteigt /Dick97/. In der Medianebene liegen die Werte deutlich darüber. Bild 3.39 zeigt, dass in

Blickrichtung deutlich bessere Werte erzielt werden als beim Schalleinfall von oben. Die Lokalisationsschärfe hängt darüber hinaus stark von der spektralen Zusammensetzung und der Vertrautheit des Signals ab. Dies zeigt sich z.B. daran, dass bei Verwendung des weißen Rauschens als Testsignal, das das gesamte Klangspektrum abdeckt, eine geringe Lokalisationsunschärfe vorliegt. Sie beträgt in Blickrichtung etwa 4° . Wird als Testsignal hingegen ein fortlaufendes Sprachsignal verwendet, erhöht sich die Lokalisationsunschärfe bei bekanntem Sprecher auf 9° und bei unbekanntem Sprecher auf 17° .

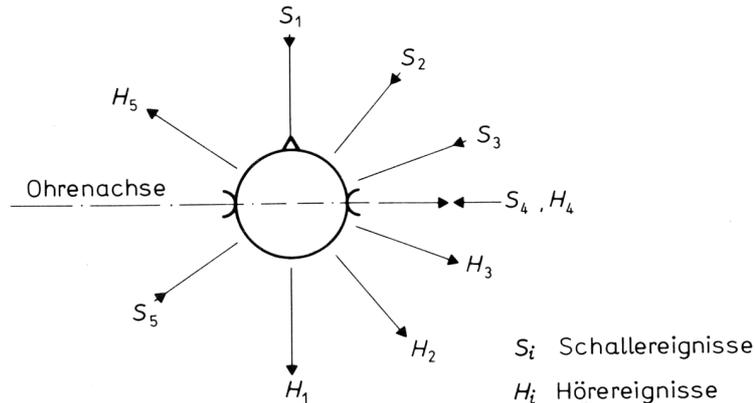


Bild 3.38: Sonderfall der Lokalisation, bei der die Richtung des Hörereignisses einer Spiegelung der Schalleinfallrichtung an der Frontalebene entspricht /Blau74/

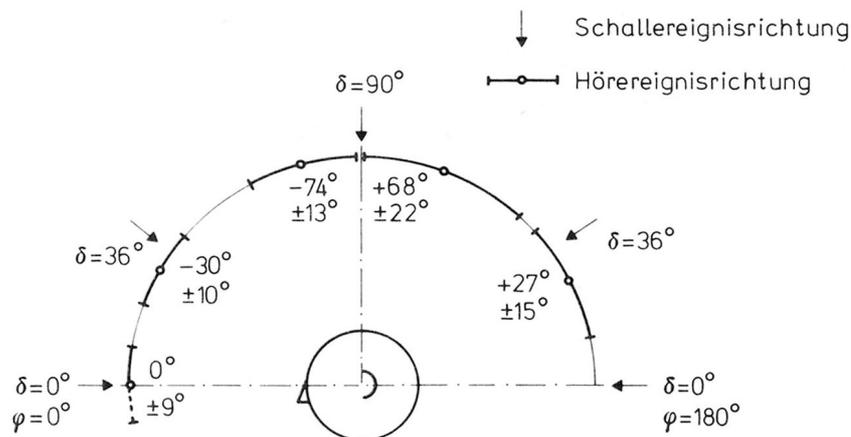


Bild 3.39: Lokalisation und Lokalisationsunschärfe in der Medianebene (Sprache eines bekannten Sprechers /Blau74/

Es sei an dieser Stelle noch angemerkt, dass die Angaben in der Fachliteratur bezüglich der räumlichen Auflösung der auditiven Wahrnehmung schwanken, was in erster Linie auf die verschiedenen Versuchsbedingungen und Messmethoden zurückzuführen ist. So wird z.B. die minimale Lokalisationsunschärfe in der Horizontalebene (MAA: minimum audible angle) von einigen Autoren mit 1° angegeben /Matl97/Bega94/. Die Angaben zum Entfernungshören unterliegen ebenfalls starken Schwankungen. Die in

Bild 3.40 enthaltenen Werte gelten folglich nur für die speziellen Versuchsbedingungen: fixierter Kopf, Hörereignis in Vorwärtsrichtung, Knallimpulse usw.

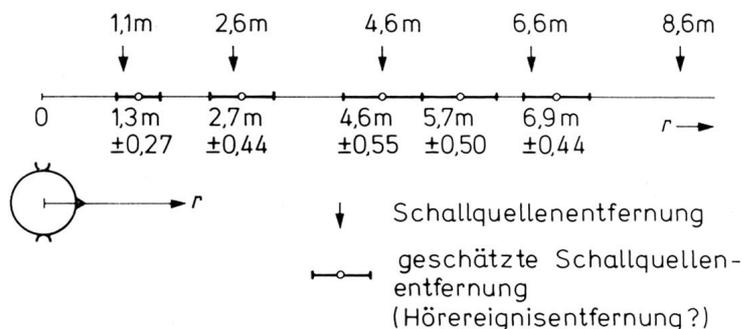


Bild 3.40: Lokalisationsunschärfe und Lokalisation zwischen Schallquellen- und Hörereignisentfernung /Blau74/

Von Bedeutung ist in diesem Zusammenhang, dass die Lokalisationsunschärfe in der Horizontalebene, wie Bild 3.41 für die Azimutwinkel 0° und 30° der Schalleinfallrichtung zeigt, eine von der Signalfrequenz abhängige Größe darstellt. Für tiefe Frequenzen unterhalb von 1 kHz ergibt sich eine maximale Auflösung mit einem Wert des minimal hörbaren Verschiebungswinkels von etwa 1° /Gran95/. Der Einfluss der Schalleinfallrichtung auf die Lokalisationsunschärfe tieffrequenter Testsignale zeigt Bild 3.42, in dem die Messergebnisse verschiedener Autoren aufgeführt sind.

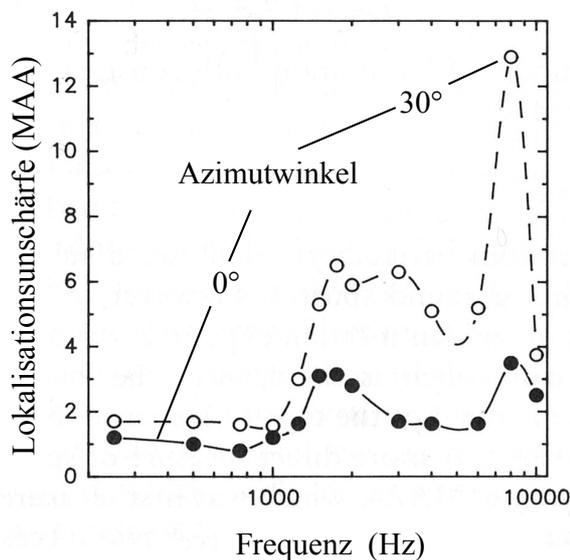


Bild 3.41: Frequenzabhängigkeit der Lokalisationsunschärfe /Gran95/

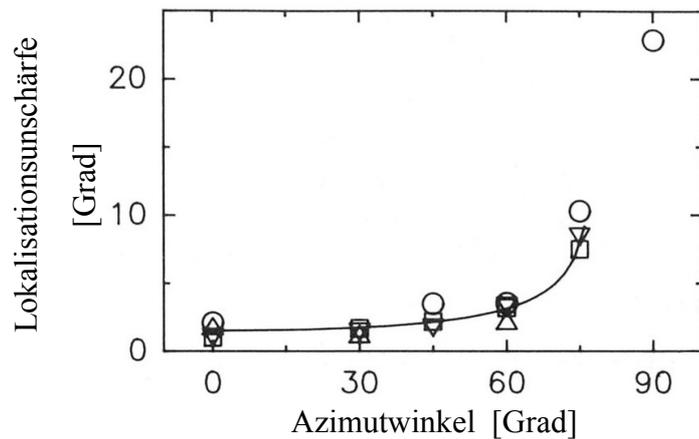


Bild 3.42: Die von verschiedenen Autoren bestimmte Lokalisationsunschärfe für tieffrequente Testsignale in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung /Gran95/

Die bisher dargestellten Werte der Lokalisationsunschärfe beziehen sich auf die Diskriminierbarkeit von zwei Hörereignissorten, die durch zeitlich aufeinanderfolgende Signale hervorgerufen werden. Wird dagegen untersucht, welcher Winkel zwischen zwei zeitgleich abstrahlenden Schallquellen notwendig ist, um die Hörereignissorte getrennt voneinander wahrzunehmen, so ergibt sich ein Maß für die räumliche Auflösung, welches im angelsächsischen Raum mit *Concurrent Minimum Audible Angle* bezeichnet wird. Die in Bild 3.43 aufgeführten Werte beziehen sich auf einen Standardreiz von 500 Hz und drei Testreize verschiedener Frequenz in Abhängigkeit von der Schalleinfallrichtung des Referenzreizes. Die Frequenzangaben geben den Unterschied des jeweiligen Testsignals zum Referenzsignal an.

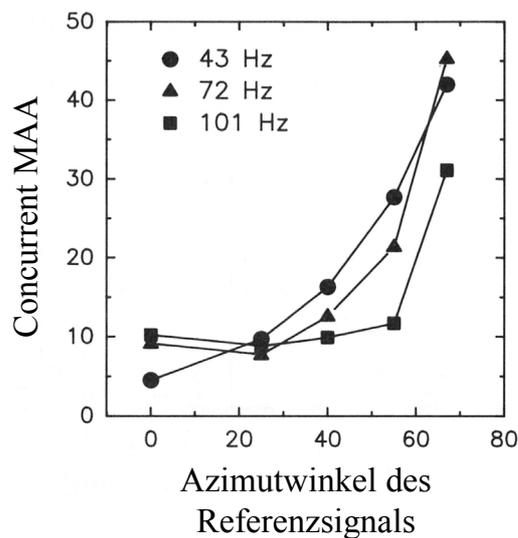


Bild 3.43: Lokalisationsunschärfe zeitgleicher Testsignale (Concurrent MAA) unterschiedlicher Frequenz in Abhängigkeit vom Azimutwinkel eines 500 Hz-Referenzsignals /Gran95/

3.4.3 Faktoren der Entfernungswahrnehmung

3.4.3.1 Monaurale Faktoren

Die im Folgenden genannten Faktoren zur Entfernungswahrnehmung sind insofern als monaural anzusehen, als sie in Hörversuchen bestimmt wurden, bei denen auf beiden Ohren identische Schallsignale vorlagen.

Die Vertrautheit des Signals ist für die Entfernungseinschätzung von großer Bedeutung. Bild 3.44 zeigt in diesem Zusammenhang, dass die Hörereignisentfernung recht gut mit der Schallquellenentfernung übereinstimmt, wenn als Testsignal eine mit natürlicher Lautstärke vorgetragene Sprache verwendet wird. Flüstern wird dagegen deutlich näher und Schreien deutlich ferner lokalisiert /Blau74/Dick97/.

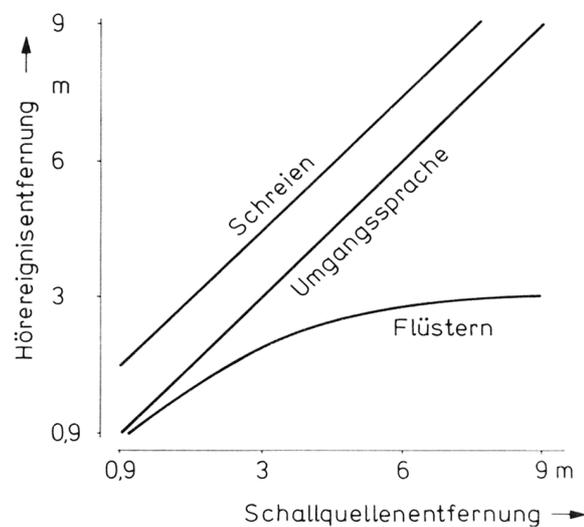


Bild 3.44: Hörereignisentfernung bei verschiedenen Sprechweisen /Blau74/Bega94/

Bei unvertrauten Geräuschen lässt sich bei Distanzen von über 3 m beobachten, dass die empfundene Entfernung des Hörereignisses nicht von der Schallquellenentfernung, sondern nur von der Lautstärke des Testsignals abhängt. Bei geringeren Entfernungen trifft dies ebenfalls für schmalbandige Signale zu, da die spektralen Signalveränderungen, die in diesem Entfernungsbereich auftreten, nur ausgewertet werden können, wenn ein entsprechendes Spektrum vorliegt /Blau74/.

Dass die Hörereignisentfernung unabhängig von der vorliegenden Schallquellenentfernung mit steigendem Ohrsignalpegel sinkt, konnte in mehreren Hörversuchen gezeigt werden. Bild 3.45 zeigt als Beleg hierfür die Ergebnisse eines Versuchs, bei dem für verschiedene Lautsprecherentfernungen (3 und 9m) nahezu identische Hörereignisentfernungen bei gleichen Schalldruckpegeln ermittelt wurden.

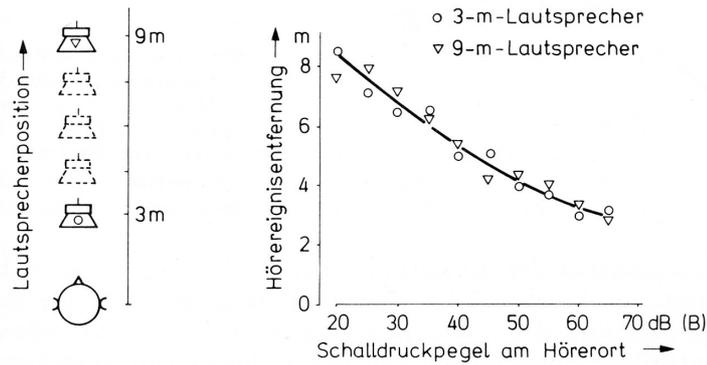


Bild 3.45: Abhängigkeit der Hörereignisentfernung vom Schalldruckpegel /Blau74/

Unter der Voraussetzung, dass der Schalldruckpegel das einzige verwertbare Schallereignismerkmal darstellt, konnte in mehreren Versuchen der Trend festgestellt werden, dass die Hörereignisentfernung deutlich hinter der Schallquellenentfernung zurückblieb. Zudem traten keine Hörereignisentfernungen über 10-15 m auf (akustischer Horizont). Bild 3.46 zeigt hierzu die in einem reflexionsarmen Raum bei verbundenen Augen mit einem Sprachsignal ermittelten Zuordnungen der Hörereignisentfernungen.

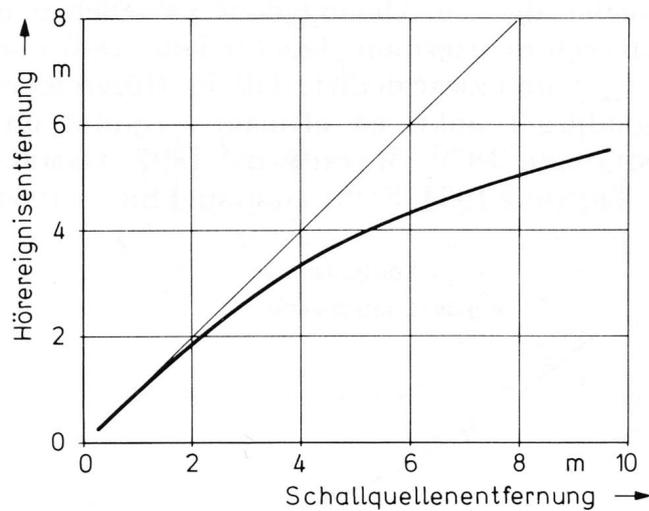


Bild 3.46: Zuordnung von Schallereignis- und Hörereignisentfernung /Dick97/

Die Entfernungsabschätzung im Freifeld ist eng mit der Charakteristik der Schallausbreitung verbunden. Gemäß dem Prinzip von Huygens und Frensel, nach dem jeder Punkt eines beliebigen Wellenfeldes als Quelle einer Kugelwelle aufgefasst werden kann, kommt dem Schallfeld des Elementarstrahlers, der auch als atmende Kugel bezeichnet wird, eine elementare Bedeutung zu. Die folgenden beiden Gleichungen liefern die mathematische Beschreibung des Schallfeldes einer atmenden Kugel, indem sie die funktionalen Zusammenhänge des Schalldrucks und der Schallschnelle in Abhängigkeit von der Zeit und der Entfernung von der Schallquelle aufzeigen. Hierbei ist ρ_0 die Dichte des Mediums.

$$p(t, r) = \operatorname{Re} \left\{ \operatorname{const} \cdot \frac{j2\Pi f \rho_0}{r} e^{j2\Pi f t} e^{-j2\Pi r / \lambda} \right\} ;$$

$$v(t, r) = \operatorname{Re} \left\{ \operatorname{const} \cdot \left(\frac{j2\Pi / \lambda}{r} + \frac{1}{r^2} \right) e^{j2\Pi f t} e^{-j2\Pi r / \lambda} \right\}$$

Dem ersten mathematischen Ausdruck ist zu entnehmen, dass mit wachsender Entfernung der Schalldruck um den Faktor $1/r$ abfällt. Für die Schallschnelle gilt hingegen, dass der Faktor, mit dem die Schallschnelle abnimmt, von dem Verhältnis der Wellenlänge zum Abstand bestimmt wird. Mit wachsender Entfernung gewinnt der Faktor $1/r$ an Bedeutung und für Werte deutlich über $2\pi/\lambda$ dominiert er sogar den Abfall der Schallschnelle. Für geringe Distanzen gewinnt hingegen der Faktor $1/r^2$ zunehmend an Bedeutung und dominiert für Werte deutlich unter $2\pi/\lambda$. Dieser Zusammenhang ist in Bild 3.47 verdeutlicht. Aus der Abbildung geht ebenso hervor, dass im Fernfeldbereich eine Entfernungsverdopplung einem Lautstärkepegelabfall von 6 dB entspricht.

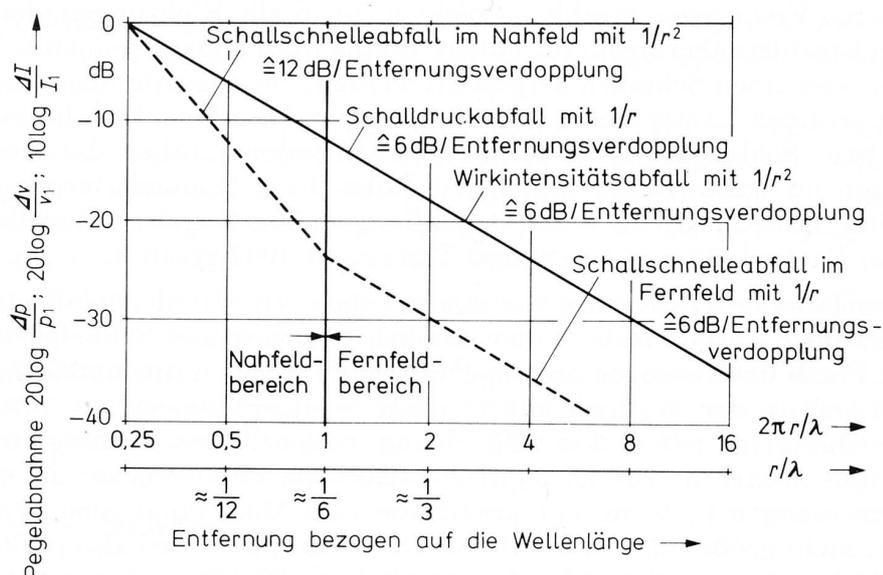


Bild 3.47: Schalldruck, -schnelle und -wirkintensitätsabnahme im Nah- und Fernfeld eines Kugelstrahlers 0. Ordnung /Blau74/

In einer Reihe von Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass es in einem reflexionsarmen Raum nicht ausreicht, den Lautstärkepegel um 6 dB herabzusetzen, um die Hörereignisentfernung zu verdoppeln. Eine Halbierung der Lautheit entspricht dagegen in etwa dem Empfinden, das Hörereignis sei doppelt so weit entfernt (Bild 3.48) /Bega94/. Auf die Beziehung zwischen der empfundenen Lautheit und dem Lautstärkepegel wird im Zusammenhang mit dem im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Hörtest näher eingegangen. An dieser Stelle sei zur Erläuterung von Bild 3.48 jedoch angemerkt, dass in einem Frequenzbereich von 400 – 5000 Hz und einem Lautstärkepegel von 40-100 dB eine Halbierung der Lautheit etwa einem um 10 dB verringerten Schallpegel entspricht. Diese Vereinfachung gilt für schmalbandige und tonale Signale. Für breit-

bandige Signale trifft dies nicht zu, da hierbei die Verdeckungseffekte zu berücksichtigen sind.

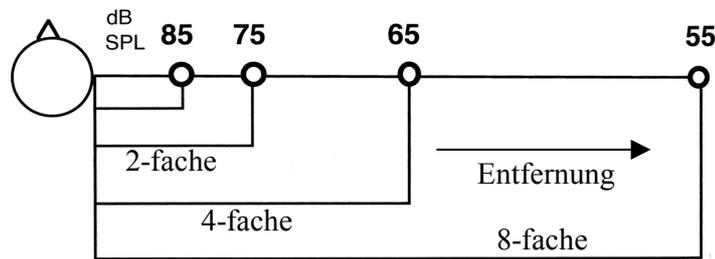


Bild 3.48: Lautheitsmodell der Hörereignisentfernung im Freifeld /Bega94/

Bei Schallquellen in größerer Entfernung ist die Luftdämpfung zu berücksichtigen, die, neben der inneren Reibung und der Wärmeleitung in der Luft, vor allem von den intermolekularen Verlusten bestimmt wird, die auf einer Hysteresis-Wirkung am 2-atomigen Sauerstoffmolekül beruhen /Henn99/. Das Luftabsorptionsmaß ist proportional zum Schallquellenabstand. Der Dämpfungskoeffizient ist abhängig von der Frequenz der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur. Bild 3.49 zeigt das Luftabsorptionsmaß bei einer Schallquellenentfernung von 10 Metern für verschiedene Frequenzen in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit.

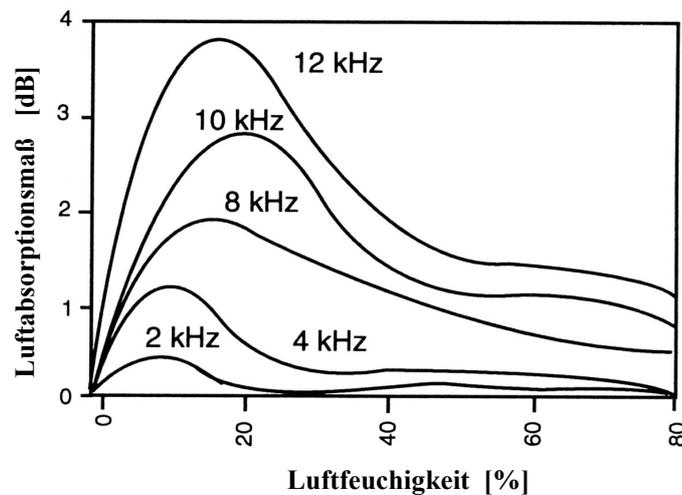


Bild 3.49: Luftabsorptionsmaß für verschiedene Frequenzen in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit /Bega94/

Die genannten Faktoren, die einen Einfluss auf die Luftdämpfung haben, unterliegen sowohl räumlichen als auch zeitlichen Schwankungen, so dass die mit der Luftdämpfung einhergehende Spektralveränderung nur einen recht unverlässlichen Faktor für die Entfernungswahrnehmung darstellt. Dass dieser Faktor dennoch bei der Bildung der Hörereignisentfernung eine Rolle spielt, konnte in Hörversuchen gezeigt werden, in denen eine Signalfilterung die Hörereignisentfernung entsprechend verändert hat. /Bega94/.

In einem reflexionsarmen Raum nimmt der Schallpegel mit der Entfernung deutlich stärker ab als in akustischen Umgebungen, bei denen erste Reflexionen (ER: *Early Reflections*) und Nachhall (LR: *Late Reverberation*) auftreten. Bild 3.50 verdeutlicht diesen Zusammenhang durch die Gegenüberstellung einer Schallpegelabnahme im Freifeld mit einer Schallpegelabnahme in einem etwa 14m² großem Raum. Die Daten wurden hierbei mit Hilfe eines Computerprogramms zur Simulation der Schallausbreitung in geschlossenen Räumen erzeugt /Bega94/.

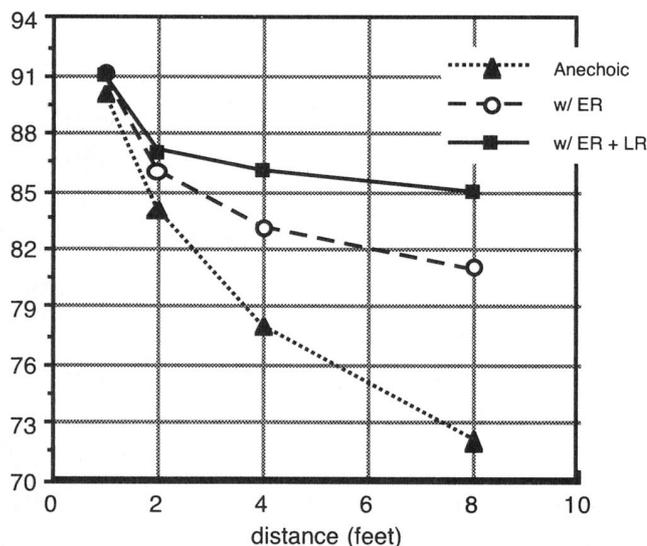


Bild 3.50: Schallpegelabnahme unter verschiedenen akustischen Bedingungen - Vergleich zwischen der in einem Freifeld und in einem etwa 14m² großen Raum auftretenden Schallpegelabnahme /Bega94/

Aufgrund der verhältnismäßig geringen Schallpegelabnahme spielt das Lautheitskriterium für die Abschätzung der Hörereignisentfernung in geschlossenen Räumen eine eher untergeordnete Rolle. Als sehr bedeutend für das Entfernungshören gilt hingegen das Verhältnis von diffusem zu direktem Schall. In Schallquellennähe dominiert der Direktschall, dessen Pegel mit der Entfernung von der Schallquelle abnimmt, wohingegen der Diffusschallpegel in einem geschlossenen Raum als nahezu konstant anzusehen ist. Mit dem Hallabstand bzw. Hallradius wird in diesem Zusammenhang derjenige Abstand von der Schallquelle angegeben, bei der die Schalldruckpegel von direktem und diffusem Schallfeld gleich groß sind. Er berechnet sich mit der Nachhallzeit T und dem Raumvolumen V aus:

$$r_H = 0,057 \sqrt{\frac{V}{T}}$$

Wenn man berücksichtigt, dass die Schallabstrahlung einer Schallquelle oft stark gerichtet ist, ergibt sich eine als effektiver Hallabstand bezeichnete Schallquellenentfernung:

$$r_{\text{Heff}} = 0,057 \sqrt{\gamma} \sqrt{\frac{V}{T}}$$

Hierbei bezeichnet γ den Bündelungsgrad der Schallquelle, der bei einigen Schallquellenarten, z.B. bei Musikinstrumenten, stark frequenzabhängig ist /Dick97/.

Die Raumakustik lässt sich messtechnisch durch eine Raumimpulsantwort zwischen zwei Punkten innerhalb eines Raumes beschreiben. Bild 3.51 zeigt, dass sich das über der Zeitachse aufgetragene, mit einer Messkapsel an einem bestimmten Raumpunkt aufgenommene Signal in die Bereiche Direkt-schall, erste Reflexionen und diffuser Nachhall einteilen lässt. Die Nachhallzeit T ist als Zeitabschnitt definiert, in dem der Schalldruckpegel nach Aussenden des Schallimpulses um 60dB abfällt.

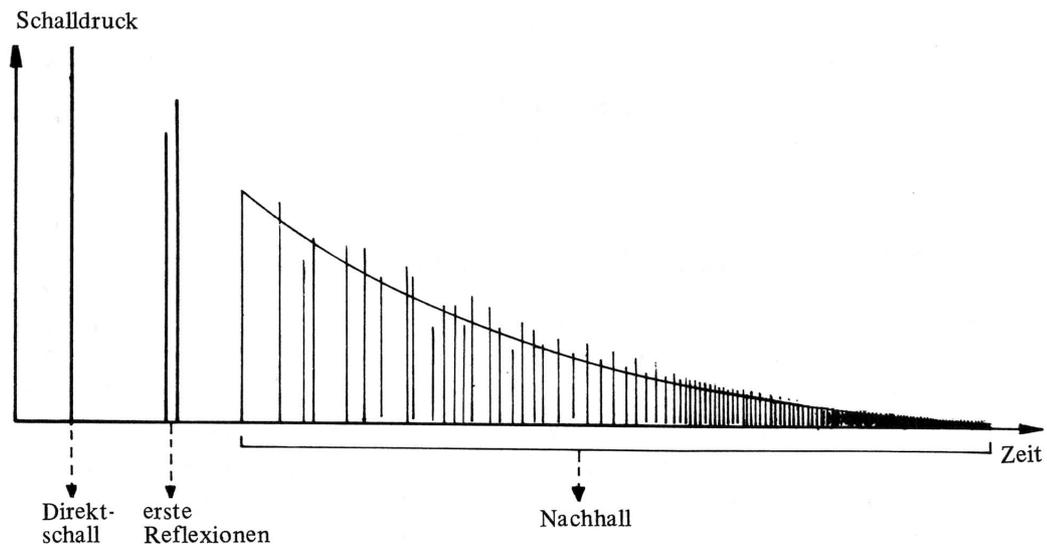


Bild 3.51: Zeitliche Folge der Reflexionen in einem Raum bei Impulsschall /Dick97/

Die Lokalisation wird von der Vertrautheit der Hörumgebung beeinflusst. Liegen gewohnte Hörumgebungen vor, so ist die Abweichung zwischen Hörereignis- und Schallquellenentfernung weitaus geringer als in Umgebungen mit ungewohnter Raumakustik /Bölk97/. In ungewohnten Hörumgebungen verbessert sich die Raumwahrnehmung im Laufe der Zeit, was auf einen einsetzenden Lernprozess zurückzuführen ist. Hörumgebungen können aufgrund ihrer spezifischen Raumimpulsantwort wiedererkannt werden, so dass die Raumakustik nicht nur für die Entfernungs-, sondern auch für die Umgebungswahrnehmung von Bedeutung ist.

3.4.3.2 Monaurale und binaurale Faktoren in unmittelbarer Nähe einer Schallquelle

In Schallquellennähe treten bei seitlichem Schalleinfall neben den monauralen auch binaurale Faktoren auf, die von der Schallquellenentfernung abhängen. Diese Entfernungsabhängigkeit steht im Zusammenhang mit der im vorherigen Kapitel dargelegten Schallausbreitung eines Kugelstrahlers und dem frequenzabhängigen Übergang vom Nah- in den Fernbereich. Begrifflich wird dieser entfernungsabhängige Einfluss auf die Außenohrübertragungsfunktion als binaurale Parallaxe bzw. Gehörparallaxe (*Auditory Parallax*) bezeichnet /Bega00/. Für einen Abstand von mehr

als einem Meter vom Kopfmittelpunkt gelten die interauralen Merkmalsunterschiede als entfernungsunabhängig.

In der Fachliteratur wird die Bedeutung der binauralen Faktoren für die Entfernungseinschätzung von vielen Autoren als gering eingestuft, da sich die Entfernungswahrnehmung bei seitlicher Schalleinfallrichtung im Vergleich zu frontal, in der Medianebene präsentierten Signalen nicht signifikant verbessert /Bega00/. Andererseits wurde erst vor kurzem damit begonnen, das räumliche Hören in unmittelbarer Nähe einer Schallquelle genauer zu untersuchen, da viele Wissenschaftler die Faktoren des räumlichen Hörens für diesen Entfernungsbereich als noch nicht hinreichend geklärt ansehen.

Bild 3.52 verdeutlicht, dass sich in unmittelbarer Nähe der Schallquelle die Art des Schallpegelabfalls mit der Entfernung deutlich verändert. Bei dieser Darstellung wird der effektive Schalldruck für die verschiedenen Entfernungen und Schalleinfallswinkel zu dem Wert in Bezug gesetzt, der sich bei einem Meter Entfernung von einer Schallquelle in Vorwärtsrichtung ergibt. Die Werte wurden analytisch bestimmt, wobei die Kopfform vereinfacht als kugelförmig angenommen wurde/Duda97/Shin00/. In der Grafik sind zusätzlich die in einem reflexionsarmen Raum empirisch ermittelten Werte für den frontalen und seitlichen Schalleinfall aufgetragen.

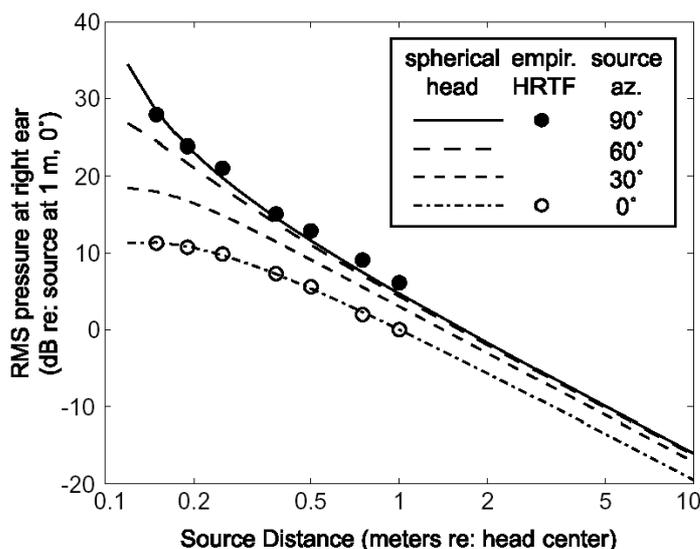


Bild 3.52: Relativer Schalldruckpegel in Abhängigkeit von der Schallquellenentfernung und Schalleinfallrichtung /Shin00/

Neben der Tatsache, dass der Schalldruckpegel als monauraler Faktor in unmittelbarer Nähe einer Schallquelle eine andere Charakteristik aufweist, ergeben sich bei seitlichem Schalleinfall, die in Bild 3.53 aufgetragenen interauralen Pegeldifferenzen, die stark von der Schallquellenentfernung und der Einfallrichtung abhängen. Auf die Bedeutung interauraler Pegeldifferenzen für die Richtungswahrnehmung wird im nächsten Kapitel eingegangen.

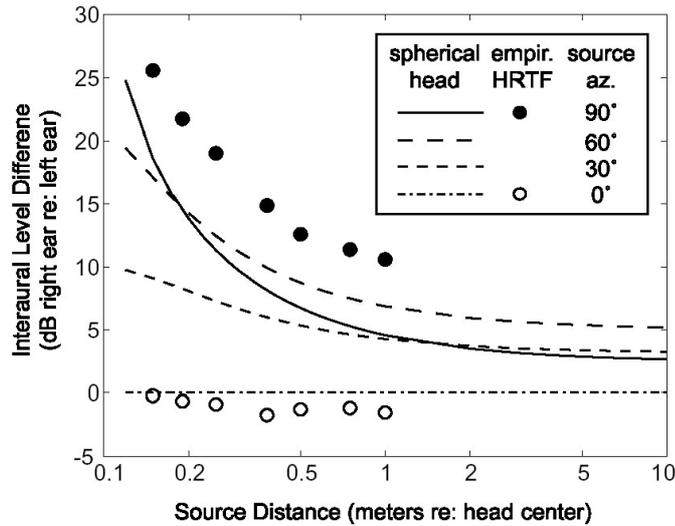


Bild 3.53: Interaurale Pegeldifferenz in Abhängigkeit von der Schallquellenentfernung und Schalleinfallrichtung /Shin00/

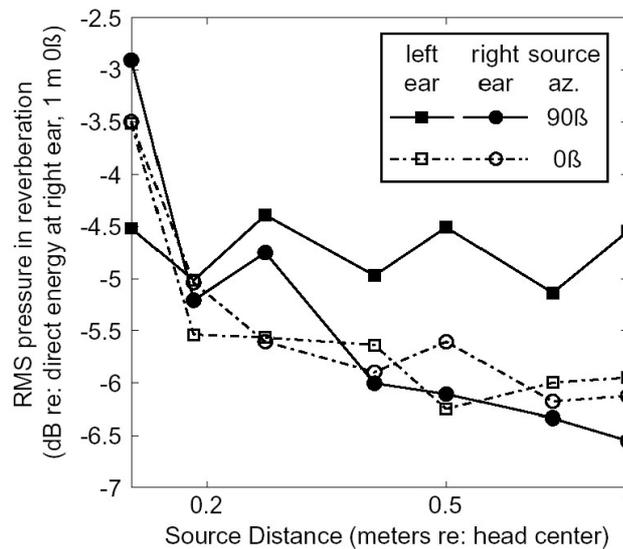


Bild 3.54: Relativer Diffusschalldruckpegel in Abhängigkeit von der Schallquellenentfernung und Schalleinfallrichtung /Shin00/

Der in geschlossenen Räumen dominante monaurale Faktor der Entfernungswahrnehmung (siehe oben), der sich aus dem Verhältnis von Diffusschall- zum Direktschallpegel ergibt, ist in veränderter Form auch in unmittelbarer Entfernung zur Schallquelle gültig. Die Faktorabweichungen ergeben sich für diesen Entfernungsbereich zum einen aus der bereits dargelegten veränderten Charakteristik der Schallpegelabnahme des Direktschalls. Zum anderen ist der Diffusschallpegel nicht konstant, sondern verändert sich innerhalb dieses Entfernungsbereichs mit dem Schallquellenabstand und der Schalleinfallrichtung (Bild 3.54). Für die genannten Faktoren Schallpegel, interaurale Pegeldifferenz und Verhältnis von Diffusschall- zum Direktschallpegel konnten Einflüsse auf die Entfernungswahrnehmung nachgewiesen werden. Für die ebenfalls vorhandenen spektralen Verfärbungen der Außenohrübertragungsfunktion in diesem Entfernungsbereich trifft dies jedoch nicht zu.

3.4.4 Faktoren der Richtungswahrnehmung

3.4.4.1 Monaurale Faktoren

Für das Richtungshören ergeben sich aus der Darstellung der Außenohrübertragungsfunktion im Zeit- und Frequenzbereich zwei verschiedene monaurale Faktoren. Zum einen zeigt der Vergleich zweier Impulsantworten, dass sich aufgrund der Richtungsänderung der Schallquelle deutliche Änderungen im Signalverlauf der Impulsantworten ergeben (Bild 3.36). Die Veränderung der zeitlichen Feinstruktur der Impulsantwort wird als monaural zeitlicher Faktor bezeichnet. Die durch Phasenverschiebungen bedingte, zeitliche Feinstrukturänderung ist in einer natürlichen Hörumgebung mit einer Änderung des Frequenzspektrums (monaural spektraler Faktor) verknüpft. Da das Tragen eines Kopfhörers die natürlichen Lokalisierungs- und Filtermechanismen ausschaltet, kann der Einfluss der beiden Faktoren auf die Ortung durch Einspielung entsprechend manipulierter Impulsantworten getrennt voneinander untersucht werden. Aus den Ergebnissen entsprechender Hörversuche lässt sich schließen, dass der monaural zeitliche Faktor nicht zur Lokalisation beiträgt, da eine alleinige zeitliche Feinstrukturänderung die Ortung der Schallquellenposition nicht beeinflusst /Kist89/.

Ferner gilt, dass die bei veränderter Schalleinfallrichtung auftretenden spektralen Veränderungen nur für hohe Frequenzen relevant sind, so dass sich nur bei einem ausreichenden Frequenzinhalt des Quellspektrums und einer genügenden Hörempfindlichkeit eine Bedeutung für den monaural spektralen Faktor ergibt. Darüber hinaus ist die Signalvertrautheit als Einflussfaktor zu nennen. Dass es trotz dieser Einschränkungen möglich ist, Schallquellen monaural zu orten, verdeutlicht Bild 3.55, in dem die Lokalisation und Lokalisationsunschärfe für den Fall eines einseitigen Hörverlustes aufgetragen sind.

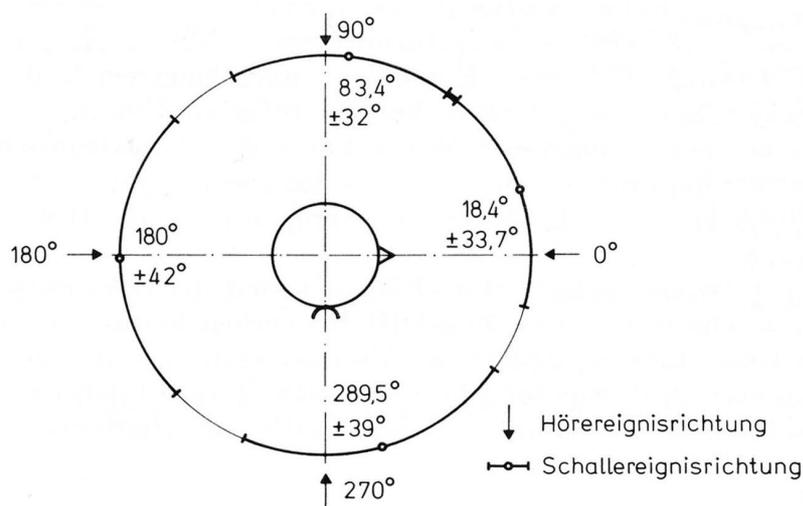


Bild 3.55: Lokalisation und Lokalisationsunschärfe in der Horizontalebene bei einseitigem Hörverlust /Blau74/

3.4.4.2 Binaurale Faktoren

Beim binauralen Hören liegen zeitgleich zwei Außenohrimpulsantworten vor, aus deren Vergleich sich für die räumliche Wahrnehmung bedeutende Faktoren ableiten lassen. Die interauralen Laufzeit- und Intensitätsdifferenzen werden vorwiegend zur Bestimmung des Azimuts genutzt, wohingegen richtungsabhängige Änderungen des Spektrums zur Einschätzung von Elevation und Distanz sowie zum Auflösen von Mehrdeutigkeiten herangezogen werden. Begrifflich lassen sich die drei genannten Faktoren auch nach den zugrunde liegenden binauralen Hörtheorien unterscheiden in:

- Laufzeittheorie
- Intensitätstheorie
- Klangtheorie

Die interaurale Laufzeitdifferenz, die im angelsächsischen Raum mit ITD für *Interaural Time Difference* abgekürzt wird, resultiert daraus, dass bei einer seitlich versetzten Schallquelle der Schallübertragungsweg für beide Ohren unterschiedlich lang ist. Für den Fall, dass der Schalleinfall als parallel angesehen wird – was voraussetzt, dass die Schallquelle genügend weit entfernt ist - lässt sich die Laufzeitdifferenz, wie Bild 3.56 verdeutlicht, folgendermaßen berechnen:

$$\text{ITD} = \frac{D}{2c} (\theta + \sin\theta) ; -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ; \quad c : \text{Schallgeschwindigkeit}$$

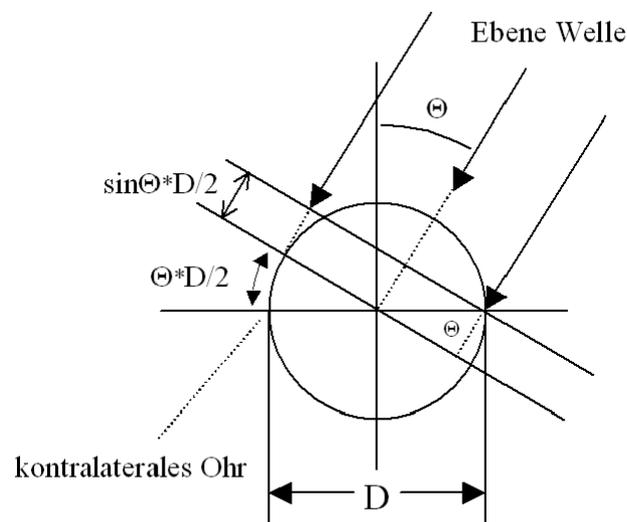


Bild 3.56: Interauraler Laufzeitunterschied (paralleler Schalleinfall)

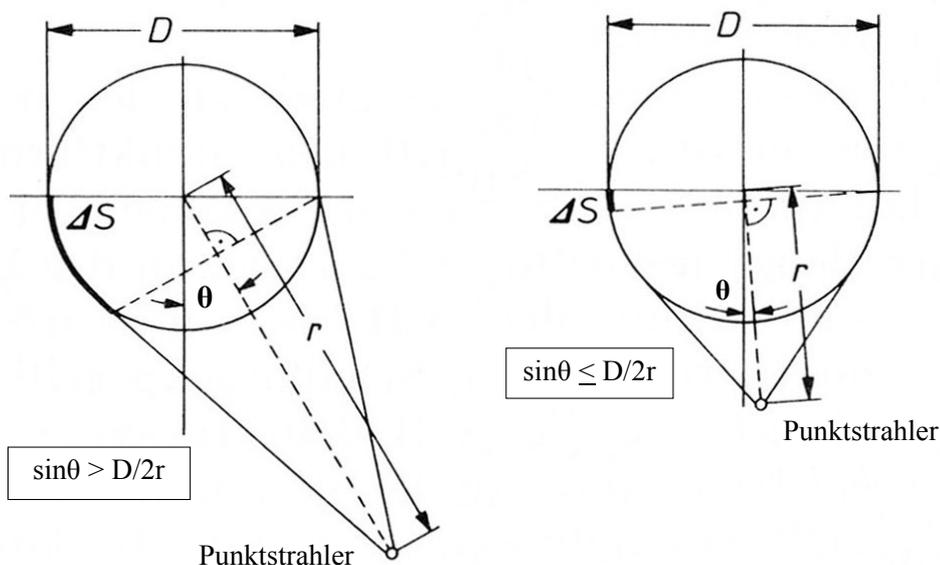


Bild 3.57: Interauraler Laufzeitunterschied (Punktstrahler in Kopfnähe) /Blau72/

Zur Bestimmung des Laufzeitunterschieds eines Punktstrahlers in Kopfnähe ist danach zu unterscheiden, ob der Schall ein Ohr auf direktem Weg erreicht oder nicht (Bild 3.57). Ist dies der Fall, so gilt mit

$$n = \frac{r - D/2}{D} \quad \text{und} \quad \varepsilon = \arcsin\left(\frac{D}{2r}\right) :$$

$$\text{ITD} = \frac{\Delta S}{c} = \frac{D}{c} \left[\left(n + \frac{1}{2}\right) \cos \varepsilon + \frac{1}{2} (\theta + \varepsilon) - \sqrt{n^2 + n + \frac{1}{2} - \left(n + \frac{1}{2}\right) \sin \theta} \right]$$

Können beide Ohren nur auf indirektem Weg erreicht werden, so gilt $\sin \theta \leq D/2r$ und die Rechnung vereinfacht sich zu:

$$\text{ITD} = \frac{\Delta S}{C} = \frac{D}{C} \theta ; \quad -90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$$

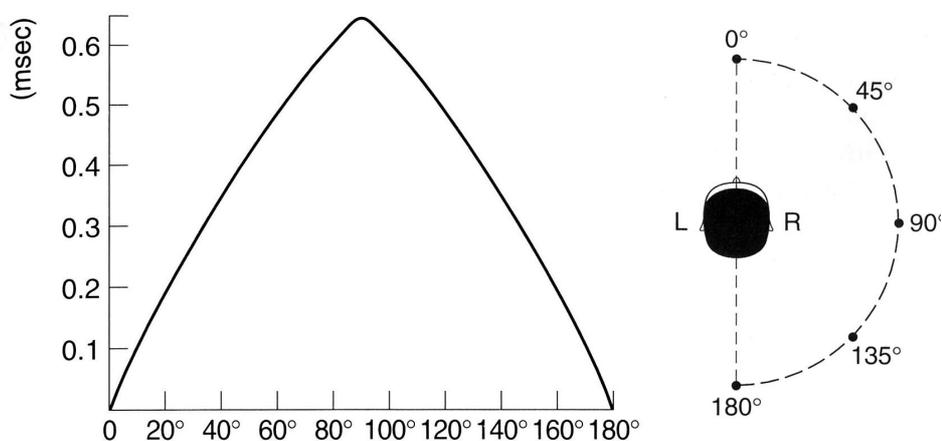


Bild 3.58: Interaurale Laufzeitdifferenz /Matl97/

Je nach Position der Schallquelle, ob direkt vor, hinter oder weit links bzw. rechts vom Hörenden, kann die interaurale Laufzeitdifferenz Werte zwischen 0 bis 0,63 ms annehmen (Bild 3.58). Der genaue Wert ist hierbei nicht nur von der Richtung, sondern auch von der individuellen Größe und Form des Kopfes abhängig.

Ausgehend von einem durchschnittlichen Kopfdurchmesser eines Erwachsenen manifestiert sich die interaurale Laufzeitdifferenz für Schallsignale mit einer Frequenz unterhalb von 1,5 kHz in einer Phasenverschiebung zwischen den an beiden Ohren auftreffenden Signalen. Aufgrund der zu kleinen Wellenlänge im Verhältnis zur Kopfgröße kann diese Information für hohe Frequenzen nicht eindeutig ausgewertet werden. Anstelle der Phasenverschiebung wird in diesem Frequenzbereich aufgrund der zeitlichen Verzögerung der Amplitudenhüllkurve (*Envelope Difference*) die interaurale Laufzeitdifferenz wahrgenommen.

Dieser Zusammenhang wird auch in Bild 3.59 deutlich, in dem die für eine Person gemessenen interauralen Phasendifferenzen für verschiedene Azimutwinkel (0-120° in 30° Schritten) der Quellrichtung über der Frequenz aufgetragen sind. Die fett gedruckten Linien zeigen hierbei den mathematischen Zusammenhang zwischen Phasenverschiebung und Zeitdifferenz auf. Bei einem Azimutwinkel von 90° steigt die Phasenverschiebung mit der Frequenz am stärksten an, so dass bei einem Grenzwert von 360° nur ein relativ geringer Frequenzbereich für eine eindeutige Phasenunterscheidung zur Verfügung steht.

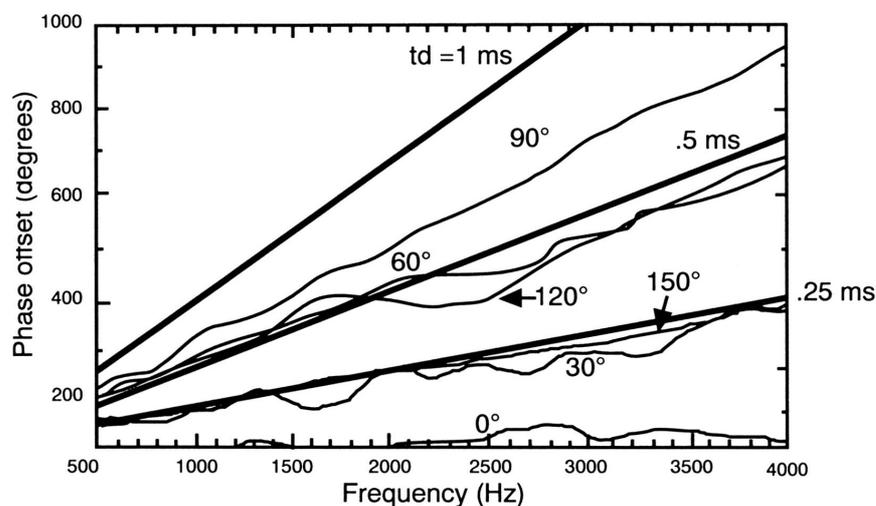


Bild 3.59: Interaurale Phasendifferenzen in Abhängigkeit von Frequenz und Azimutwinkel /Bega94/

Wie Bild 3.60 zeigt, ist die Quellenpositionszuordnung auch bei einer gegebenen interauralen Laufzeitdifferenz nicht eindeutig, sondern derart entfernungs- und richtungsvariabel, dass sich für die möglichen Quellenpositionen ein um die Hörachse symmetrischer Kegel ergibt. Diese Mehrdeutigkeitsproblematik wird allgemein unter dem Schlagwort *Cone of Confusion* zusammengefasst.

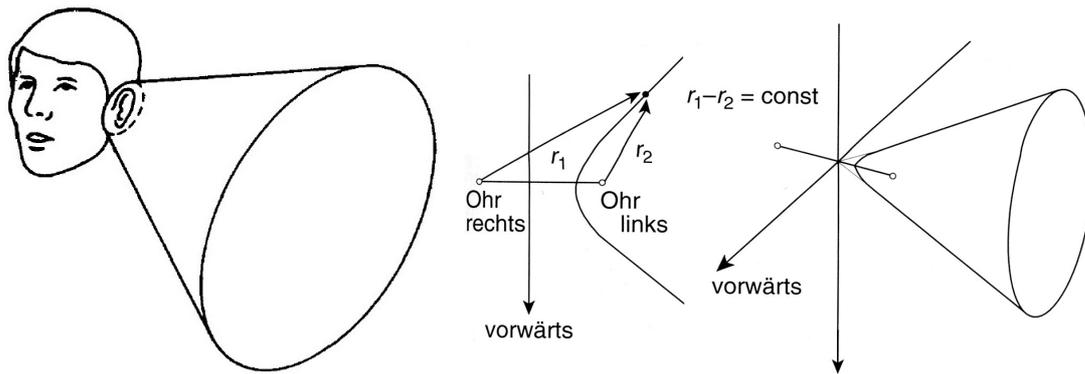


Bild 3.60: Cone of Confusion /Moor95/

Dass sich die Orte mit gleicher interauralen Laufzeitdifferenz tatsächlich in erster Annäherung auf einer symmetrischen Kegeloberfläche befinden, lässt sich anhand der in Bild 3.61 dargestellten Kurven gleicher interauraler Zeitdifferenzen belegen, die in einem zeitlichem Abstand von $50 \mu\text{s}$ empirisch bestimmt wurden.

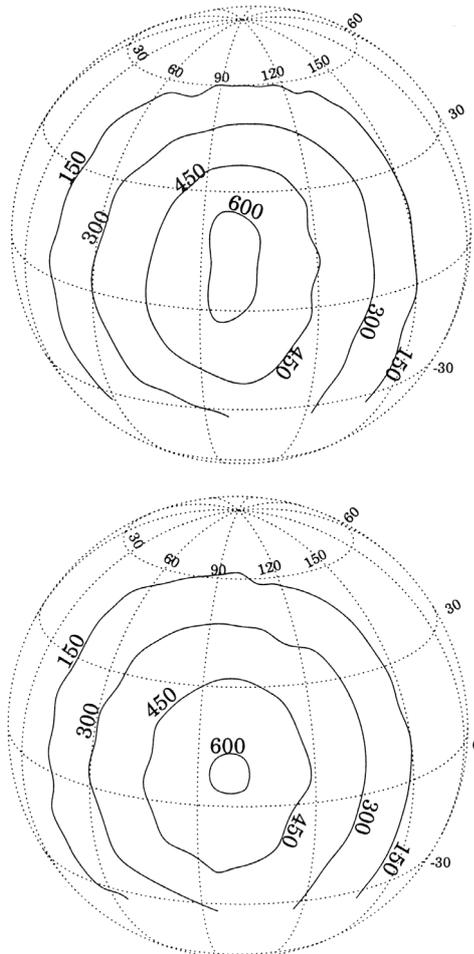


Bild 3.61: Kurven gleicher interauraler Zeitdifferenzen zweier Versuchspersonen /Gilk97/

Wenn berücksichtigt wird, dass die Ohren aus der Mitte um etwa 10° nach hinten verschoben sind /Blau97/, ergibt sich rechnerisch mit einem Kugelmodell bereits eine recht

realistische Annäherung an die tatsächlich auftretende Laufzeitdifferenz. Nähert sich die Kugelform einer Ellipse, bei gleichzeitiger Korrektur der Ohrposition nach unten, ergibt sich ein Modell, das zum einen die in Bild 3.61 gezeigten Kurven gleicher interauraler Zeitdifferenzen besser nachbildet und zum anderen berücksichtigt, dass nicht nur der Azimutwinkel, sondern auch der Elevationswinkel des Schalleinfalls einen, wenn auch geringen, Einfluss auf diese Größe ausübt /Duda98/.

Für den interauralen Intensitätsunterschied, der je nach Schallquellenposition bis zu 20dB betragen kann (Bild 3.62), ergibt sich bezüglich der Schallquellenzuordnung prinzipiell die gleiche Form der Mehrdeutigkeit wie bei der interauralen Zeitdifferenz. Da die Intensitätsdifferenz jedoch stark frequenzabhängig ist, sind die Orte mit gleicher interauraler Pegeldifferenz von Frequenzband zu Frequenzband verschieden.

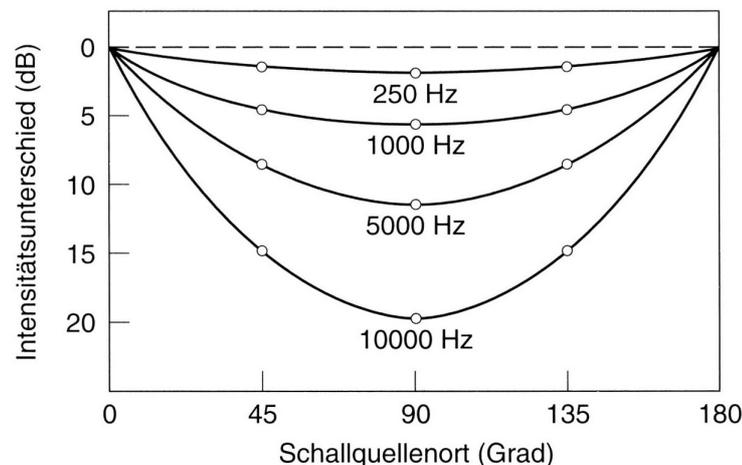


Bild 3.62: Interaurale Pegeldifferenz /Gold97/

Die Frequenzabhängigkeit der interauralen Pegeldifferenz, die im angelsächsischen Raum mit *ILD* (*Interaural Level Difference*) abgekürzt wird, ergibt sich zum einen aus dem sich mit der Frequenz stark ändernden Größenordnungsverhältnis der Wellenlänge zu den Abmaßen von Kopf und Außenohr. Zum anderen bewirkt die dreidimensionale Form von Kopf, Ohrmuschel, Schulter und Oberkörper eine richtungsabhängige spektrale Färbung, die einer frequenzabhängigen Pegeländerung entspricht. Die interaurale Intensitätsunterschiedsschwelle liegt unterhalb von 1,5 kHz bei etwa 3dB. Oberhalb dieser Frequenz beträgt sie hingegen nur etwa 1 dB, was die Bedeutung der interauralen Pegeldifferenz für die Lokalisation hoher Frequenzen unterstreicht.

Der Kopfschatteneffekt (*Head Shadow*) meint in diesem Zusammenhang, dass Schallwellen bei einer seitlichen Verschiebung der Quelle das abgewandte sog. "kontralaterale Ohr" mit einer geringeren Intensität erreichen. Die Tatsache, dass der akustische Schatten nur bei höheren Frequenzen auftritt und die Schattenform von der Schallbeugung am Kopf bestimmt wird, zeigt Bild 3.63.

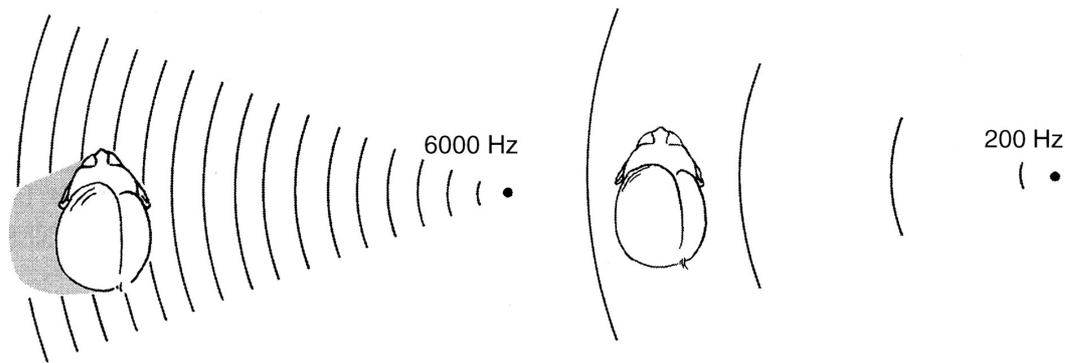


Bild 3.63: Der für hohe Frequenzen am Kopf entstehende Schallschatten /Gold97/

Die frequenzabhängige Schallbeugung ebener Wellen am Kopf entspricht annäherungsweise der an einer Kugel. Die spektralen Verfärbungen, die sich durch die Schallbeugung an einer Kugel ergeben, sind Bild 3.64 und 3.65 zu entnehmen, in denen die Pegel der Impulsantworten verschiedener Einfallrichtungen über der Frequenz aufgetragen sind. Bild 3.64 zeigt hierbei das Ergebnis einer analytischen Berechnung unter der Voraussetzung, dass die Punktschallquelle im Unendlichen liegt und die Kugel unelastisch ist /Duda98/. Der Nullpegel entspricht hierbei dem Pegel, der bei Abwesenheit der Kugel (Freifeld) vorläge. Der Frequenzbereich ist zugunsten einer von der Kugelgröße unabhängigen Darstellung normiert aufgetragen.

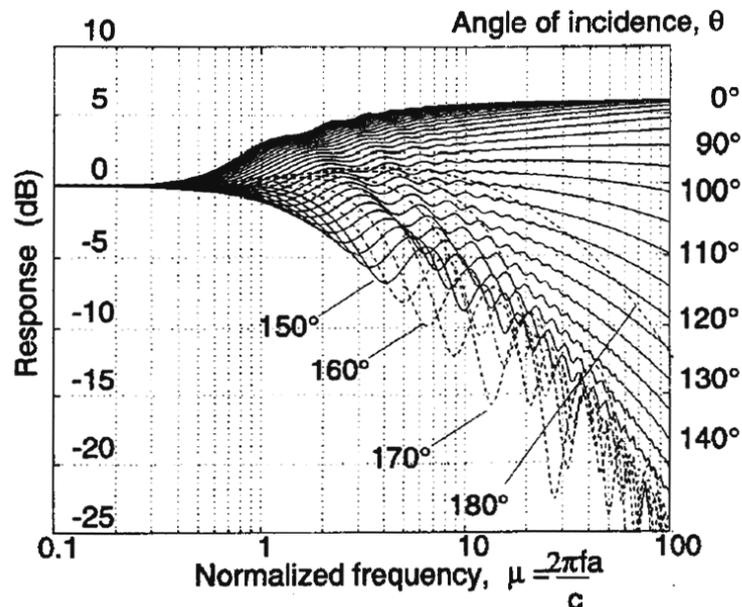


Bild 3.64: Analytisch bestimmte Freifeldübertragungsfunktionen einer Kugel /Duda97/

Bei dem Vergleich der verschiedenen Freifeldübertragungsfunktionen zeigt sich, dass sich erst Unterschiede zwischen den Kurvenverläufen ergeben, wenn die normierte Frequenz deutlich über 0,5 liegt. Übertragen auf einen Durchschnittswert von 17,5 cm für den Kopfdurchmesser eines Erwachsenen ergibt sich eine Frequenz von ca. 310 Hz, unterhalb der absolut keine Abschattung stattfindet. Mit zunehmender Frequenz werden die Unterschiede zwischen den verschiedenen Einfallrichtungen immer gravierender,

wobei auffällt, dass ab einem Winkel von 150° die Pegel nicht weiter abfallen und es bei 180° (*Bright Spot*) zu einem starken Anstieg kommt. Die in Bild 3.65 gegenübergestellten, berechneten und gemessenen Freifeldübertragungsfunktionen zeigen, dass die analytischen Berechnungen mit den Impulsantworten eines in einer Bowlingkugel eingelassenen Messmikrofons weitestgehend übereinstimmen.

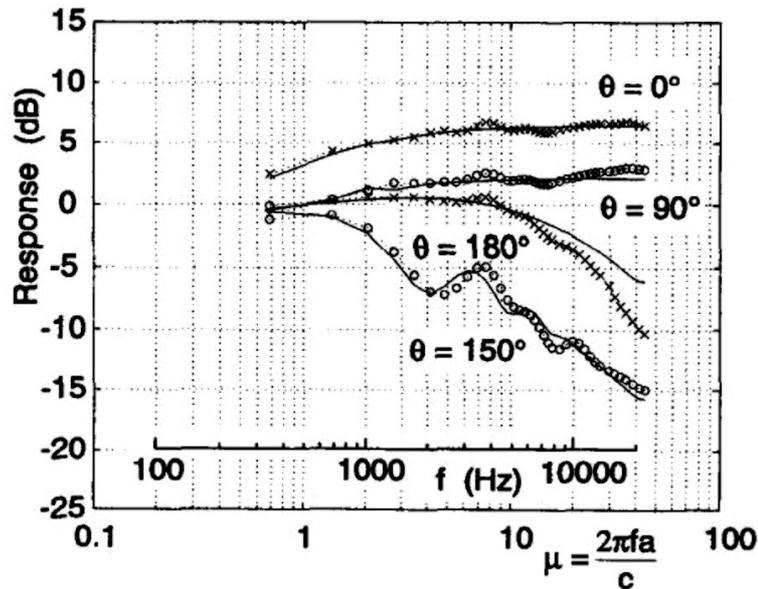


Bild 3.65: Berechnete und gemessene Freifeldübertragungsfunktion im Vergleich /Duda97/

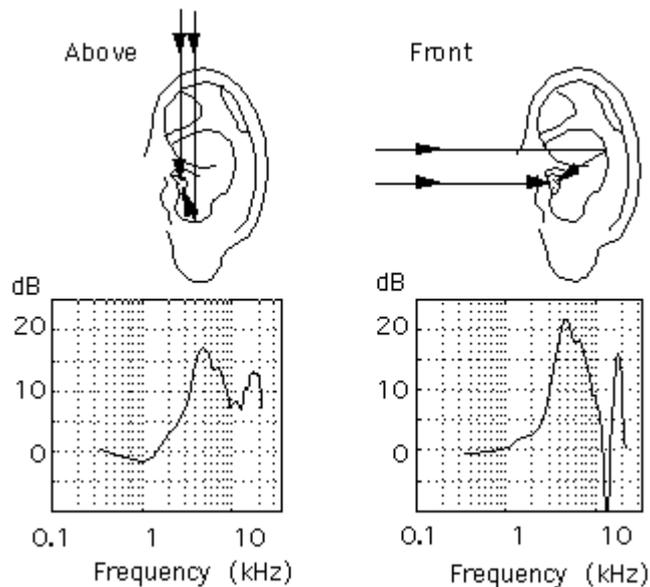


Bild 3.66: Pinna Response /Bega94/

Bei Frequenzen von 2 kHz und größer kommt es zu einem durch die Formgebung des Außenohrs bedingten Effekts, der sich für die Bestimmung des Azimut- und Elevationswinkels als bedeutend erwiesen hat. Dieser Effekt (*Pinna Response*) führte Batteau in einer Veröffentlichung von 1960 auf die stark richtungsabhängige Reflektoreigenschaft des Außenohrs zurück (Bild 3.66). Er nahm an, dass ein bestimmtes von Azimut- und

Elevationswinkel abhängiges Echomuster entsteht, aus denen das menschliche Gehirn die Schalleinfallrichtung dekodiert. Hebrank und Wright konnten 14 Jahre später nachweisen, dass aufgrund der beschränkten zeitlichen Auflösung des auditiven Kanals nicht die Echomuster, sondern die damit korrespondierenden spektralen Verfärbungen ausgewertet werden. Die Richtungswahrnehmung basiert hierbei im Wesentlichen auf einem permanenten Frequenzspektrumsvergleich zwischen den an beiden Ohren auftretenden Schallsignalen.

Wenngleich von geringerer Bedeutung, so konnte dennoch in Hörversuchen für einen Frequenzbereich zwischen 0,8-1,2 kHz ein Schulter-Reflexions-Effekt (*Shoulder Echo*) nachgewiesen werden, der sich für vertraute Geräusche sowohl auf die Elevations- als auch die Azimutbestimmung auswirkt. Zurückgeführt wird dieser Effekt auf die Wahrnehmung der je nach Position der Schallquelle auftretenden Zeitverzögerung und Frequenzänderung des an der Schulter reflektierten Signals. Ähnliches gilt für den Oberkörper, dessen Bedeutung für die richtungsabhängige Signalbeeinflussung jedoch als gering einzustufen ist

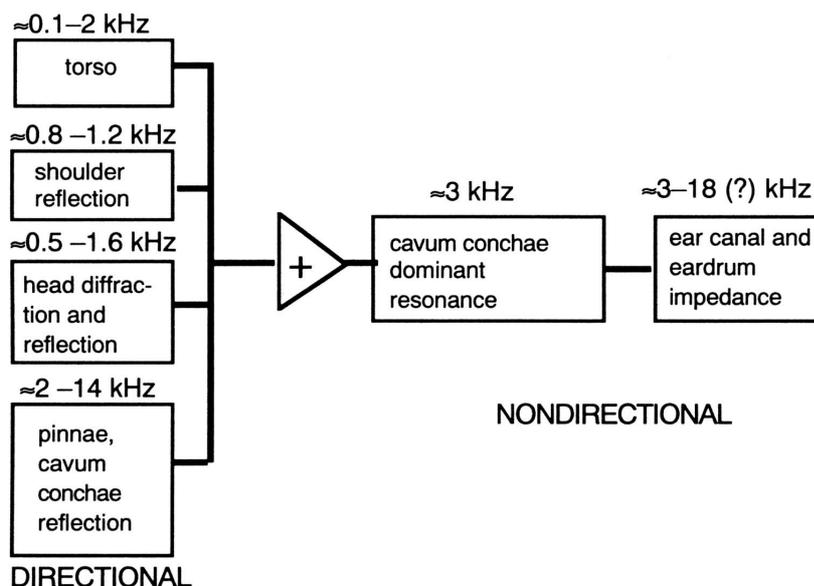


Bild 3.67: Richtungsabhängige und -unabhängige Komponenten der räumlichen Wahrnehmung /Bega94/

Bild 3.67 enthält eine Übersicht über die erläuterten, richtungsabhängigen Komponenten der räumlichen Wahrnehmung. Wie der Abbildung zu entnehmen ist, existieren neben den bereits beschriebenen richtungsabhängigen Komponenten der räumlichen Wahrnehmung, die entsprechend ihrer Bedeutung von oben nach unten im linken Teil der Grafik angeordnet sind, auch signalbeeinflussende Faktoren, die nicht von der Schalleinfallrichtung abhängen. Zu nennen sind hierbei die Cavum concha und der äußere Gehörgang. Die Cavum concha ist die zentrale Höhle am Eingang zum äußeren Gehörgang. Sie nimmt eine Doppelrolle ein, da ihr Einfluss sowohl richtungsabhängig als auch -unabhängig ist. Richtungsabhängig ist sie als Bestandteil des Außenohrs anzusehen. Von der Schalleinfallrichtung unabhängig ist hingegen ihre Eigenschaft als

Resonator mit kreisrunder Öffnung. Der äußere Gehörgang weist aufgrund seiner röhrenartigen Form mit einer mittleren Länge von 2,5 cm und einem Durchmesser von 7-8 mm ein Übertragungsverhalten auf, das von einer starken Resonanz um 4 kHz geprägt ist (Bild 3.68).

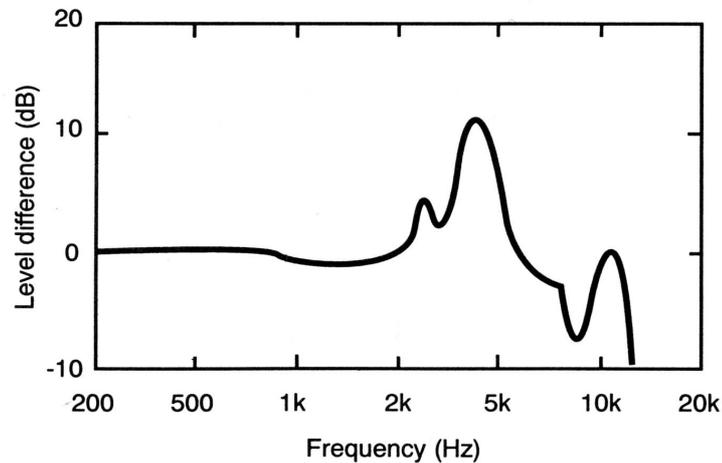


Bild 3.68: Übertragungsverhalten des äußeren Gehörgangs /Bega94/

Die Schallausbreitung im Gehörgang kann annäherungsweise mit der in einem Rohr verglichen werden, das auf der einen Seite durch die Ohrmuschel und auf der anderen durch das Trommelfell begrenzt ist. Für Frequenzen unterhalb von 7 KHz kann die Trommelfellimpedanz annähernd als unendlich groß angesehen werden, so dass sich das Modell eines schallhart abgeschlossenen Rohrs ergibt. Wie bei gedeckten Orgelpfeifen wirkt der Gehörgang dann wie ein Resonator, dessen erste Resonanz bei einer Frequenz auftritt, dessen Wellenlänge vier mal so lang ist wie die Länge des Gehörgangs. Weitere Resonanzfrequenzen liegen bei ungeraden Vielfachen dieser Frequenz, wobei schon die dritte Resonanzfrequenz, wie Tabelle 3.1 zeigt, am Rande des für den Menschen hörbaren Bereichs liegt. Die durch die erste Resonanz hervorgerufene Empfindlichkeitssteigerung lässt sich anhand der Ruheshwelle belegen, die in diesem Frequenzbereich eine deutliche Senke aufweist. Die Ruheshwelle gibt in diesem Zusammenhang an, welcher Schallpegel im Mittel unter optimalen Hörbedingungen dazu ausreicht, eine Hörempfindung auszulösen.

Tabelle 3.1: Resonanzfrequenzen

Resonanz	Frequenz $f_n = \frac{(2n-1)c}{4 \cdot l}$	Wellenlänge Λ	Schallgeschwindigkeit c	Länge des Gehörgangs l
Erste (n=1)	3400 Hz	0,100 m	340 m/s	0,025 m
Zweite (n=2)	10200 Hz	0,033 m	340 m/s	0,025 m
Dritte (n=3)	17000 Hz	0,020 m	340 m/s	0,025 m

3.4.5 Ergänzende Faktoren der Raumwahrnehmung

Die einzelnen in den vorangegangenen Kapiteln aufgeführten Faktoren der Raumwahrnehmung losgelöst voneinander zu untersuchen, ist nur bis zu einem gewissen Grad möglich bzw. sinnvoll. So ist z.B. das Phänomen der Innenkopffortung, bei der die perzipierte Schallquellenrichtung einer Position auf der gedachten Achse zwischen beiden Ohren entspricht, dann zu beobachten, wenn einer Versuchsperson über Kopfhörer zwar stimmige interaurale Zeit- und Intensitätsdifferenzen eingespielt werden, die richtungsabhängigen Änderungen des Signalspektrums aber unberücksichtigt bleiben. Des Weiteren kann es selbst dann zu vorne/hinten-Vertauschungen kommen, wenn zusätzlich eine richtungsabhängige binaurale Spektralfärbung erfolgt. Wie wichtig hierbei die spektrale Zusammensetzung des Schallquellensignals ist, lässt sich daran ablesen, dass die Existenz sog. richtungsbestimmender Frequenzbänder /Blau85/ nachgewiesen werden konnte. Zudem ist wichtig bei der Auflösung von Mehrdeutigkeiten, inwieweit das Quellspektrum dem Hörenden bekannt ist.

Um die einzelnen Lokalisationsfaktoren genauer untersuchen und ihre relative Bedeutung besser einschätzen zu können, hat sich ein Untersuchungsansatz als nützlich erwiesen, bei dem Probanden künstliche Hörsituationen präsentiert werden, in denen einzelne Lokalisationsfaktoren einander widersprechen oder in sich unstimmig sind. Der Faktor, der sich in einer Konfliktsituation durchsetzt, wird entsprechend als zuverlässiger bzw. als dominant eingestuft (Reliabilität). Die Gewichtung ändert sich allerdings stark, wenn ein Faktor inkonsistent ist. So konnte die Dominanz der interauralen Zeitdifferenz in Experimenten von Wightman und Kistler /Kist92/ zwar nachgewiesen werden, jedoch wurde gleichzeitig auch belegt, dass bei vorliegender Inkonsistenz der interauralen Pegeldifferenz und der spektralen Färbung die größere Bedeutung zukommt. Des Weiteren ist die Dominanz der Lokalisationsfaktoren vom Frequenzinhalt des Quellspektrums abhängig. Mit steigender Frequenz nimmt die Dominanz der interauralen Zeitdifferenz ab, wohingegen die Bedeutung der spektralen Verfärbung zunimmt.

Bei Untersuchungen zum Einfluss der Kopfbewegung auf das räumliche Hören konnte die große Bedeutung der Relativbewegung für die Richtungswahrnehmung herausgestellt werden /Thur67/. So verwundert es nicht, dass auch Verhaltensbeobachtungen zeigen, dass insbesondere Blinde, um ihre räumliche auditive Wahrnehmung zu optimieren, dazu neigen, den Kopf ständig leicht zu bewegen. Die Rückkopplung über die aktuelle Kopfposition erhält der Hörende dabei über das Gleichgewichtsorgan, den Sehsinn sowie den bei der Drehung angespannten Muskeln und Sehnen (Halteapparat). Für die Schallortung ist zum einen entscheidend, dass sich durch die Rotation um die Hochachse (gieren) die interauralen Signalunterschiede an beiden Ohren gegenläufig verändern, was insbesondere für die vorn/hinten-Zuordnung von Bedeutung ist. Zum anderen ergibt sich aus der häufig vorkommenden Kombination aus gieren und nicken und der Stärke der Kopfbewegung eine stetige Änderung der interauralen Signalunterschiede, welche die Azimut- und Elevationsbestimmung verbessert /Mack98/Blau96/.

Der Präzedenz-Effekt, auch Haas-Effekt oder "Gesetz der ersten Wellenfront" genannt, ist ein wichtiger Mechanismus des auditiven Systems, um Schall auch in reflexionsbehafteten Räumen lokalisieren zu können. Wird ein Signal über Kopfhörer mit verschiedenen interauralen Zeitdifferenzen eingespielt, so ergeben sich drei Stadien der Wahrnehmung. Bei Differenzen von 0 bis 0,6 ms wandert die Schallquelle scheinbar im Kopf vom Zentrum zum Ohr, wo der Schall zuerst eintrifft. Zwischen etwa 0,6 und 35 ms wird die Quelle nur an der Seite des zuerst ankommenden Schalls geortet (Präzedenzeffekt). Bei einer Zeitdifferenz von über 35 ms werden die beiden Schallergebnisse getrennt (als Echo) wahrgenommen. Als Franssen-Effekt wird in diesem Zusammenhang die Unfähigkeit beschrieben, in geschlossenen Räumen stationäre Signale zu lokalisieren und richtungsselektiv zu verarbeiten, wenn sich der Hörende genügend weit außerhalb des Hallradius aller Schallquellen befindet /Slat94/. Der Anteil des Direktschalls bestimmt demnach die Fähigkeit zur Schallortung.

Das Entstehen bestimmter Hörereignisse hängt nicht nur vom spektralen Inhalt und dem zeitlichen Verlauf des Schallsignals ab, sondern wird ebenso von der räumlichen Position und Verteilung der Schallquellen bestimmt /Buns99/. So ist z.B. die empfundene Lautstärke (Lautheit) und die Rauigkeit eines Signals ebenso von der Schalleinfallrichtung abhängig wie die Mithörschwelle reiner Töne, die durch Rauschen maskiert werden. Letzteres Phänomen wird auch als BMLD (*Binaural Masking Level Difference*) bezeichnet und befähigt das Gehör, Sinustöne, die von Störuschen überlagert sind, bereits bei geringeren Pegeln herauszuhören als dies beim monauralen Hören der Fall wäre. Dieser Effekt ist ebenfalls bei Verwendung von Sprachsignalen anstelle von Sinustönen zu beobachten und wird als BILD (*Binaural Intelligibility Level Difference*) bezeichnet /Hell93/. In enger Beziehung hierzu ist der "Cocktailparty-Effekt" zu sehen, der die Fähigkeit beschreibt, einzelne Sprecher in einem Raum, in dem sich mehrere Personengruppen angeregt miteinander unterhalten, gezielt herauszuhören zu können /Slat94/. Es existieren mit dem Vektormodell (Webster-Jeffress-Modell) und dem EC-Modell (*Equalisation-and-Cancellation-Modell*) zwei grundlegende Erklärungsansätze der hierbei zugrunde liegenden binauralen Signalerkennung. Ersteres stützt sich im Wesentlichen auf die Auswertung interauraler Phasenunterschiede zwischen Nutz- und Störsignal. Das zweite Modell geht hingegen davon aus, dass die an beiden Ohren anliegenden Störsignale in einem als *Equalizing* bezeichneten Prozess gleichgeschaltet werden und sich die beiden so transformierten Ohrsignale in einem zweiten, als *Cancellation* bezeichneten Verarbeitungsschritt, bis auf das Nutzsignal, gegenseitig aufheben.

4 Bewegungswahrnehmung

4.1 Visuelle Bewegungswahrnehmung

Die visuelle Bewegungswahrnehmung entspricht einem elementaren Erlebnis, das nicht auf noch einfachere Elemente zurückzuführen ist, und hat folglich ebenso wie z.B. die Farb- oder Temperaturwahrnehmung einen Primärcharakter /Gold02/ bzw. eine eigenständige phänomenologische Dimension /Ruts98/. Für diese Ansicht spricht, neben bekannten Fällen von Bewegungsblindheit (Bewegungssagnosie), auch die aus evolutionärer Sicht bedeutsame Erkenntnis, dass einige Spezies zwar in der Lage sind auf zeitliche Änderungen von Lichtreizen zu reagieren, jedoch nicht zwischen der Form statischer Objekte diskriminieren können /Nied95/. Dass ein bewegtes Netzhautbild gewissermaßen am Anfang aller visuellen Wahrnehmung steht, zeigt sich auch daran, dass unter den Bedingungen eines stabilisierten Netzhautbildes keine visuelle Wahrnehmung stattfindet /Camp93/. Zudem belegt das Auftreten eines Bewegungsnacheffekts, wie er z.B. bei der Wasserfallillusion zu beobachten ist, die Eigenständigkeit der Bewegungsdetektion. Der Bewegungsnacheffekt zeigt sich darin, dass stationäre Gegenstände für einen gewissen Zeitraum als bewegt wahrgenommen werden, wenn eine Bewegung (das Hinabstürzen des Wassers) zuvor ausreichend lange beobachtet wurde. Aus sinnesphysiologischer Sicht (vgl. Kapitel 2) existieren bewegungsempfindliche Neuronen, die für einen bestimmten Bereich von Richtungen empfindsam sind (Bild 4.1) und deren selektive Adaption die Empfindlichkeit für den betroffenen Bereich von Richtungen mit der Zeit herabsetzt und bei einem abrupten Ende des auslösenden optischen Reizes Bewegungsnachbilder entstehen lässt.

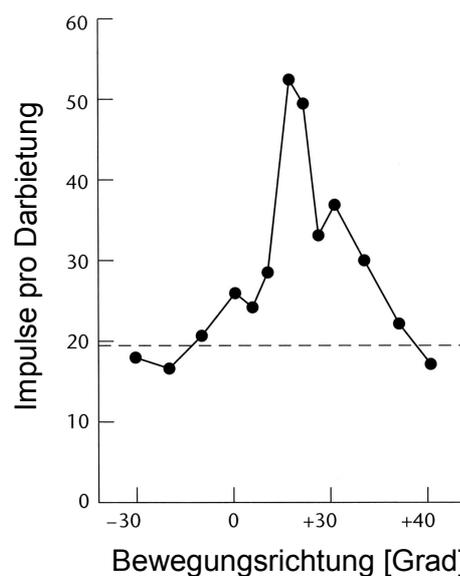


Bild 4.1: Beispiel einer Bewegungsrichtungstuningkurve /Gold02/

Reale Bewegungen werden durch kontinuierliche physische Ortsveränderungen von Objekten oder Personen (allg. Lebewesen) im Gesichtsfeld des Betrachters hervorgerufen. Bei der Bewegungswahrnehmung ist neben einer realen Bewegung und dem Bewegungsnacheffekt noch danach zu unterscheiden, ob die Wahrnehmung auf einer Scheinbewegung, einer induzierten oder einer autokinetischen Bewegung beruht. Bild 4.2 verdeutlicht diese Fallunterscheidung der Bewegungswahrnehmung anhand von fünf verschiedenen exemplarischen Anordnungen, die zu einem Eindruck eines sich bewegenden Lichtpunkts führen.

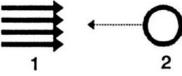
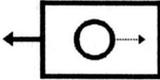
Bewegung	Anordnung	Voraussetzung
a) real		Licht bewegt sich
b) Nacheffekt		Längeres Betrachten einer bewegten Anordnung
c) stroboskopisch		Licht blitzt abwechs. auf
d) induziert		Umfeld bewegt sich
e) autokinetisch		stationäres Licht im Dunkeln

Bild 4.2: Exemplarische Anordnungen zur Fallunterscheidung der Bewegungswahrnehmung /Gusk96/

Die Scheinbewegung (*apparent motion*) ist definiert als scheinbare Bewegung physikalisch unbewegter Objekte und entspricht im engeren Sinne der stroboskopischen Bewegung /Dors98/. Unter der Voraussetzung, dass keine aktive Augenbewegung vorliegt, entsteht der auch als Phi-Phänomen bezeichnete Eindruck von Bewegung hierbei durch sukzessive Reizung benachbarter Netzhautpunkte, ohne dass eine Bewegung in der Umwelt vorliegt. Lauflichter, die z.B. zu Werbezwecken an Geschäften angebracht sind oder die in einem Kino sehr schnell hintereinander gezeigten Standfotos, gelten in diesem Zusammenhang als Paradebeispiele für stroboskopische Bewegung. Bild 4.3 zeigt, dass das Zustandekommen und die Art der Scheinbewegung davon abhängt, in welchem zeitlichen Abstand Lichtpunkte aufleuchten bzw. benachbarte Netzhautpunkte erregt werden. Darüber hinaus ist die Bewegungsempfindung auch vom räumlichen Abstand abhängig, da bei vergrößertem Abstand entweder das Zeitintervall oder die Lichtintensität gesteigert werden müssen, um den gleichen Bewegungseindruck zu erzielen /Gold02/. Die Scheinbewegung lässt sich in Einzelphänomene unterteilen, die als Alpha-, Beta-, Gamma-, Delta- und Epsilon-Bewegung bezeichnet werden.

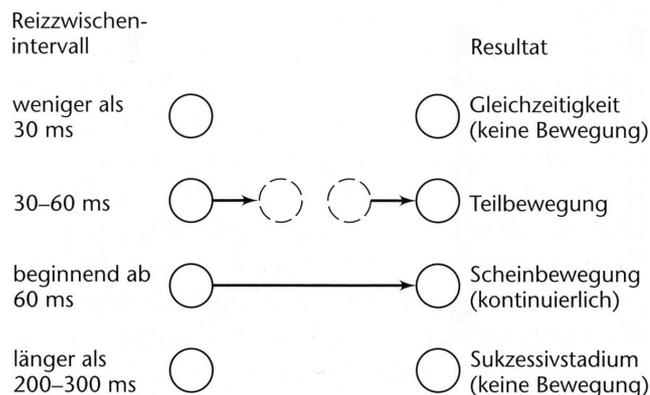


Bild 4.3: Art der Bewegungsempfindung in Abhängigkeit vom Zeitversatz, mit dem zwei Lichtpunkte in einem bestimmten räumlichen Abstand zueinander aufleuchten /Gold02/

Dass eine stroboskopische Bewegung den Eindruck einer kontinuierlichen Bewegung erwecken kann, hängt mit dem begrenzten zeitlichen visuellen Auflösungsvermögen zusammen. Das zeitliche visuelle Auflösungsvermögen lässt sich anhand der Flimmerverschmelzungsfrequenz quantifizieren. Sie entspricht derjenigen Frequenz oberhalb derer das durch ein periodisch unterbrochenes Licht (Stroboskop) erzeugtes Flimmerlicht nicht mehr als periodisch aufleuchtend erscheint oder von ihr eine zeitlich und räumliche Unruhe ausgeht, sondern eine Gleitlichtempfindung einsetzt /Camp93/. Bild 4.4 zeigt, dass die Flimmerfusionsfrequenz von der mittleren Beleuchtungsstärke abhängt. Die Werte wurden beim fovealen Sehen mit einer pulsierenden Lichtquelle, die einen Sehwinkel von 2° überspannt, bestimmt /Camp93/.

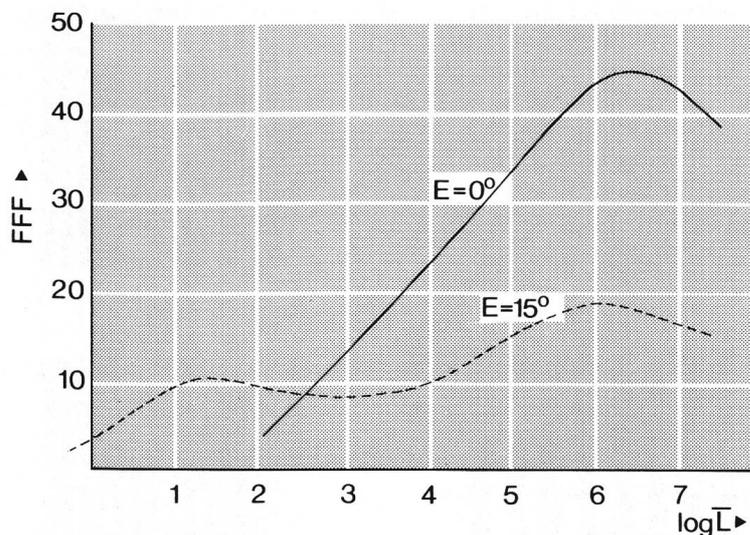


Bild 4.4: Flimmerfusionsfrequenz in Abhängigkeit von der mittleren Beleuchtungsstärke /Camp93/

Eine induzierte Bewegung entspricht definitionsgemäß einer Bewegungstäuschung, bei der ein stationäres Objekt in einem bewegten Umfeld als bewegt erscheint /Dors98/. Die Richtung der induzierten Bewegung ist der des Umfelds entgegengesetzt, was sich auch in vielen Alltagserfahrungen bestätigt. So zeigt sich z.B., dass der Mond, wenn er durch eine sich schnell bewegende aufgelockerte Wolkendecke beobachtet wird, oft so

erscheint, als würde er sich in Gegenrichtung zu den Wolken bewegen. Dass auch eine Eigenbewegung induziert werden kann, bei der sich das Gefühl einstellt, als ändere sich die eigene Position bzw. die Körperlage, lässt sich z.B. anhand der sog. Hexenschaukel belegen. Als Hexenschaukel wird ein Raum bezeichnet, dessen Wände schaukeln und beim Insassen den Eindruck hervorrufen, selbst hin und her zu schwanken. Für Außenstehende wird diese Bewegungstäuschung durch entsprechende Ausgleichsbewegungen oder Muskelanspannungen der Insassen ersichtlich.

Autokinetische Bewegungen, die z.B. entstehen, wenn im Dunkeln über einen längeren Zeitraum ein kleiner stationärer Lichtpunkt betrachtet wird (Sternschwankung), zeichnen sich in ihrer Punktbeziehung sowohl durch eine wechselnde allmähliche Drift in unterschiedliche Richtungen, als auch durch sprunghafte Verschiebungen von bis zu 30° aus. Untersuchungen belegen, dass sich autokinetische Bewegungen nicht auf Augenbewegungen bzw. Bildverschiebungen zurückführen lassen und legen den Schluss nahe, sie als Nebeneffekt der visuellen Informationsverarbeitung einzustufen /Camp93/. Darüber hinaus ist anzumerken, dass sich, je nach Suggestibilität des Beobachters, die Beschreibung bzw. Beurteilung der autokinetischen Bewegung - von außen z.B. durch Äußerungen Dritter - verschieden stark beeinflussen lässt.

Die Leistungen der Bewegungswahrnehmung des Menschen lassen sich, wie Bild 4.5 zeigt, in verschiedene Klassen einteilen. Zunächst wird danach unterschieden, ob sich das gesamte Gesichtsfeld bedingt durch eine Eigenbewegung in Bewegung befindet oder ob dies nur für Teile des Gesichtsfelds zutrifft. Bei einer lokalen Bewegung innerhalb des Gesichtsfelds wird danach unterschieden, ob sich Lebewesen oder Objekte bzw. Flächen bewegen. Die Bewegung eigener Körpergliedmaßen einschließlich eventuell benutzter Werkzeuge stellt darüber hinaus eine eigene Klasse der Bewegungswahrnehmung dar.

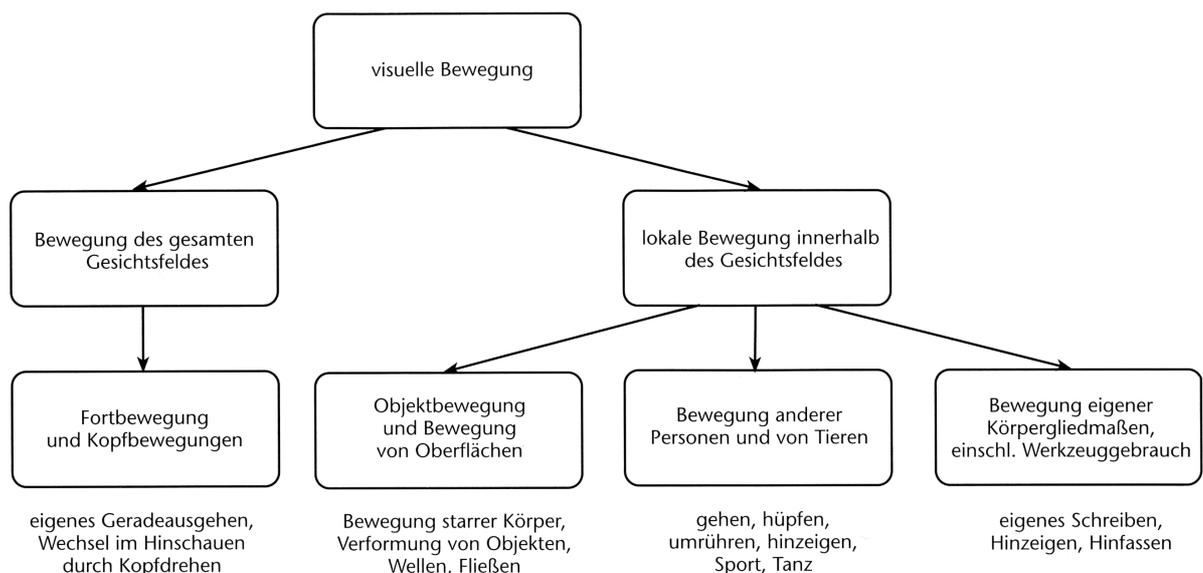


Bild 4.5: Leistungen der Bewegungswahrnehmung des Menschen und ihre Klassifikation /Gold02/

Die Klasseneinteilung ist insbesondere in Hinblick auf die Aufgaben bzw. Funktionen der Bewegungswahrnehmung von Bedeutung. Sie impliziert, dass visuelle Bewegung direkt zur Trennung von Figur und Hintergrund führt bzw. beiträgt. Dass dies tatsächlich der Fall ist, lässt sich z.B. daran beobachten, dass Tiere, die über ein entsprechendes Tarnkleid verfügen, solange nicht bzw. nur sehr schwer in ihrer natürlichen Umgebung auszumachen sind, solange sie sich ruhig verhalten, jedoch sofort “ins Auge springen“, sobald sie sich bewegen.

Neben der Segregation von einer bewegten Figur und ihrem Hintergrund, existieren noch weitere Aufgaben bzw. Funktionen der Bewegungswahrnehmung. Kommen z.B. in einer Szene mehrere bewegte Objekte vor, deren Trajektorien sich zudem noch schneiden, so löst das visuelle System das Problem, dass zwei Objekte nicht den gleichen retinalen Ort einnehmen können, indem es den Objekten verschiedene Tiefenebenen zuweist (kinetische Tiefenwahrnehmung). Auch für die Schätzung der Zeit, bis es zu einer Kollision bzw. Berührung (*Time to Collision*) mit einem Objekt kommt, der Handlungsregulation und der Initiierung von Augenfolgebewegungen spielt die Bewegungswahrnehmung eine wichtige Rolle. Hierbei entsteht die Bewegungswahrnehmung in der Tiefe durch kontinuierliche oder sprunghafte Änderung der Größe des Netzhautbildes eines Objekts oder durch Änderung der Konvergenz oder der Querdissipation. Insgesamt können nach Nakayama /Nied95/ sieben mögliche Funktionen der Bewegungswahrnehmung unterschieden werden:

- Erkennung von bewegten Objekten
- Kodierung der dritten Dimension
- Zeit bis zur Berührung (*Time to Collision*)
- Bildsegmentierung
- Bewegung als Stimulus zur Augenbewegung
- Bewegung des retinalen Bildes zur Mustererkennung
- Propriozeptive Bewegungsempfindung

Die komplexen Leistungen der Bewegungswahrnehmung lassen sich erst durch eine neuronale Vernetzung vieler Bewegungsdetektoren erklären. Wie bereits in Kapitel 2 dargelegt, entsteht die Bewegungs- und Formwahrnehmung aus einer komplexen neuronalen Verschaltung der Rezeptorsignale in den verschiedenen Verarbeitungszentren. Die Funktionsweise eines einfachen Bewegungsdetektors lässt sich anhand des in Bild 4.6 aufgezeigten Minimalmodells beschreiben. Das Richardts-Modell geht davon aus, dass die Reizantworten zweier benachbarter Rezeptoren, wie das Ersatzblockschaltbild verdeutlicht, zwei Bearbeitungsstufen (B und M) durchlaufen, bevor das Antwortsignal R aus der Signaldifferenz gewonnen wird. In der ersten Bearbeitungsstufe wird das Signal zeitlich verzögert. Entspricht diese Verzögerung - hier für eine Bewegung nach rechts dargestellt - in etwa dem zeitlichen Unterschied, mit dem der zweite Rezeptor (aufgrund der Bewegung) versetzt angeregt wird, so ergibt sich für den

linken Bearbeitungspfad, durch die Multiplikation beider Signale, eine Signalverstärkung. Im rechten Bearbeitungspfad führt die Signalverzögerung und die Multiplikation mit der Reizantwort des zuvor angeregten Rezeptors zu einer Signalauslöschung. Am Ende der beiden Bearbeitungspfade wird die Differenz aus den beiden Signalen gebildet. Die Richtung der detektierten Bewegung bestimmt sich aus dem Vorzeichen des Ausgangssignals. Der Betrag des Ausgangssignals wächst mit dem Quadrat der Eingangsamplituden, was erklärt, dass es vom Kontrast und der Beleuchtungsstärke des bewegten Reizmusters abhängt, wie deutlich eine Bewegung wahrgenommen wird. Ein einzelner Bewegungsdetektor ist, bedingt durch die Vorgabe der Verzögerungszeit, nur für einen bestimmten Geschwindigkeitsbereich empfindlich. Zu schnelle Bewegungen werden ebenso wenig erkannt wie zu langsame. Die im Auge abgebildete Bewegungsgeschwindigkeit ist dabei, wie Bild 4.6 ebenfalls zeigt, abstandsabhängig.

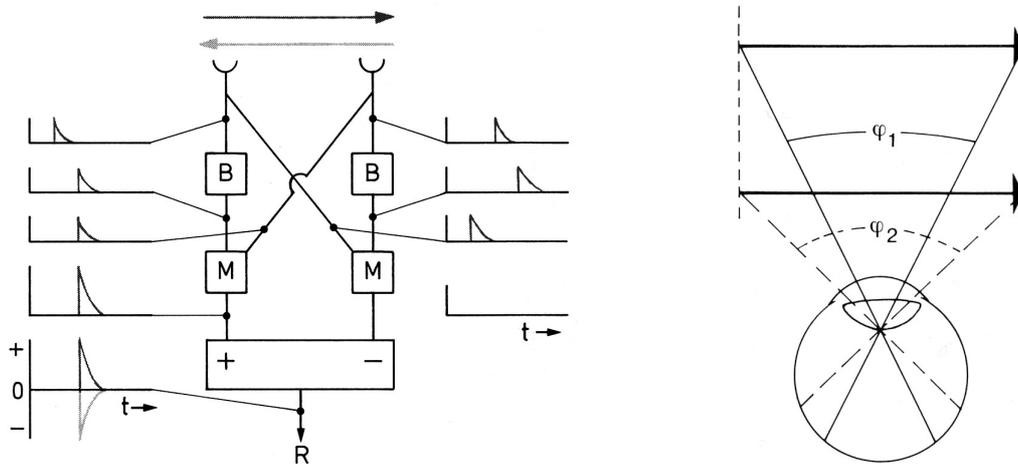


Bild 4.6: Modell eines einfachen Bewegungsdetektors und Abstandsabhängigkeit der Bewegungsgeschwindigkeit im Auge /Camp93/

Die Bewegungswahrnehmung ist eng mit der Augenbewegung verknüpft. Zum einen können Bewegungen Augenfolgebewegungen auslösen. Langsame Augenfolgebewegungen können z.B. nur durch einen entsprechenden Bewegungsreiz hervorgerufen werden. Zum anderen muss das visuelle System bei der Auswertung bewegter optischer Reizmuster fortwährend unterscheiden, ob die Bewegung auf der Retina durch eine reale Bewegung oder eine Augenbewegung ausgelöst wird. Darüber hinaus müssen mögliche Bewegungsüberlagerungen erkannt und aufgelöst werden, so dass z.B. bei der in Bild 4.7 dargestellten Augenfolgebewegung, trotz unveränderter Abbildung des bewegten Punktes auf der Retina, ein Bewegungseindruck entsteht. Hierzu ist es notwendig, dass, wie bei dem in Bild 4.8 dargestellten Modell des Reafferenzprinzips, eine Verrechnung der efferenten motorischen Kommandos für die Augen und Kopfbewegung mit den afferenten visuellen Signalen erfolgt. Ähnliche Mechanismen bewirken im Zusammenspiel mit dem Gleichgewichtssinn, den motorischen Zentren und der Tiefensensibilität, dass die Umwelt trotz Kopf- und Körperbewegungen als stationär wahrgenommen wird /Birb03/.

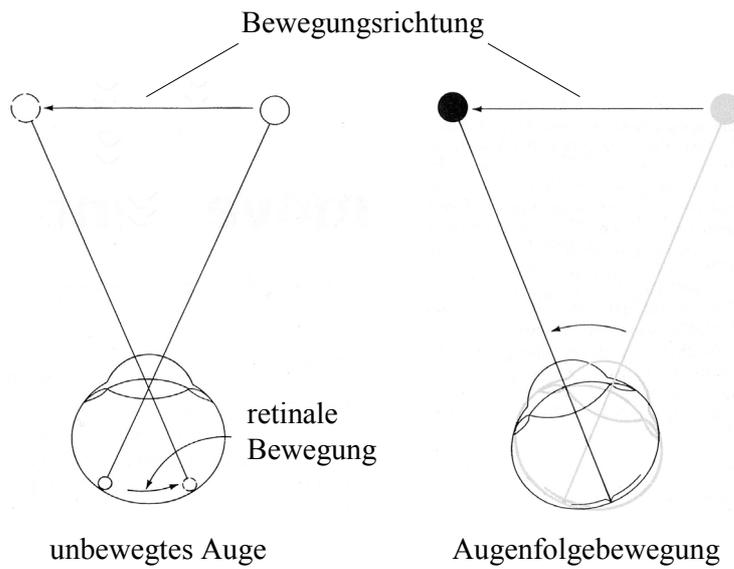


Bild 4.7: Fallunterscheidung zwischen Bewegungssehen bei unbewegtem Auge und mit Augenfolgebewegung nach /Levi01/

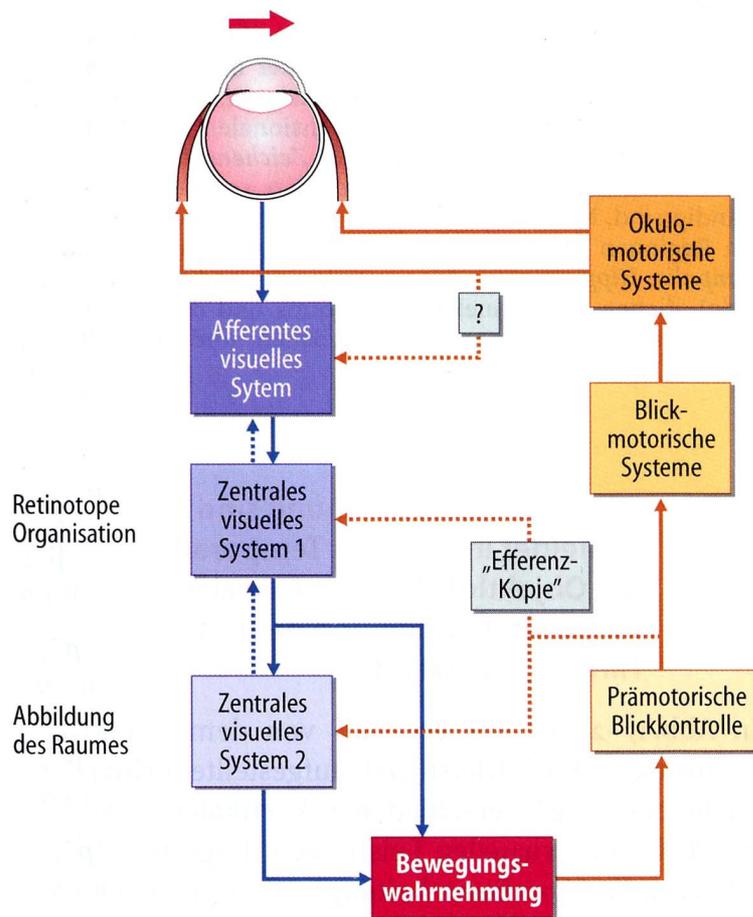


Bild 4.8: Modell des Reafferenzprinzips /Birb03/

Die Komplexität der Bewegungswahrnehmung wird ferner dadurch erhöht, dass die retinale Bewegung nicht dem Perzept entsprechen muss. Bewegt sich z.B. ein Leopard im Dschungel, so besteht das optische Reizmuster aus vielen Kontraständerungen, deren lokale Komponenten in die unterschiedlichsten Richtungen weisen. Dass das visuelle System dennoch dazu in der Lage ist, ein Objekt wahrzunehmen, das sich in eine bestimmte Richtung bewegt, weist auf eine zweistufige Bewegungsanalyse hin, bei der in der zweiten Verarbeitungsstufe die in der ersten Stufe detektierten lokalen Bewegungen so selektiv integriert werden, dass das Perzept eines bewegten globalen Objekts mit einer eindeutigen Bewegungsrichtung entsteht /Nied95/. Die Charakteristika der beiden Verarbeitungsstufen sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Charakteristika der zwei Verarbeitungsstufen in der Bewegungswahrnehmung (nach Stoner & Albright) /Nied95/

Stufe 1: Bewegungsdetektion	Stufe 2: Bewegungsintegration
Korrespondenz bewegter lokaler Elemente	Speicherung der lokalen Bewegungssignale und Generierung globaler Muster-Bewegungen
Räumliche Beschränktheit	Räumliche Selektivität der Integration
Orientierungsselektivität	keine Orientierungsselektivität
Eindimensionale Repräsentation von Bewegung	Zweidimensionale Repräsentation von Bewegung

Um die Vorgänge bei der Bestimmung bzw. Analyse der globalen Bewegungsrichtung genauer zu untersuchen, haben Plaid-Muster und Random-Dot-Kinematogramme (RDK) eine besondere Bedeutung. Plaid-Muster nutzen die Eigenschaft, dass lokale Bewegungsdetektoren nur auf einzelne Orientierungskomponenten antworten. Bild 4.9 zeigt hierzu, dass beim Blick durch einen kreisrunden Ausschnitt nicht die wahre Bewegungsrichtung eines bewegten Balkenmusters erkannt werden kann, sondern nur die Bewegungsrichtung orthogonal zu den Einzellinien bzw. Komponenten des Musters (Aperturproblem). Überlagern sich bewegte Balkenmuster unterschiedlicher Orientierung, so stellt sich eine globale Musterbewegung ein. Die Einzelbewegungen werden nicht mehr als solche wahrgenommen. Die wahrgenommene Richtung des Musters lässt sich, wie Bild 4.10 zeigt, aus dem Schnittpunkt der beiden Einschränkungslinien bestimmen. Sie verlaufen senkrecht zu den Vektoren, die angeben, mit welcher Richtung und Geschwindigkeit die Bewegung jedes Einzelmusters bei alleiniger Präsentation wahrgenommen wird, und repräsentieren gewissermaßen die Summe aller möglichen Musterbewegungen, die zum gleichen Bewegungseindruck führen.

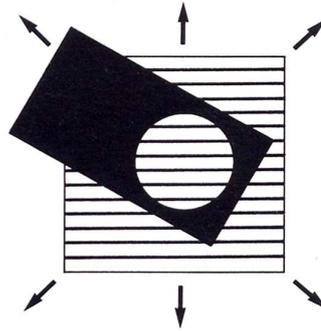


Bild 4.9: Aperturproblem /Camp93/

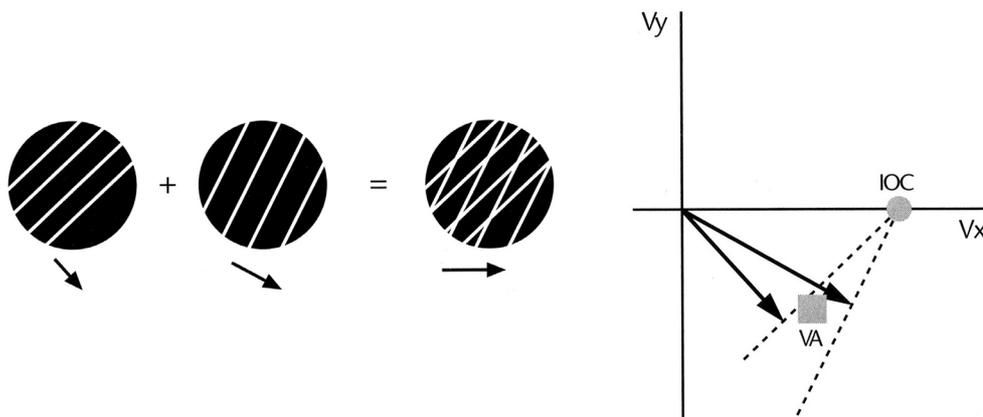


Bild 4.10: Überlagerung von zwei sich bewegenden Streifenmustern /Gold02/

Die aus Zufallspunktmustern (randomisierten Pixelmustern) aufgebauten Random-Dot-Kinematogramme zeichnen sich durch ihre isoluminanten Reizflächen aus, die dazu in der Lage sind, ohne den Einfluss von Konturen, Bewegungsinformationen zu vermitteln. Hierzu werden den einzelnen Pixeln Versetzungspfade zugeordnet. Bild 4.11 verdeutlicht, dass in Abhängigkeit von dem Prozentsatz korreliert bewegter Pixel ein verschieden starker globaler Richtungseindruck des Musters entsteht. Für den Fall, dass alle Pixel des Musters korreliert in eine Richtung versetzt werden, nimmt der Betrachter eine Ganzfeldbewegung wahr. Der Eindruck eines richtungslosen Flimmerns hingegen entsteht, wenn keine Bewegungsübereinstimmung zwischen den Pixeln vorhanden ist. Ein globaler Richtungseindruck kann sich schon unterhalb einer zehnprozentigen Übereinstimmung der einzelnen Bewegungspfade einstellen /Nied95/.

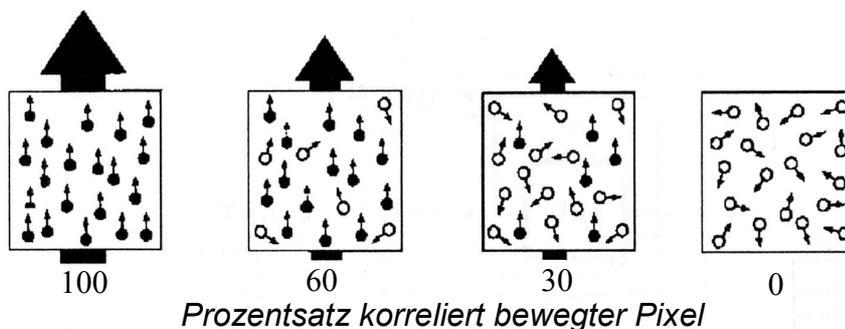


Bild 4.11: Beispiele für RDKs mit variablem Richtungsanteil /Nied95/

Analog zu den Random-Dot-Stereogrammen werden auch Random-Dot-Kinematogramme verwendet, bei denen die Bildpunkte eines Ausschnitts des Zufallspunktmusters, der z.B. die Fläche eines Quadrats oder Kreises einnimmt, um einen geringen Betrag (*short-range*) versetzt werden. Die so manipulierten Punktmusterpaare werden hierbei jedoch nicht binokular, sondern monokular zeitlich versetzt dargeboten. Die Kontur entsteht bzw. definiert sich durch die kohärente Bewegung des Musterschnitts, so dass im statischen Zustand kein Kontureneindruck vorhanden ist. Um diesen Effekt in einer statischen Abbildung eines RDKs dennoch veranschaulichen zu können, wurde in Bild 4.12 der versetzte Ausschnitt des Zufallsmusters optisch hervorgehoben. Die maximale Versetzungsbreite (D_{max}) beträgt circa 15 Winkelminuten, wohingegen ein einfach strukturierter Reiz, der eine andere Luminanz aufweist als sein Hintergrund und auch im statischen Zustand erkannt wird, selbst dann noch eine Scheinbewegung erzeugt, wenn er um 18° versetzt wird /Nied95/. Zur begrifflichen Unterscheidung werden in diesem Zusammenhang die Bezeichnungen *long-range*-, *short-range*- bzw. *first-order*- und *second-order*-Prozesse verwendet.

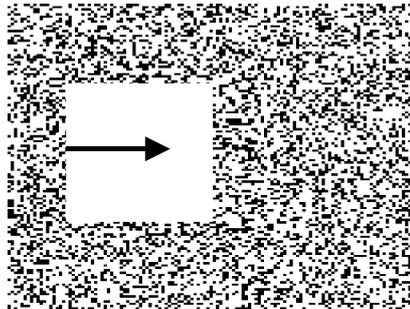


Bild 4.12: Darstellung eines Random-Dot-Kinematogramms mit Hilfe einer optischen Hervorhebung des versetzten rechteckigen Ausschnitts aus dem Zufallspunktmuster

Zufallskinetogramme werfen zwangsläufig die Frage auf, wie die aufeinanderfolgenden Einzelbilder ausgewertet werden und wie es überhaupt zu einer unmittelbaren Zuordnung der korrespondierenden Bildelemente und damit zum Bewegungseindruck kommen kann. Das auch beim querdisparativen Tiefensehen (vgl. Kapitel 3) vorhandene Korrespondenzproblem lässt sich nur für sehr einfache Szenen mit einem Punkt-für-Punkt-Vergleich erklären. Geeigneter scheinen hierfür Erklärungsansätze zu sein, die davon ausgehen, dass das visuelle System algorithmische Verfahren und heuristische Regeln anwendet, die widerspiegeln, dass sich Objekte in der realen Welt auf eine bestimmte, teilweise auch vorhersagbare, charakteristische Art und Weise bewegen (natürliche Ordnung von Bewegungen) /Gold02/. Von besonderer Bedeutung scheint hierbei vor allem die visuelle Zerlegung komplexer Bewegungen in Bewegungskomponenten zu sein, die Analogien zur Vektorzerlegung aufweist und dazu beiträgt, lokale Bewegungssignale in Gruppen zu ordnen bzw. zusammenzufassen. Heuristische Regeln stellen Faustregeln der Auswertung dar. Sie ermöglichen eine schnellere Signalverarbeitung, die trotz der damit einhergehenden Verallgemeinerung bzw. Verein-

fachung noch mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zu einem richtigen Wahrnehmungsergebnis führt. Beispiele hierfür sind:

- Regel der Fortsetzung einer Bewegung in die gleiche Richtung (Bild 4.14),
- Regel des Verdeckens und Aufdeckens (Bild 4.15) und die
- Regel des kürzesten Wegs (Bild 4.16)

Dass eine Bewegung der größeren Form auch die Bewegung lokaler Elemente in dieser Form bestimmt, zeigt sich z.B. daran, dass, wenn eine Büroklammer über einem flimmernden Bildschirm hin und her geschoben wird, der Eindruck entsteht, als bewegten sich die umschlossenen Bildpunkte synchron mit (Bild 4.13)

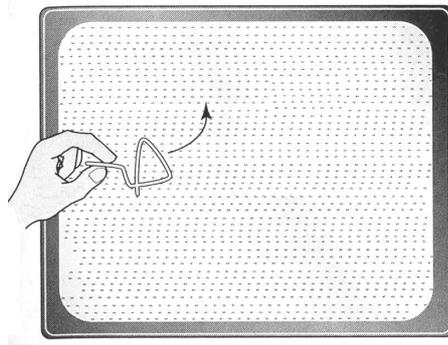


Bild 4.13: Demonstration des Effektes zur Dominanz der Bewegung einer größeren Form über die Bewegung lokaler Elemente /Gold 02/



Bild 4.14: Regel der Fortsetzung einer Bewegung in die gleiche Richtung /Gold 02/

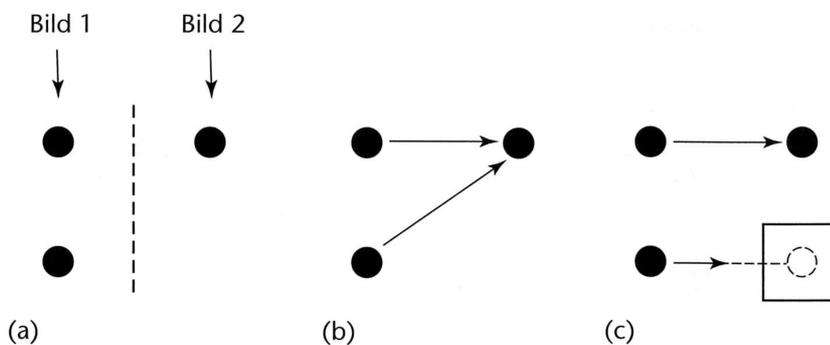
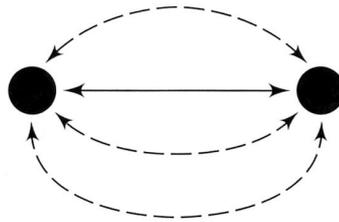


Bild 4.15: Regel des Verdeckens und Aufdeckens /Gold 02/

**Bild 4.16: Regel des kürzesten Wegs /Gold 02/**

Die Schwellenwerte der Bewegungswahrnehmung sind ebenso wie der Bewegungseindruck stark von den Versuchsbedingungen und der Art der Bewegung abhängig. Zu den Einflussfaktoren zählen u.a. Kontrast, Reizgröße, -entfernung, -helligkeit, retinaler Reizort sowie Adaptionszustand des Auges. Bei einer realen Bewegung, bei der ein Objekt seine Lage im Raum kontinuierlich ändert, ohne dabei verdeckt zu werden, entspricht die Mindestgeschwindigkeit für das Entdecken einer Bewegung ca. $0,33^\circ$ Sehwinkel pro Sekunde /Gusk96/. Für kontrastarme und leuchtschwache Reize erhöht sich der Schwellenwert entsprechend. Dass eine Bewegung als langsamer empfunden wird, wenn sie nicht im fovealen, sondern im peripheren Bereich abgebildet wird, verdeutlichen die in Bild 4.17 dargestellten Ergebnisse einer Versuchsreihe. Dabei wurden Schwellenwerte für die Bewegungswahrnehmung in Abhängigkeit von der Exzentrizität der Reizabbildung auf der Retina bestimmt. Um den Einfluss einer unterschiedlichen Abbildungsschärfe auf die Messergebnisse zu minimieren, wurden die Schwellenwerte zusätzlich mit speziellen Korrekturlinsen bestimmt, die auch im peripheren Bereich der Retina eine annähernd exakte Reizabbildung gewährleisten. Ein Vergleich zu den gestrichelt gezeichneten Linien zeigt zwar, dass die korrigierte Abbildung des bewegten Reizes im peripheren Bereich zu einer niedrigeren Wahrnehmungsschwelle führt, diese aber auch mit der Exzentrizität des Stimulus deutlich ansteigt. Dieser Verlauf scheint im Widerspruch zum weit verbreiteten Bild der "bewegungsempfindlichen Peripherie" zu stehen, welches darauf basiert, dass in diesem Bereich ein relativ hoher Anteil von bewegungsempfindlichen Ganglionzellen vorhanden ist (vgl. Kapitel 2). Er begründet sich aber daraus, dass die absolute Anzahl von Ganglionzellen zur Peripherie hin abnimmt und die Rezeptionsfelder zunehmend größer ausfallen /Lev01/. Letztere Feststellung erklärt zudem, warum beim peripheren Sehen noch sehr schnelle Bewegungen aufgelöst werden können, die im fovealen Bereich nicht mehr als solche zu erkennen sind. So erscheint z.B. ein 8 mm^2 großer kontrastreicher Stimulus in einer Entfernung von 2 m oberhalb einer Geschwindigkeit von ca. 37° Sehwinkel pro Sekunde auf der Fovea nicht als bewegter Punkt, sondern als Lichtstreifen /Gusk96/.

Bei gleicher Objektgeschwindigkeit wird die retinale Geschwindigkeit von der Entfernung zum Objekt bestimmt. Dass die Geschwindigkeitseinschätzung jedoch nicht von der Objektentfernung abhängt, wird als Geschwindigkeitskonstanz bezeichnet. Bewegte Objekte werden immer in Relation zum Hintergrund gesehen, was bewirkt, dass die Geschwindigkeitseinschätzung stark vom Größenverhältnis zwischen dem bewegten Objekt und dem Umfeld bzw. dessen Textur beeinflusst wird.

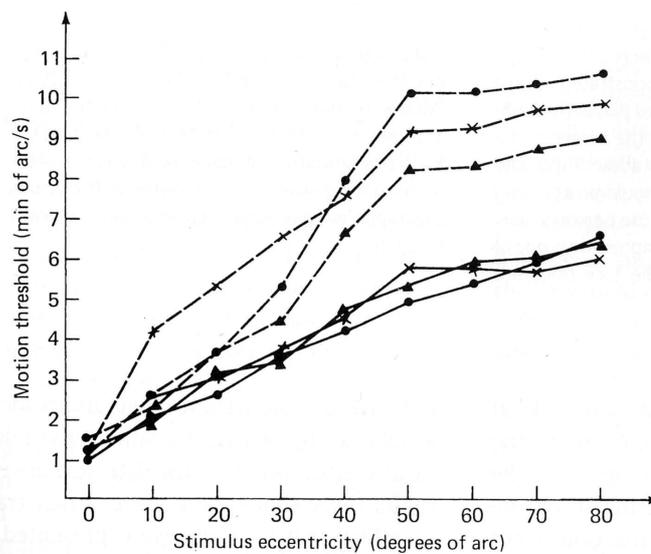


Bild 4.17: Anstieg der Bewegungswahrnehmungsschwelle (dreier Testpersonen) in Abhängigkeit von der Exzentrizität des Stimulus auf der Retina (durchgezogene Linie: Verwendung von Korrekturlinsen) /Levi01/

Eine Punktbewegung wird als schneller empfunden, wenn sie vor einem texturierten Hintergrund erscheint. Die Nähe des bewegten Punktmusters zum Hintergrund bestimmt hierbei den Geschwindigkeitseindruck, was sich u.a. dadurch erklären lässt, dass bei gleicher Objektgeschwindigkeit der Anteil vom Hintergrund, den ein Objekt pro Zeiteinheit überquert, unabhängig von der Entfernung gleich bleibt. Dies lässt sich u.a. dadurch erklären, dass unter der Voraussetzung, dass die Objektgeschwindigkeit sich nicht ändert, der Flächenanteil, den dieses Objekt vom Hintergrund abdeckt, gleich bleibt, auch wenn sich die Entfernung zum Betrachter ändert.

Der wahrnehmungsökologische Ansatz nach Gibson (vgl. Kapitel 3) geht davon aus, dass eine Objektbewegung immer in Relation zur darunter liegenden Fläche (z.B. dem Boden) bewertet wird. Die Informationen über die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit leiten sich aus den retinalen Abbildungen der regelhaften Texturverdeckungen ab (kinetisch optische Verdeckung). Die Verdeckungen an der führenden Objektkante ziehen fortwährend Texturaufdeckungen an der nachlaufenden Objektkante nach sich. An den seitlichen Objektgrenzen wird die Textur geschnitten. Die Kontinuität, mit der die Textur normalerweise auf der Retina erscheint, wird durch das sich bewegende Objekt aufgebrochen. Richtung und Geschwindigkeit dieser Unterbrechungen liefern Informationen zur relativen Lage des Objekts und lassen auf den Bewegungspfad schließen. Gemessen an der führenden oder nachlaufenden Objektkante bewirken gleiche physische Geschwindigkeiten konstante Raten der Ver- bzw. Aufdeckung /Gusk96/.

4.2 Auditive Bewegungswahrnehmung

4.2.1 Scheinbewegung

Bei der Durchführung von Hörversuchen lässt sich unter bestimmten Bedingungen beobachten, dass Probanden eine Bewegung des Hörereignisorts wahrnehmen, selbst wenn die Schallquellenposition während des gesamten Testdurchlaufs unverändert bleibt. Dieses autokinetische Phänomen kann z.B. dann auftreten, wenn zwei Schallquellen mit unterschiedlicher Position nacheinander aktiviert werden oder die interaurale Zeitdifferenz eines über Kopfhörer eingespielten tiefpassgefilterten Signals schrittweise variiert wird. Eine Art von "rotierender" Scheinbewegung kann initiiert werden, indem der Versuchsperson ein tieffrequenter tonaler Stimulus (<1 kHz) mit einem kleinen interauralen Frequenzunterschied eingespielt wird.

Autokinetischen Phänomene deuten darauf hin, dass in der betreffenden Hörsituation zumindest ein Teilfaktor der Signalveränderung vorliegt, der auch bei einer tatsächlichen Schallquellenbewegung zu beobachtet wäre. Als mögliche Teilfaktoren der auditiven Bewegungswahrnehmung gelten prinzipiell alle dynamischen Veränderungen der monauralen und binauralen Faktoren der Raumwahrnehmung (siehe Kapitel 3), die sich auch bei einer Schallquellenverschiebung ergeben. Bei den binauralen Faktoren sind vor allem die dynamischen Veränderungen der interauralen Zeit- und Pegeldifferenzen hervorzuheben, während bei den monauralen Faktoren der dynamischen Pegelveränderung eine besondere Bedeutung zukommt. Die Tatsache, dass eine Nachbildung möglichst aller monauralen und binauralen Faktoren zu einer Bewegungsillusion führt, macht sich die vorliegende Untersuchung insofern zunutze, als ein 3D-Audiosystem eingesetzt wird, das eben diese Faktoren bewegungsabhängig unter Echtzeitbedingungen dynamisch verändert (siehe Kapitel 8).

Bei Hörversuchen zur Bewegungswahrnehmung wird danach unterschieden, ob sich die Schallquelle im Raum tatsächlich bewegt oder ob die Bewegungswahrnehmung durch eine Lautsprecheranordnung oder aber ein sich dynamisch veränderndes Kopfhörersignal hervorgerufen wird. Aufgrund des vergleichsweise hohen technischen Aufwands bei einer sich mechanisch bewegenden Schallquelle und den damit verbundenen Einschränkungen werden zur Untersuchung der Bewegungswahrnehmung vorzugsweise die beiden zuletzt genannten Versuchsanordnungen eingesetzt.

Wie bereits zu Beginn dieses Abschnitts beschrieben, lässt sich eine Scheinbewegung, mit dem in Bild 4.18 gezeigten Versuchsaufbau dadurch erzeugen, dass zwei als Schallquellen fungierende Lautsprecher zeitversetzt aktiviert werden. Auf dieses Phänomen wird im Folgenden genauer eingegangen, da es die Bedeutung der dynamischen Pegelmodulation als monauralen Faktor für die Bewegungswahrnehmung unterstreicht.

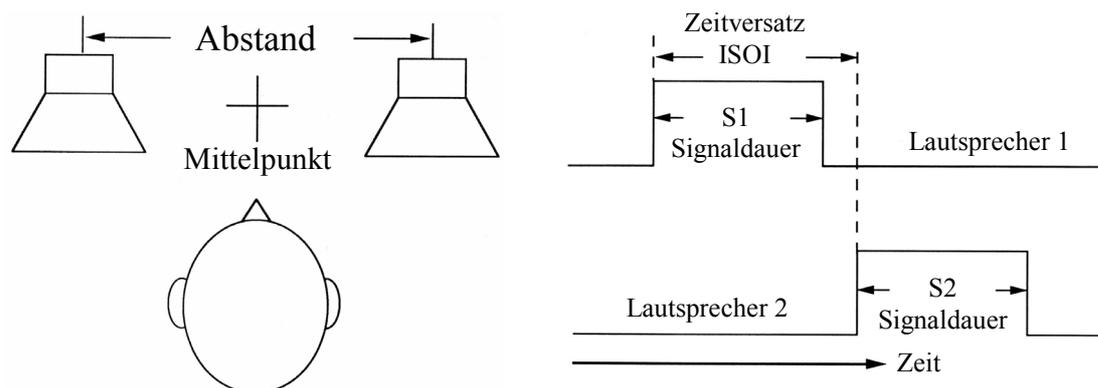


Bild 4.18: Variablen eines Hörversuchs zur Wahrnehmung von Scheinbewegungen mit zwei Lautsprechern /Gilk97/

Aus den Ergebnissen, die mit Hilfe dieses Versuchsaufbaus erzielt wurden, lässt sich schließen, dass die Dauer der verwendeten Einzelsignale und der Zeitversatz, mit dem die beiden Lautsprecher die Signale abgeben (ISOI: *Interstimulus Onset Interval*), entscheidend für die Bewegungswahrnehmung sind. Wird nur der Eindruck einer sich kontinuierlich bewegenden Schallquelle als strengstes Kriterium für die Wahrnehmung einer Bewegung herangezogen – eine sprunghafte Änderung des Hörereignisorts zählt z.B. noch nicht als wahrgenommene Bewegung – so zeigt sich, dass unabhängig vom Abstand der beiden Lautsprecher ein Zeitversatz von ca. 30-60 ms die Entstehung einer Scheinbewegung stark begünstigt. Dies gilt auch dann unverändert, wenn, wie Bild 4.19 zeigt, der Mittelpunkt der Verbindungslinie zwischen den beiden Lautsprechern seitlich verschoben wird oder die Lautsprecher vertikal angeordnet sind. Die diesen Angaben zugrunde gelegte Impulslänge des verwendeten Breitbandrauschens beträgt 50 ms. Bei einer längeren Signaldauer verschiebt sich der Bereich des für die Wahrnehmung der Scheinbewegung optimalen Zeitversatzes hin zu längeren Zeiten.

Die Zeitfaktoren haben bei dieser Versuchsanordnung einen erheblichen Einfluss auf die Entstehung einer Scheinbewegung, während die Schalleinfallrichtung trotz des richtungsabhängigen räumlichen Auflösungsvermögens des Gehörs für dieses Phänomen eher unbedeutend zu sein scheint. Dies gilt jedoch nur für das Erkennen einer Scheinbewegung und nicht für die zutreffende Zuordnung der Bewegungsrichtung. Hierbei zeigt sich, dass der prozentuale Anteil zutreffender Richtungszuordnung bei einem seitlichen Versatz der Lautsprecheranordnung um 90° deutlich sinkt (Bild 4.20).

Die Bedeutung des Zeitfaktors wird dadurch untermauert, dass es, wie Bild 4.21 belegt, für die Wahrnehmung einer auditiven Scheinbewegung keinen Unterschied macht, ob die Signale dichotisch, diotisch oder monaural präsentiert werden. Dichotisch bezeichnet hierbei das Einspielen zweier für jedes Ohr getrennter, zeitversetzter Signale, wohingegen diotisch bedeutet, dass die beiden Signale zu einem überlagerten Signal zusammengefasst wurden, das zeitgleich an beiden Ohren anlag. Die monaurale Ausgabe unterscheidet sich von der diotischen lediglich dadurch, dass nur eine Seite des Kopfhörers aktiv ist.

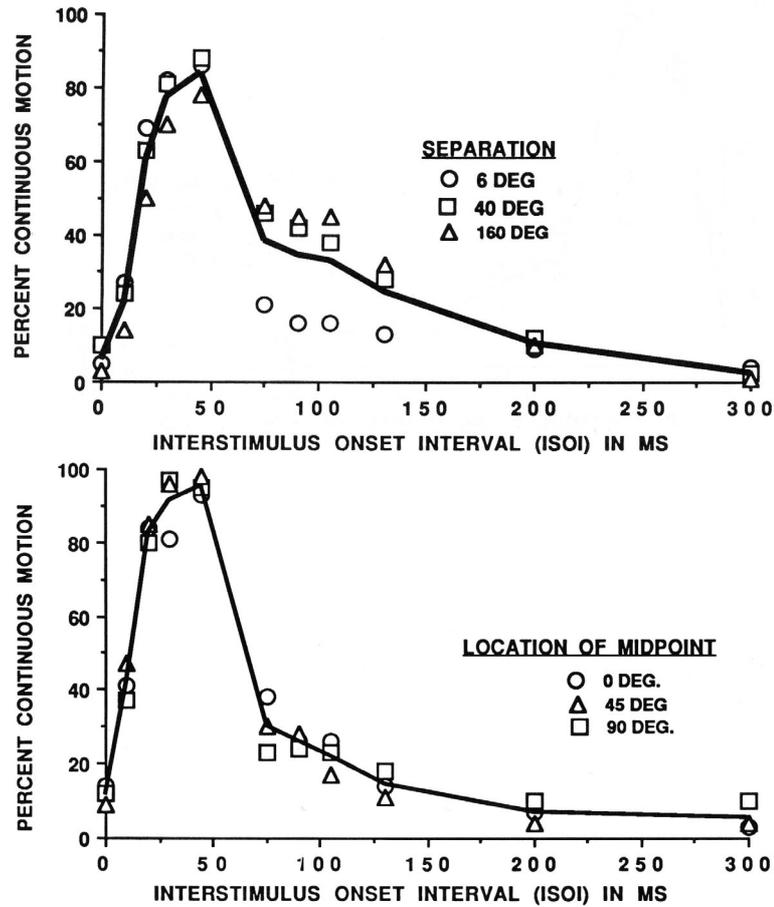


Bild 4.19: Abhängigkeit der Scheinbewegung vom Zeitversatz der Lautsprecher-signale bei Variation des Lautsprecherabstands und der Schalleinfallrichtung (Position des Mittelpunkts) /Gilk97/

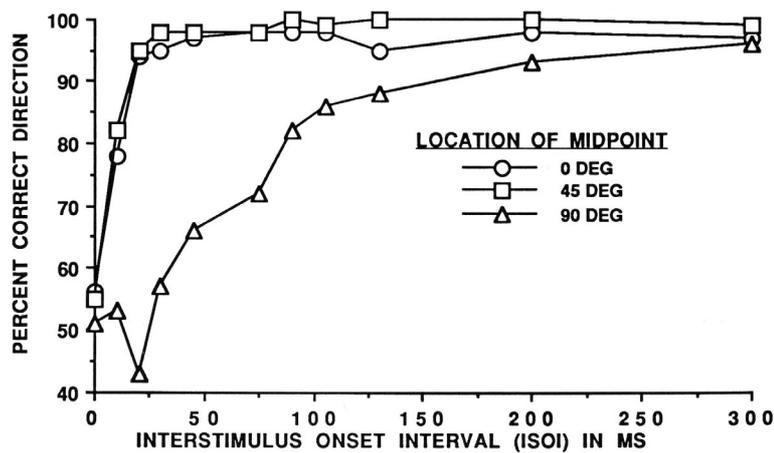


Bild 4.20: Abhängigkeit der zutreffenden Richtungsbeurteilung vom Zeitversatz der Lautsprecher-signale bei Variation der Schalleinfallrichtung (Position des Mittelpunkts) /Gilk97/

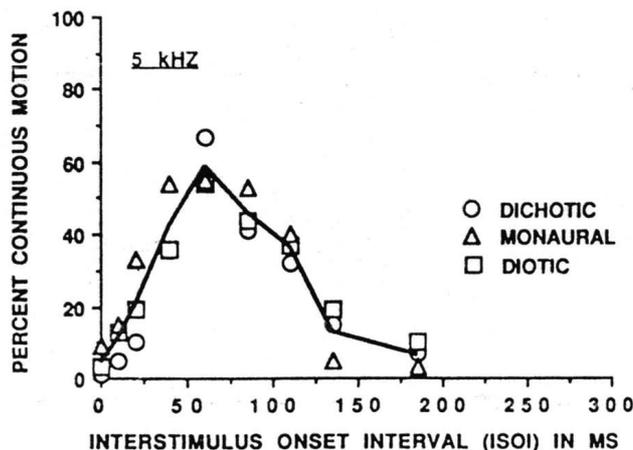


Bild 4.21: Prozentsatz der kontinuierlichen Bewegungsempfindung in Abhängigkeit vom Zeitversatz dichotisch, diotisch oder monaural präsentierter Signale /Gilk97

Die bei dieser Untersuchung eingesetzten Testsignale hatten einen 10 ms langen linearen Pegelanstieg und eine Dauer von 50 ms. Dies führt bei kurzen Versatzzeiten (<50ms) zwischen den beiden Signalen (ISOI) zu Signalüberschneidungen und bei langen Versatzzeiten (>60ms), entsprechend zu Signalpausen. Eine Richtungs-zuordnung der Bewegung ist nur bei dichotischer Signalausgabe möglich. Die Wahrnehmung einer Scheinbewegung ist jedoch monaural uneingeschränkt vorhanden, was die Bedeutung der dynamischen Pegelmodulation als monauralen Faktor für die Bewegungswahrnehmung unterstreicht.

4.2.2 Auflösung der auditiven Bewegungswahrnehmung

Die Präzision, mit der eine sich bewegende Schallquelle wahrgenommen werden kann, lässt sich durch den minimal hörbaren Bewegungswinkel (MAMA: *Minimum Audible Movement Angle*) beschreiben. Er gibt für eine bestimmte Bewegungsrichtung einer Schallquelle den Winkel an, bei dem die Bewegung gerade wahrzunehmen (hörbar) ist. Bild 4.22 zeigt, dass die Auflösung der auditiven Bewegungswahrnehmung in der Horizontalebene von der Signalfrequenz und der Winkelgeschwindigkeit abhängt, mit der sich die Schallquelle fortbewegt. Die beste Auflösung ergibt sich bei einer niedrigen Signalfrequenz und einer sich langsam bewegenden Schallquelle. Die unterste Kurve bietet den Vergleich zum minimal hörbaren Verschiebungswinkel, der bei einer statischen Schallquellenposition ermittelt wird (MAA).

Bei der isolierten Betrachtung eines 1-kHz-Testsignals ergibt sich, wie Bild 4.23 verdeutlicht, ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen dem minimal hörbaren Bewegungswinkel und der Winkelgeschwindigkeit der sich fortbewegenden Schallquelle. Die alternative Darstellungsweise im rechten Teil der Abbildung zeigt, dass sich die Kurve mit zunehmender Signaldauer asymptotisch einem Wert für die maximale räumliche Auflösung nähert, der theoretisch dem minimal hörbaren Verschiebungswinkel (MAA) entspricht.

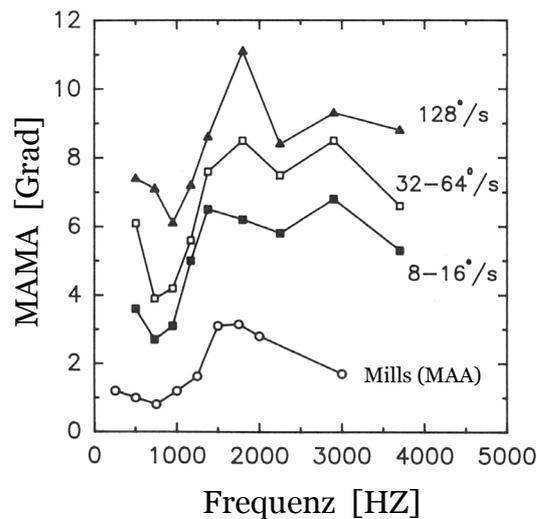


Bild 4.22: Minimal hörbarer Bewegungswinkel für verschiedene Winkelgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Signalfrequenz /Gran97/

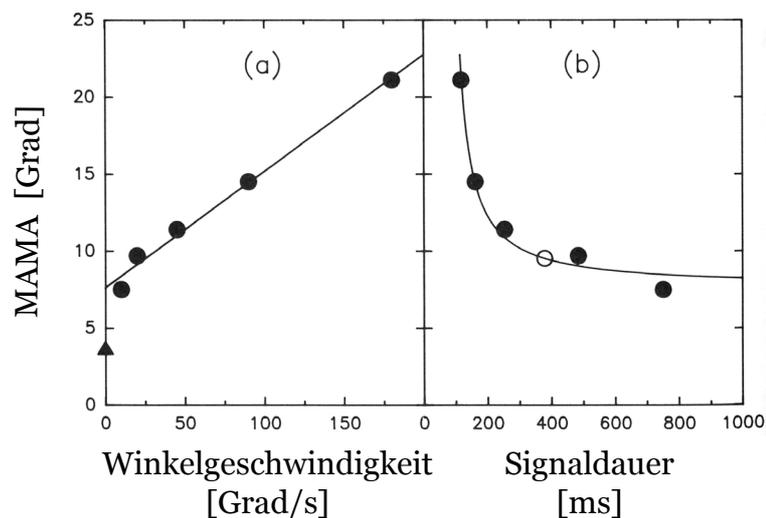


Bild 4.23: Minimal hörbarer Bewegungswinkel unter Verwendung eines 1-kHz-Testtons in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit (a) und der Signaldauer (b) /Gran97/

Als Erklärungsansätze bzw. Modelle der auditiven Bewegungswahrnehmung stehen sich die Schnapsschusshypothese (*Snapshot Hypothesis*) und der Mechanismus der Bewegungsempfindlichkeit (*Motion-Sensitive Mechanism*) gegenüber. Die Schnapsschusshypothese stützt sich auf die Annahme, dass der Mensch eine Schallquellenbewegung nicht unmittelbar wahrnimmt, sondern Momentaufnahmen einer Schallquelle anfertigt und diese miteinander vergleicht. Ist der Unterschied zwischen den Schallquellenpositionen groß genug und die Zeit zwischen zwei Momentaufnahmen ausreichend, so führt dies entsprechend zu einer Bewegungswahrnehmung. Auf die Bewegungsgeschwindigkeit wird gemäß dieser Theorie geschlossen, indem die zurückgelegte Distanz in Relation zur verstrichenen Zeit zwischen den Momentaufnahmen gesetzt wird.

Gegen die Schnappschusshypothese in ihrer ursprünglichen, sehr vereinfachten Form spricht, dass der minimal hörbare Bewegungswinkel (MAMA) signifikant ansteigt, wenn eine kontinuierliche Schallquellenbewegung dadurch ersetzt wird, dass zwei Signalimpulse (Breitbandrauschen 10ms) analog zum Bewegungsverlauf zeitversetzt aus der Start- und Endposition (ME: *Marked Endpoints*) abgegeben werden (Bild 4.24).

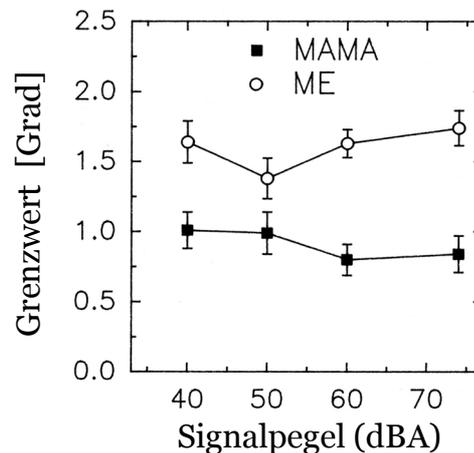


Bild 4.24: Minimal hörbare Bewegungswinkel (MAMA) /Perr93/

Neuere Ansätze der Schnappschusshypothese gehen jedoch davon aus, dass das Anfertigen der Momentaufnahme ein komplexer Prozess ist, der eine gewisse Zeit benötigt und auf Ergebnissen beruht, die mit der Integralbildung über Raum und Zeit im Zusammenhang stehen. Experimente, bei denen nur kurze statische Schallimpulse die kontinuierliche Schallquellenbewegung ersetzen, sind daher unzulänglich.

Beim zweiten Ansatz, dem Mechanismus der Bewegungsempfindlichkeit (*Motion-Sensitive Mechanism*), steht das Vorhandensein bzw. Aufdecken von speziellen bewegungssensiblen Mechanismen im Vordergrund. Dass solche bewegungssensiblen Mechanismen existieren, gilt aufgrund von verschiedenen Untersuchungen, die sowohl mit invasiven als auch nicht-invasiven physiologischen Messmethoden durchgeführt wurden, als gesichert. Darüber hinaus konnte nachgewiesen werden, dass unter bestimmten Bedingungen, Nachwirkungseffekte auftreten (*Auditory Motion Aftereffect*), was indirekt die Existenz von bewegungssensiblen Mechanismen belegt. Die Existenz der bewegungssensiblen Mechanismen erlaubt es jedoch nicht, die Schnappschusshypothese zu verwerfen, da es denkbar ist, dass erst eine Kombination aus beiden die Bewegungswahrnehmung vollständig erklärt.

5 Versuchsbeschreibung

5.1 Design und Methodik

Der Wahrnehmungsversuch wurde nach einem 3x3-faktoriellen Versuchsplan durchgeführt, bei dem die beiden unabhängigen Variablen Geschwindigkeitsgrößenordnung und Darbietungsform zwei Messwiederholungsfaktoren darstellen. Bei dem aufgestellten Wahrnehmungskriterium (abhängige Versuchsvariable) handelte es sich um die relative Geschwindigkeitseinschätzung von zwei bewegten Fremdobjekten in einer Simulationsszene. Die in Bild 5.1 dargestellte Versuchsszene zeigt eine Landstraße, die von zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen unterschiedlich schnell befahren wird. Sobald der zweite Pkw seine Fahrt aufnimmt, hat der Proband die Aufgabe, durch Betätigen einer von zwei möglichen Antworttasten zu entscheiden, welches der beiden Fahrzeuge schneller gefahren ist. Der Zeitpunkt, ab dem die Antworttasten aktiv geschaltet sind, wird dem Probanden durch Einspielung eines kurzen Sinustons akustisch angezeigt. Durch diese Vorgehensweise wird nicht nur eine vorzeitige Tastenbetätigung verhindert, sondern dem Probanden wird auch genau signalisiert, ab wann eine Entscheidung von ihm erwartet wird.



Bild 5.1: Simulationsszene

Die Belegung der Tasten alterniert von Proband zu Proband, das heißt, dass immer im Wechsel mal die rechte und mal die linke Taste angibt, dass das zweite Fahrzeug im Vergleich zum ersten (vorherigen) schneller gefahren ist. Auf diese Weise wird der tendenziellen Bevorzugung einer Taste, wie sie der Mehrzahl der Probanden in ihrer Eigenschaft als Rechtshänder unterstellt werden kann sowie der daraus resultierenden Verfälschung der Messergebnisse, entgegengewirkt.

Ferner wird dem Probanden zeitgleich mit dem Betätigen der Antworttaste ein akustisches Feedback in Form einer Sprachausgabe eingespielt, um einer möglichen Verwechslung der Tastenbelegung, die auch erst im späteren Verlauf des Versuchs auftreten kann, vorzubeugen. Die Angabe "schneller" bzw. "langsamer" bezieht sich hierbei auf die Geschwindigkeit des Vergleichsreizes (zweites Fahrzeug) in Relation zum Standardreiz (erstes Fahrzeug).

Um den Beginn und das Ende jeder einzelnen Versuchsszene deutlich voneinander abzugrenzen, wurde das Display des HMDs abwechselnd hell und dunkel geschaltet. Das Ende einer Szene ist dann erreicht, wenn der Proband eine Taste betätigt hat oder aber die maximale Szenendauer überschritten ist.

Neben der als Reaktionszeit bezeichneten Zeitspanne zwischen Freigabe und Betätigen der Taste wurde bei den einzelnen Versuchsdurchgängen auch die Selbsteinschätzung des Probanden erfasst. Die Bewertungsskala für die persönliche Einschätzung der Richtigkeit der gegebenen Antwort orientierte sich dabei an dem Schulnotensystem, mit der Vorgabe, die getroffene Entscheidung nur dann mit der Bestnote eins zu bewerten, wenn überhaupt kein Zweifel an der Richtigkeit der Einschätzung besteht. Als unabhängige Versuchsvariablen fungierten die Darbietungsform und die Geschwindigkeitsgrößenordnung der vorbeifahrenden Fahrzeuge. Die drei Faktorstufen der Darbietungsform unterschieden sich hierbei folgendermaßen:

1. Faktorstufe: visuell (keine Geräuschsimulation)
2. Faktorstufe: sowohl visuelle als auch akustische Inhalte
3. Faktorstufe: akustisch (ausschließlich binaural platzierte Geräusche)

Tabelle 5.1: Faktorstufenmatrix

	<i>120 km/h</i>	<i>60 km/h</i>	<i>30 km/h</i>
<i>visuell</i>	V120	V60	V30
<i>visuell- akustisch</i>	V+A120	V+A60	V+A30
<i>akustisch</i>	A120	A60	A30

Die Geschwindigkeitsstufen der Fahrzeuge waren für den Standardreiz auf *120 km/h*, *60 km/h* und *30 km/h* festgesetzt und wurden den einzelnen Messreihen ebenso zufällig zugeordnet wie die drei Darbietungsformen. Tabelle 5.1 zeigt, dass sich aus der Kombination der beiden unabhängigen Versuchsvariablen eine 3 X 3 Faktorstufenmatrix ergibt. Es handelt sich hierbei um *Within*-Faktoren, da der Versuchsplan vorsieht, dass der einzelne Proband sämtliche Faktorstufen durchläuft. Um die Möglichkeit aus-

zuschließen, vom Anfangsabstand der Fahrzeuge zu Beginn einer jeden Szene auf die Geschwindigkeit zu schließen, wurde die Startposition innerhalb eines festgelegten Korridors zufällig variiert. Hierbei blieb jedoch gewährleistet, dass jedes Fahrzeug innerhalb der vorgegebenen Zeitspanne von maximal vier Sekunden an dem Betrachter vorbeifährt. Auf die zufällige Variation der Startpositionen wurde vor Beginn der Untersuchung schriftlich hingewiesen.

Um die Güte der relativen Geschwindigkeitseinschätzung zu bewerten, wurde der Versuch nach der gewichteten Stufen-Methode (*weighted up-down*) durchgeführt und für jede einzelne Versuchsparekonstellation eine Unterschiedsschwelle ermittelt. Der Differenz-Limen bezeichnet hierbei den eben merklichen Reizunterschied (JND: *Just Noticeable Difference*) der zwei Fahrzeuggeschwindigkeiten.

Die bei diesem Verfahren ermittelte Wahrnehmungsschwelle ist insofern als nicht absolut anzusehen, als die Vorstellung von der Existenz einer Schwellenkurve, die sich dadurch auszeichnet, dass unterhalb einer bestimmten Reizstärke der Reiz auf gar keinen Fall, oberhalb dieser Schwelle jedoch in jedem Fall erkannt wird, für die Sinneswahrnehmung von Lebewesen nicht zutrifft. Bild 5.2 zeigt, dass die als psychometrische Funktion bezeichnete Schwellenkurve vielmehr als S-förmig anzusehen ist. Sie gibt in Abhängigkeit von der Reizstärke an, in wie viel Prozent der Fälle der Reiz tatsächlich erkannt wird und verdeutlicht somit den statistischen Zusammenhang zwischen Reizstärke und Reizerkennung.

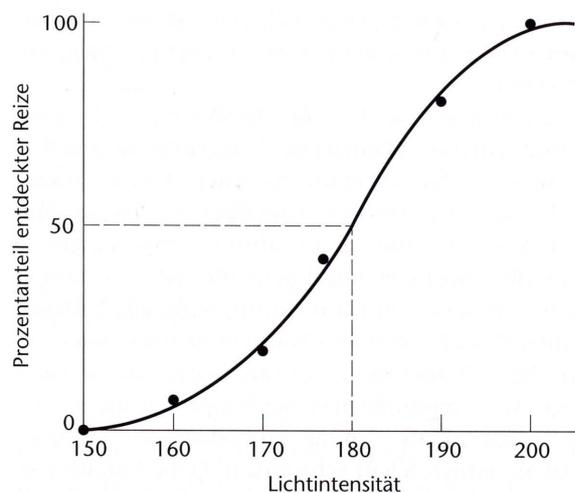


Bild 5.2: Schwellenkurve für das Entdecken eines Lichtpunkts /Gold02/

Bei der in der durchgeführten Untersuchung zur Anwendung kommenden Messung der Wahrnehmungsschwelle wurde so verfahren, dass der Standardreiz innerhalb einer Sequenz konstant gehalten wurde, wohingegen die Geschwindigkeit des im Vergleichsreiz dargebotenen Fahrzeugs in Abhängigkeit von der gefällten Einschätzung (schneller/langsamer) variierte. Jede Messsequenz wurde mit einer deutlichen Abweichung zwischen Vergleichsreiz und Standardreiz begonnen, wobei nach dem Zufallsprinzip entschieden wurde, ob die Geschwindigkeitsdifferenz der beiden nacheinander gezeigten Fahrzeuge positiv oder negativ war. Für den Fall der positiven

Anfangsgeschwindigkeitsdifferenz (Vergleichsreiz mit höherer Geschwindigkeit) ergab sich bei diesem Messverfahren folgende Logik: Bei einer Einschätzung seitens des Probanden, das Fahrzeug sei schneller gefahren, wurde im darauffolgendem Umlauf die Geschwindigkeit des Vergleichsfahrzeugs um 1%-Punkt verringert, wohingegen sich bei gegenteiliger Einschätzung eine Erhöhung der Geschwindigkeit um 3%-Punkte ergab. Diese ungleiche Änderung in Abhängigkeit vom Antwortverhalten entspricht dem Prinzip der gewichteten Up-Down-Methode, die sich im Vergleich zu anderen Verfahren dadurch auszeichnet, dass zur Bestimmung der Unterschiedsschwelle nur eine vergleichsweise geringere Anzahl von Messwiederholungen benötigt wird /Kaer91/. Da dem Probanden nur die Antwortmöglichkeiten "schneller" oder "langsamer" zur Auswahl stehen, entspricht diese Form der adaptiven Schwellenmessung einem Paarvergleich mit erzwungener Wahl (*forced choice*).

Die gewichtete Up-Down-Methode kann als Erweiterung der einfachen Up-Down-Methode angesehen werden, da beide Verfahren sich lediglich dadurch unterscheiden, dass bei der gewichteten Methode nicht gleiche sondern ungleiche Schrittweiten zur Veränderung des Vergleichsreizes eingesetzt werden. Die bei dem durchgeführten Wahrnehmungsversuch gewählte Gewichtung der Schrittweiten von eins zu drei ($S_{up}/S_{down} = 1/3$) bewirkte, dass die Messwerte zu dem Punkt der psychometrischen Funktion hin konvergierten, bei dem statistisch gesehen in 75 % aller Fälle eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen den beiden Fahrzeugen entdeckt wird. Die allgemeine Gesetzmäßigkeit für einen Konvergenzpunkt mit der Entdeckungswahrscheinlichkeit p lautet:

$$S_{up} \cdot p = S_{down}(1 - p) \Leftrightarrow p = \frac{1}{1 + \frac{S_{up}}{S_{down}}}$$

Sie zeigt, dass bei der Wahl gleich großer Schrittweiten die gewichtete in die einfache Up-Down-Methode übergeht und für diesen Fall die absolute Wahrnehmungsschwelle einer Person bestimmt wird, bei der definitionsgemäß in der Hälfte der Fälle eine Reizentdeckung vorliegt.

Das Abbruchkriterium für eine Messsequenz war bei dem durchgeführten Wahrnehmungsversuch das Erreichen des achten Umkehrpunktes. Als Umkehrpunkt gilt in diesem Zusammenhang derjenige Paarvergleich, bei dem der Proband seine Einschätzung gegenüber dem vorherigen Umlauf ändert. Wird z.B. die Messsequenz mit einer deutlich positiven Geschwindigkeitsdifferenz begonnen und der Proband antwortet richtigerweise mit der Einschätzung "schneller", so ist innerhalb der Messfolge dann ein Umkehrpunkt erreicht, wenn der Proband zum ersten mal behauptet, das zweite Fahrzeug sei langsamer gefahren. Wird innerhalb von fünfzig Messdurchläufen der achte Umkehrpunkt nicht erreicht, so wird die Messung abgebrochen und als unbrauchbar eingestuft.

In den Vortests zeigte sich, dass die Geschwindigkeitsdiskriminierungsleistung von Testperson zu Testperson stark variiert und dass eine als deutlich angenommene

Geschwindigkeitsdifferenz von 25% nicht in jedem Fall ausreicht, die Messreihe deutlich oberhalb der Wahrnehmungsschwelle zu eröffnen. So zeigt Bild 5.3 eine Messreihe aus einem Vortest, bei dem der Anfangsschwierigkeitsgrad die Testperson deutlich überforderte, da sich im Verlauf der Messung für die Wahrnehmungsschwelle eine Niveau abzeichnete, das deutlich oberhalb des Startwertes lag.

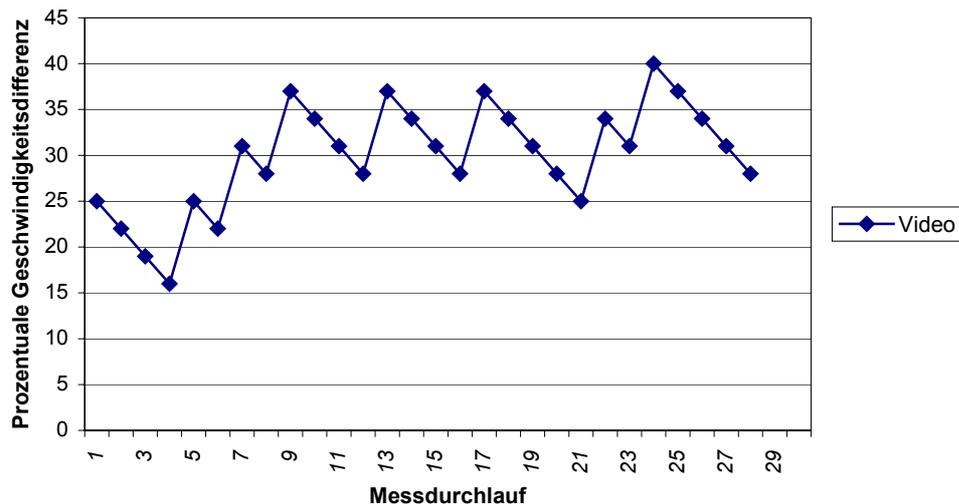


Bild 5.3: Messkurve eines Vortests mit zu hohem Anfangsschwierigkeitsgrad

Um zu verhindern, dass einerseits eine zu große Anfangsdifferenz der Geschwindigkeiten zu überlangen Messreihen führt und andererseits der Anfangsschwierigkeitsgrad den Probanden überfordert, wurde dem Hauptversuch ein Vorversuch vorangestellt. Dieser hatte die primäre Aufgabe, das Leistungsniveau des Probanden zu bestimmen und daraus eine geeignete Startvorgabe für den Hauptversuch abzuleiten. Die Anfangsdifferenz der beiden Fahrzeuggeschwindigkeiten lag bei 50% und die Schrittweite war mit drei zu neun Prozentpunkten im Vergleich zum Hauptversuch verdreifacht. Der Vorversuch beschränkte sich mit den Faktorstufen *visuell* und *akustisch* auf die Variation der Darbietungsform. Die festgelegte Geschwindigkeitsstufe war deckungsgleich mit der mittleren Faktorstufe im Hauptversuch (Fahrzeuggeschwindigkeit im Standardreiz = 60 km/h). Die individuellen Startdifferenzen für die neun Messreihen des Hauptversuchs orientierten sich an den empirisch ermittelten Schwellenwerten des Vorversuchs, wobei durch einen Aufschlag von 10% sichergestellt wurde, dass das Anfangsniveau den Probanden auch dann nicht überfordert, wenn eine andere noch nicht getestete Faktorstufenkombination möglicherweise eine schlechtere Wahrnehmungsleistung nach sich zieht.

Neben der Bestimmung individuell angepasster Startwerte hatte der Vorversuch ferner die Aufgabe, den Probanden an die Versuchsumgebung und den Versuchsablauf heranzuführen und eventuell vorhandene Unsicherheiten oder Unklarheiten auszuräumen. Die

beiden Messreihen des Vorversuchs waren ungekürzt – als Abbruchkriterium galt hier ebenfalls das Erreichen des achten Umkehrpunkts. Für den Hauptversuch hat diese lange Eingewöhnungsphase den Vorteil, dass falls ein Lerneffekt bei dieser Versuchsanordnung zu beobachten sein sollte, sich dieser weniger stark auf die Messwerte auswirkt, da der Lernprozess schon zu einem großen Teil abgeschlossen sein dürfte bevor der Hauptversuch beginnt.

5.2 Ablauf

Um eine Variabilität zwischen mehreren Versuchsleitern zu verhindern, wurde die gesamte Versuchsreihe von einer einzigen Person (Autor dieser Arbeit) durchgeführt. Ferner wurde der Versuchsablauf so weit wie möglich standardisiert und automatisiert. Dies wurde zum einen durch eine detaillierte schriftliche Versuchsanleitung erreicht, die dem Probanden vor Beginn des Versuchs vorgelegt wurde. Hierdurch und durch die ergänzende Wiederholung der wichtigsten Informationen mittels einer computer-gesteuerten Sprachausgabe konnte auf mündliche Anweisungen weitgehend verzichtet werden. Zum anderen wurde eine Software zur Versuchsablaufsteuerung und -protokollierung entwickelt, die nach einem strengen Zeitplan und Versuchsschema den Versuchsverlauf bis ins kleinste Detail regelt und eine direkte Einflussnahme des Versuchsleiters auf die Messergebnisse somit auf ein Minimum reduziert. Die Aufgabe des Versuchsleiters beschränkte sich neben der technischen Überwachung auf die Eingabe der von den Versuchspersonen mündlich geäußerten Noten für ihre Selbsteinschätzung, die über eine Computertastatur erfolgte. Aufgrund der höheren Zuverlässigkeit und dem verhältnismäßig geringen Aufwand wurde dieser Vorgehensweise der Vorzug vor einer automatischen Spracherkennung gegeben.

Um die Konzentrationsfähigkeit der Probanden möglichst konstant zu halten und eine Überforderung zu verhindern, wurde der gesamte Versuchsablauf in vier Abschnitte unterteilt, die jeweils durch eine Erholungspause von fünf Minuten Länge unterbrochen wurden. Während dieser Pausen wurden die Versuchspersonen gebeten, das HMD abzunehmen und sich körperlich zu betätigen. Der erste Versuchsabschnitt setzte sich dabei aus den beiden Messreihen des Vorversuchs zusammen. Die folgenden drei Abschnitte umfassten die neun Messreihen des Hauptversuchs, die in drei gleich große Blöcke aufgeteilt wurden.

Um die stereoskopische Wahrnehmung der einzelnen Probanden sicherzustellen, wurde zu Beginn jedes Versuchsabschnitts zunächst getestet, ob das HMD richtig aufgesetzt und justiert wurde. Bei diesem Test wurde ein Random-Dot-Stereogramm eingesetzt, bei dem sich für den Probanden nur dann eine oder mehrere Flächen von einem diffusen Punktmuster räumlich abheben, wenn die Einstellung korrekt vorgenommen wurde /Kell95/. Das hierbei verwendete Darstellungsprogramm wurde unter VisualC++ unter zur Hilfenahme der *Microsoft Foundation Classes* (MFC) entwickelt und die eingesetzten Stereogramme mit einer Bildverarbeitungssoftware erzeugt.

Zur Überprüfung der Zuverlässigkeit und Reproduzierbarkeit (Reliabilität) des Messverfahrens wurde im Vorfeld ein Test mit ebenfalls neun Messreihen vorgenommen, bei dem sich jedoch im Unterschied zum normalen Versuchsablauf eine bestimmte Faktorstufenkombination vier mal wiederholt. Nach Ablauf aller Messreihen im Hauptversuch wurde zudem bei drei Probanden eine zufällig ausgewählte Faktorstufe wiederholt.

6 Zugangsbedingungen

6.1 Sehtest

Der im Folgenden erläuterte Sehtest wurde durchgeführt, um auszuschließen, dass Probanden an der wahrnehmungspsychologischen Untersuchung teilnehmen, bei denen eine Sehschwäche vorliegt, die auch unter Verwendung entsprechender Sehhilfen (Brille, Kontaktlinse) die Fähigkeit zur Geschwindigkeitsdiskriminierung stark beeinträchtigen könnte.

Der Sehtest wurde mit dem Binoptometer II der Herstellerfirma Oculus Optikgeräte GmbH durchgeführt, das mir vom Fachgebiet für Arbeitsphysiologie, Arbeitsmedizin und Infektionsschutz der BUGH-Wuppertal zur Verfügung gestellt wurde. Gemäß den Empfehlungen der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft zur Qualitätssicherung bei sinnesphysiologischen Untersuchungen (Stand: Januar 2001) ist dieses Sehtestgerät dafür geeignet, gutachterliche Sehschärfeprüfungen nach den internationalen (DIN EN ISO 8596 / 8597) und nationalen Normen (DIN 58220 Teil 3, 5 und 6) durchzuführen. Darüber hinaus ist das Gerät dafür geeignet, Binokularfunktionen sowie den Farbsinn zu testen. Insgesamt stehen über 20 monokulare und binokulare Tests auf optisch hochwertiger Glasträgerscheibe zur Verfügung. Der nach dem Prinzip des freisichtigen Optometers aufgebaute Binoptometer II erlaubt die Testdarbietung in allen Entfernungen zwischen ∞ und 33 cm. Zur Ansteuerung des Binoptometers wurde die Windowssoftware des Geräteherstellers in der Programmversion 2.08 verwendet, die es ermöglicht, neben den standardisierten Tests nach StVo, G25 und G37, eigene Prüfsequenzen zu programmieren.

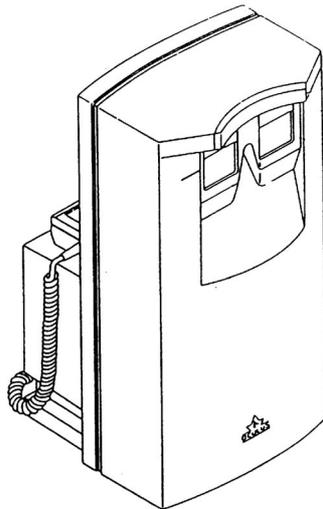


Bild 6.1: Binoptometer

Der durchgeführte Sehtest wurde auf der Grundlage des berufsgenossenschaftlichen Grundsatzes für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung für Bildschirm-Arbeitsplätze (G 37) durchgeführt, in dem die Kriterien dafür festgelegt sind, ob eine Person an einem Bildschirmarbeitsplatz tätig sein darf oder ob dauernde oder befristete gesundheitliche Bedenken bestehen. Im Einzelnen wurden mit dem Binoptometer die in dem berufsgenossenschaftlichen Grundsatz definierten Siebttests zur Überprüfung der Sehschärfe, Stereopsis (räumliches Sehen), Phorie (Stellung der Augen) und des Farbensinns durchgeführt. Das zentrale Gesichtsfeld der Probanden wurde anhand einer sog. Standard-Tafel überprüft.

Zur Teilnahme an der wahrnehmungspsychologischen Untersuchung wurden die in Tabelle 6.1 zusammengefassten Mindestanforderungen aus dem Grundsatz für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung G37 übernommen. Bei der Bestimmung der Sehschärfe wurde die Prüferentfernung insofern an die gegebenen Verhältnisse angepasst, als nicht der übliche Bildschirm Betrachtungsabstand von 55 cm, sondern die bei dem eingesetzten HMD vorhandene Projektionsentfernung von 91cm maßgeblich war. Die Prüferentfernungen "unendlich" für den Fernbereich und 33 cm für den Nahbereich blieben unverändert.

Bei vorliegender Fehlsichtigkeit wurden monofokale Sehhilfen zugelassen, da diese auch unter dem HMD getragen werden konnten. Die Protokollierung der Untersuchungsergebnisse erfolgte über die gerätespezifische Windowssoftware, die es nicht nur erlaubt, das zusammenfassende Prüfungsergebnis, sondern auch jeden einzelnen der insgesamt 16 Tests personengebunden abzuspeichern (Bild 6.2).

Tabelle 6.1: Mindestanforderungen an im Siebttest zu prüfende Merkmale /G37/

Merkmal	Mindestanforderungen nach G37
Sehschärfe Ferne	0,8/0,8
Sehschärfe Nähe	
im Allgemeinen bei 33 cm	0,8/0,8
im Allgemeinen bei 55 cm	0,8/0,8
Stereopsis	regelrecht
Phorie	regelrecht
zentrales Gesichtsfeld	regelrecht

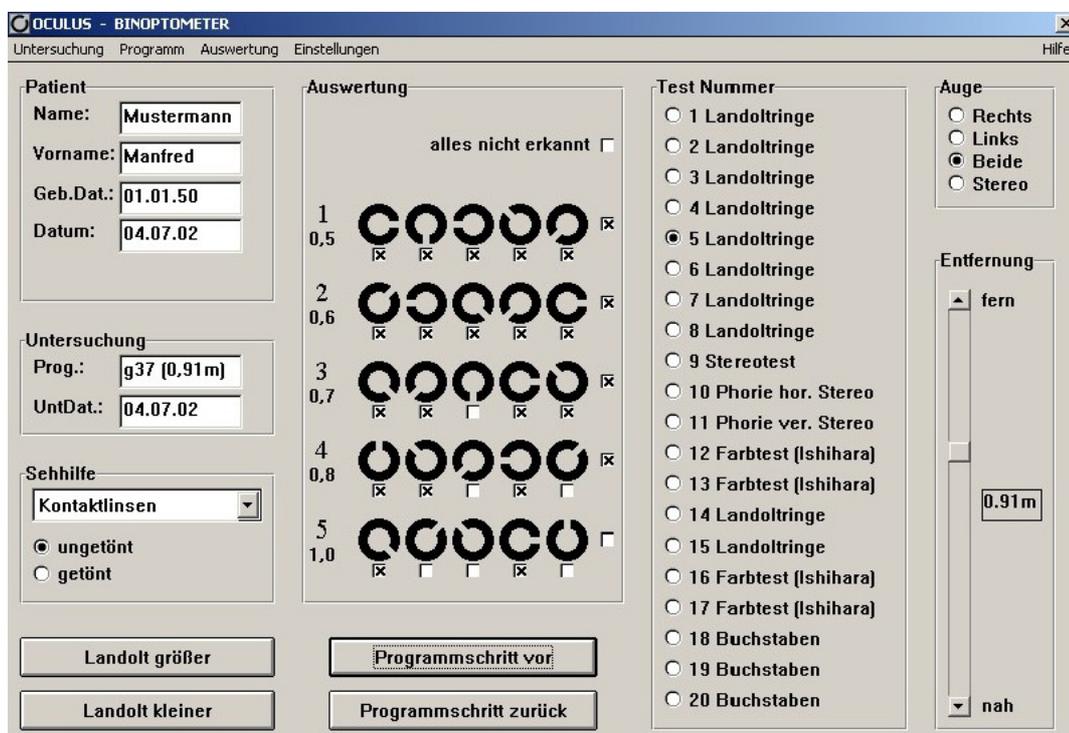


Bild 6.2: Steuer- und Protokollierungssoftware des Binoptometers

6.1.1 Sehschärfepfung

Bei der Sehschärfepfung (Visustest) wird das Auflösungsvermögen des visuellen Systems überprüft. Hierzu wird, mit Hilfe verschiedener standardisierter Verfahren, der Schwellenwert für die Fähigkeit bestimmt, feine Details eines Objektes wahrzunehmen, deren Erkennbarkeit vom Sehinkel abhängt /Goer96/. Es wird, je nachdem, ob die Prüfung mit oder ohne Sehhilfe bzw. Korrektur (Brille, Kontaktlinse, usw.) erfolgt, zwischen der freien und der korrigierten Sehschärfe unterschieden. Aus den für jedes Auge getrennt ermittelten Schwellenwerten werden die beiden monokularen Seh-

schärfe bestimmt. Die binokulare Sehschärfe ergibt sich aus der Sehtestung des Augenpaars. Hierbei führt die binokulare Summation in der Regel zu einer höheren Sehschärfe.

Historisch betrachtet handelt es sich bei der Bestimmung der Punktsehschärfe um eines der ersten Messverfahren zur Prüfung der optischen Auflösung. Gemäß der klassischen Definition geht die Sehschärfeprüfung von einer Reizsituation aus, bei der eine Blende vor einer diffus beleuchteten oder leuchtenden Fläche aufgestellt wird, die in einem definierten Abstand (etwa 5 mm) zwei Löcher aufweist (vgl. Bild 6.3). Dieser Lochabstand liefert in Relation zur Entfernung, bei der die beiden Löcher gerade noch als getrennte Lichtpunkte erkannt werden, ein Maß für das Auflösungsvermögen des visuellen Systems /Hajo80/.

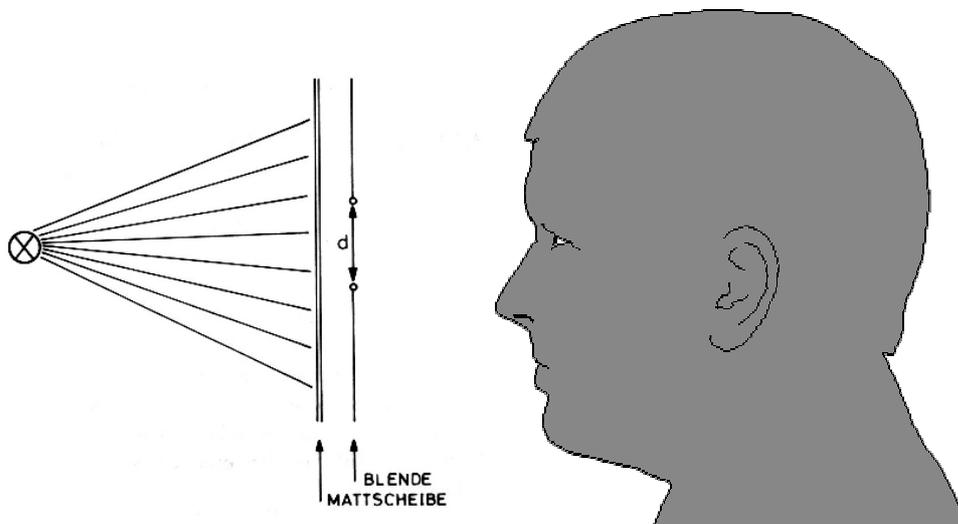


Bild 6.3: Punktsehschärfe /Hajo80/

Die Punktsehschärfe ist dabei sehr stark von den Prüfbedingungen wie Durchmesser und Präzision der Löcher, Leuchtdichte, Streulicht, Kontrast, Betrachtungswinkel usw. abhängig und spielt in ihrer klassischen Auslegung für die Bestimmung der Sehschärfe nur noch eine sehr untergeordnete Rolle. An ihre Stelle sind Prüfverfahren getreten, die normierte Sehzeichen einsetzen. Darüber hinaus existieren noch Verfahren, die Reaktionen des visuellen Systems (Augenbewegungen, Pupillenreaktion, elektrische Potentialänderungen usw.) auf verschiedene Reizmuster einsetzen, um so die Sehschärfe indirekt zu bestimmen bzw. abzuschätzen. Diese Verfahren werden als Verfahren der objektiven Sehschärfebestimmung bezeichnet.

Das Erkennen normierter Sehzeichen (Optotypen) in bestimmter Größe und Entfernung hat einen großen Praxisbezug und ist als Sehschärfekriterium vergleichsweise unempfindlich gegenüber Schwankungen. Buchstaben haben den Nachteil, dass sie nicht wie Optotypen in verschiedenen Lagen präsentiert werden können und das Beherrschen lateinischer Buchstaben (Lesekompetenz) voraussetzen. Die Empfehlung der DOG (Deutsche Ophthalmologische Gesellschaft) aus Gründen der Vergleichbarkeit generell

nur den Optotyp Landoltring einzusetzen, wurde bei der durchgeführten Sehschärfepfung befolgt.

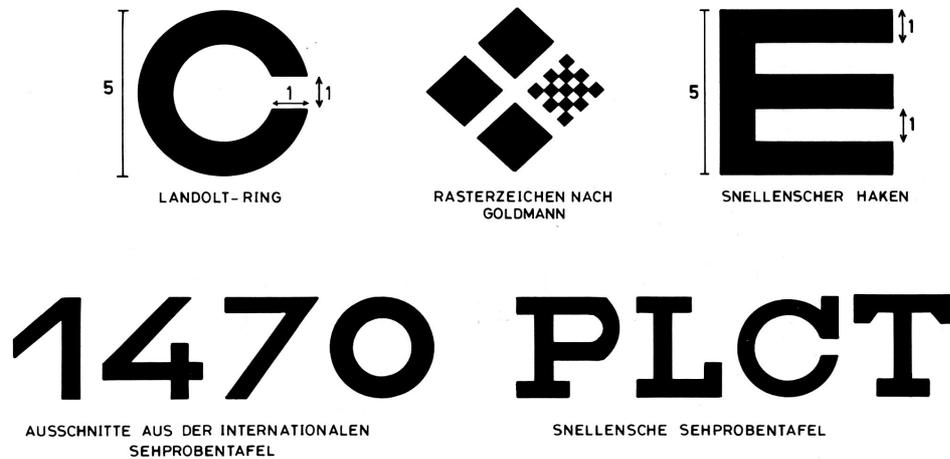


Bild 6.4: Internationale Sehzeichen /Hajo80/

Wie bei allen Optotypen bestimmt auch beim Landoltring die Größe des zu erkennenden kritischen Details im Verhältnis zur Darstellungsentfernung die Sehschärfe. Die Öffnung des Landoltrings stellt das zu erkennende kritische Detail dar, dessen Größenverhältnis zum Außendurchmesser, unabhängig von der Darstellungsgröße und -entfernung, definitionsgemäß eins zu fünf beträgt. Der Visus ist eine einheitslose Größe und entspricht dem Kehrwert des in Minuten gemessenen Sehwinkels, unter dem das kritische Detail, in diesem Fall die Öffnung des Landoltrings, gerade noch wahrgenommen wird (Bild 6.5). Ein Auflösungsvermögen von einer Winkelminute bzw. ein Visus von 1,0 wird unter Einhaltung der normierten Prüfbedingungen bei Normal-sichtigkeit (Emmetropie) problemlos erreicht.

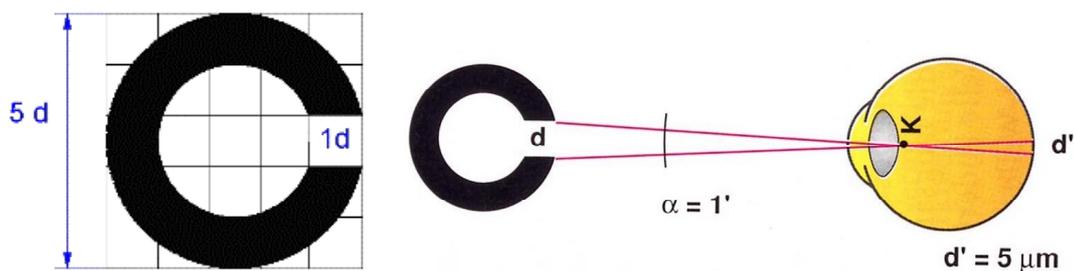


Bild 6.5: Bestimmung der Sehschärfe anhand eines Landoltrings /Schm01/

Bei der Verwendung von Optotypen können, mit dem Grenz- und dem Konstanzverfahren, prinzipiell zwei verschiedene Messverfahren zur Ermittlung der Sehschärfe eingesetzt werden. Beim Grenzverfahren werden abwechselnd ober- und unter-schwellige Reize dargeboten, die kontinuierlich solange verändert werden, bis die Testperson sie nicht mehr bzw. erstmalig richtig erkennt. Anschließend wird aus den so

gefundenen Schwellenwerten ein Mittelwert gebildet, wobei die genauen Bestimmungsalgorithmen von Verfahren zu Verfahren variieren.

Im vorliegenden Fall wurde mit dem Binoptometer ein Sehtestgerät verwendet, bei dem das Konstanzverfahren zur Anwendung kommt. Dieses Verfahren beruht auf der Erkenntnis, dass das Erkennen eines Optotyps bestimmter Größe an eine bestimmte Wahrscheinlichkeit geknüpft ist, die sich durch eine bestimmte psychometrische Funktion darstellen lässt. Wie Bild 6.6 zeigt, hat die psychometrische Kurve bei linearer Unterteilung der Ordinate und logarithmischer Größenabstufung der Landoltringe auf der Abszisse einen S-förmigen Verlauf. Der Prozentsatz richtiger Antworten liegt für große (überschwellige) Optotypen bei 100% und nimmt in der Transitionszone solange kontinuierlich ab, bis für sehr kleine (unterschwellige) Optotypen die Rate-Wahrscheinlichkeit erreicht wird. Für gutachterliche Zwecke ergibt sich die Sehschärfe in der Regel aus der Optotypengröße, bei der zu 60% das Sehzeichen richtig erkannt wird.

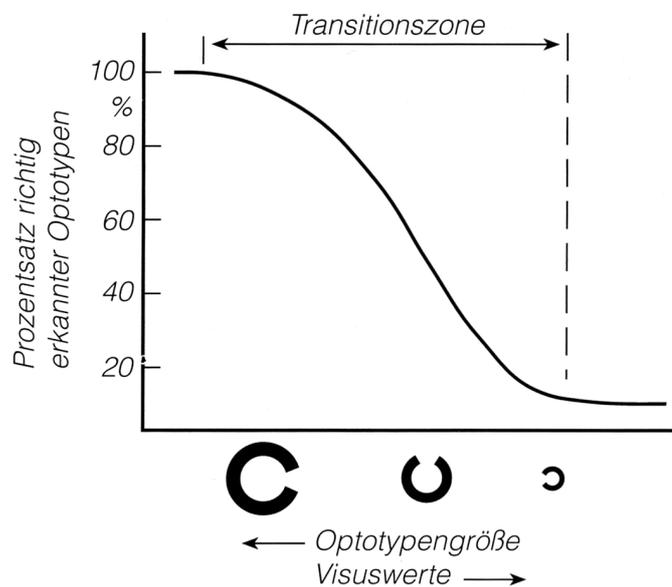


Bild 6.6: Psychometrische Funktion der Sehschärfe/Meth96/

Bei der Durchführung einer Sehschärfepfung ist es in der Praxis aus Zeitgründen nicht möglich, so viele verschiedene Optotypen in den verschiedenen Größenordnungen darzubieten, dass der gesamte Bereich der psychometrischen Kurve abgedeckt wird. Daher wird zum einen auf die Darbietung von Optotypen im unterschweligen Bereich verzichtet und zudem die Anzahl der Optotypen und die Anzahl der Darbietungen pro Größenstufe stark eingeschränkt.

Im vorliegenden Fall wurden den Probanden mehrere Reihen gleich großer Optotypen dargeboten und diejenige Optotypengröße bestimmt, für die die Erkennungsrate 60% betrug. Eine Visusstufe galt entsprechend als erreicht, wenn von den fünf mit verschiedenen Öffnungsrichtungen dargebotenen Landoltringen drei richtig erkannt wurden /DIN 58220/. Eine Reihe gleich großer Optotypen bestand aus drei bzw. fünf unterschiedlichen Sehzeichen. Mit den vier Hauptrichtungen oben, unten, rechts und links sowie den entsprechenden Zwischenpositionen wurden insgesamt acht mögliche

Öffnungsrichtungen des Landoltrings unterschieden. Um zu berücksichtigen, dass das Konstanzverfahren bei dieser Vorgehensweise nur unvollständig bzw. stark eingeschränkt angewendet wird, wird mittels der Abbot'schen Gleichung die korrigierte Erkennungsrate K_{ER} bestimmt. Sie gilt als Schätzwert für den Prozentsatz tatsächlich erkannter Optotypen und berechnet sich nach:

$$K_{ER} = \frac{N(n-1) - Fn}{N(n-1)}$$

Die Bedeutung der verschiedenen Variablen ergibt sich aus Tabelle 6.2, in der einige Werte für die korrigierte Erkennungsrate beispielhaft aufgeführt sind.

Tabelle 6.2: Korrigierte Erkennungsrate/Meth96/

Anzahl verwendeter Optotypen (n)	Anzahl der Darbietungen (N)	Anzahl falscher Antworten (F)	Prozentsatz richtig erkannter Optotypen (RO)	Korrigierte Erkennungsrate (K_{ER})
8	5	1	70	0,77
8	5	2	60	0,54
8	5	3	50	0,31
8	10	3	70	0,66
8	10	4	60	0,54
8	10	5	50	0,43

Der als Akkommodationsbreite bezeichnete Bereich, bei der die Augenlinse durch Formveränderung dazu in der Lage ist, ihre Brechkraft auf verschiedene Objektentfernungen einzustellen, beträgt bei einem emmetropem Auge etwa sieben Dioptrien. Ausgehend von der Definition der Einheit Dioptrien, die die Brechkraft einer Linse durch den Kehrwert der Entfernung des Brennpunktes von der Linse angibt, entspricht dies einem Entfernungsbereich von ∞ bis zum einem Nahpunkt Abstand von 14 cm. Allgemein gilt für die Akkommodationsbreite folgende Bestimmungsformel:

$$\text{Akkommodationsbreite} = 1/\text{Nahpunkt} - 1/\text{Fernpunkt} [\text{dpt}]$$

Eine Kurzsichtigkeit (Myopie) ist zu attestieren, wenn ein normaler Visuswert für den Nahbereich und ein unterdurchschnittlicher Visuswert für den Fernbereich vorliegt. Bei der Über- bzw. Weitsichtigkeit (Hypermetropie) trifft entsprechend das Gegenteil zu. Beide Fehlsichtigkeiten zeichnen sich durch eine normale Akkommodationsbreite aus. Der verschobene Fern- bzw. Nahpunkt lässt sich mittels einer Monofokalbrille (Einstärkenbrille) bzw. Kontaktlinse korrigieren, ohne den jeweils anderen Bereich negativ zu beeinflussen. Bei einer eingeschränkten Akkommodationsbreite ist dies nicht

ohne weiteres möglich. Eine Multifokalbrille ermöglicht zwar, ebenso wie eine Gleitsichtbrille, bei der die verschiedenen Stärkenbereiche nicht scharf durch eine Trennungslinie, sondern durch einen Übergangsbereich mit kontinuierlicher Stärkenveränderung voneinander getrennt sind, ein scharfes Sehen sowohl für die Ferne als auch für die Nähe. Dies ist jedoch mit der Einschränkung verbunden, dass der Blickwinkel bzw. die Kopfhaltung darüber entscheidet, welcher Entfernungsbereich auf der Netzhaut scharf abgebildet wird. Dies kann zu erheblichen Irritationen führen, die jedoch teilweise durch einen Gewöhnungsprozess wieder kompensiert werden können.

Die Ursachen für eine Einschränkung der Akkommodationsbreite sind vielschichtig. Liegt eine altersbedingte geringere Akkommodationsbreite vor, so ist die Presbyopie, bei der die Ursache in der verringerten Elastizität der Augenlinse zu suchen ist, von der Altershypermetropie zu unterscheiden, bei der eine Brechkraftverminderung der Augenmedien die Nahakkommodation beeinträchtigt und zugleich auch den Fernpunktstand verschiebt. Als weitere Ursachen für eine verringerte Sehschärfeleistung sind u.a. Stellungsanomalien oder Unregelmäßigkeiten der Augenmedien wie Trübungen, Vernarbungen usw. zu nennen. Von Schwachsichtigkeit (Amblyopie) spricht man, wenn die Sehschärfe unter einem Zehntel der Norm liegt.

Bei dem Sehtest waren weder Multifokalbrillen noch Gleitsichtbrillen zugelassen. Der Binoptometer verfügt zwar über die Möglichkeit die Einblickrichtung mittels eines schwenkbaren teildurchlässigen Spiegels auf die jeweiligen Entfernungsbereiche anzupassen, eine Übertragbarkeit der so ermittelten Sehleistung auf die Sichtverhältnisse unter dem HMD wäre jedoch nicht zulässig. Diese Einschränkung hatte jedoch keinerlei Auswirkung, da keine Versuchsperson eine derartige Brille trug. Eine altersbedingte Einschränkung der Akkommodationsbreite, die in erster Linie das Tragen einer solchen Brille erforderlich macht, war bei der gegebenen Altersstruktur nicht zu erwarten, da diese statistisch erst bei einem Alter von über vierzig Jahren auftritt (Bild 6.7).

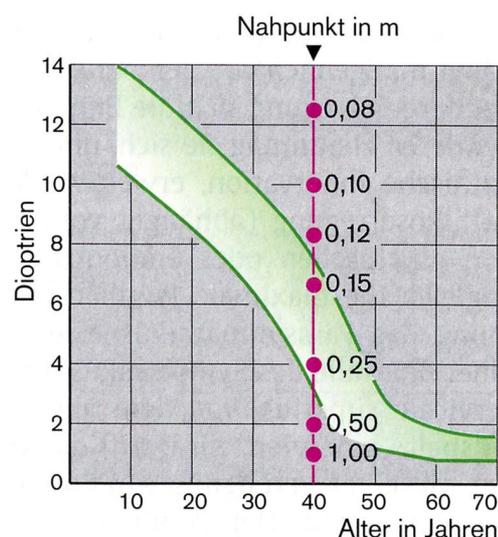


Bild 6.7: Altersabhängigkeit der Akkommodationsbreite /Klin01/

6.1.2 Stereopsis (räumliches Sehen)

Der Begriff Stereopsis bzw. Stereoskopie wurde von dem Physiker Charles Wheatstone (1802 – 1875) geprägt. Er erfand das Stereoskop, das dem Betrachter für jedes Auge getrennt ein Bild präsentiert. Er verwendete seinen Versuchsaufbau, bestehend aus zwei perspektivischen Zeichnungen und winklig angebrachten Spiegeln (Spiegelstereoskop), um zu beweisen, dass der Mensch mit jedem Auge nur eindimensional sieht, und dass die dritte Dimension erst im Gehirn gebildet wird /Hoff02/. Mit der Erfindung einer zweilinsigen Kamera wurde es möglich, statt Zeichnungen Fotografien unter einem Stereoskop zu betrachten, die aufgrund des Linsenabstands die unterschiedlichen Perspektiven eines Augenpaares wiedergeben. Wie beim binokularen Sehen weichen die Bildinhalte der beiden Fotografien je nach Abstand der abgebildeten Elemente von der fokussierten Bildebene mehr oder weniger voneinander ab.

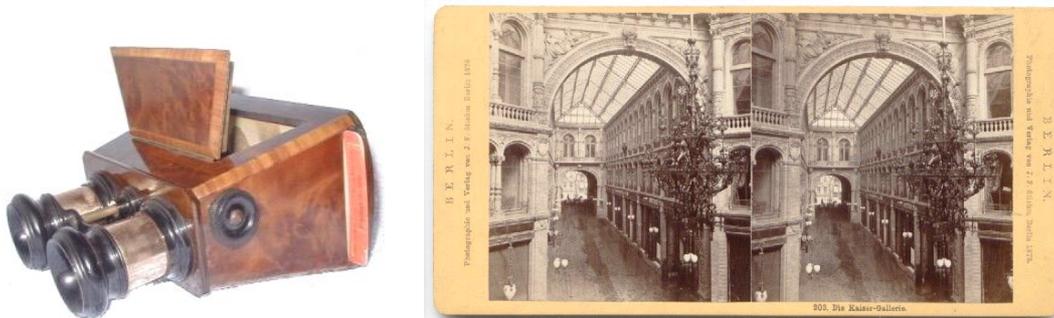


Bild 6.8: Brewster Stereoskop mit einer Stereofotografie der Berliner Kaiser-Galerie um 1900

Das Prinzip, den beiden Augen leicht voneinander abweichende Bildinhalte zu präsentieren, um dadurch eine räumliche Tiefe zu erzeugen, wurde von verschiedenen 3D-Visualisierungssystemen übernommen.

Der Binoptometer testet die Stereopsis mittels mehrerer polarisierter Doppelbalken, die beim Betrachter unterschiedliche Querdisparationen erzeugen. Die einzelnen Querdisparationen entstehen dadurch, dass aufgrund der Polarisierung die jeweils rechten Balken nur für das linke Auge und umgekehrt die linken Balken nur für das rechte Auge sichtbar sind. Der Betrachter nimmt die Doppelbalken als einzelne in einer bestimmten Entfernung zu ihm stehende Balken wahr. Die wahrgenommene Entfernung wird durch die Größe des Zwischenraums bestimmt, der die beiden Balken voneinander trennt. Aufgrund der unterschiedlichen Querdisparationen entsteht eine räumliche Tiefenstaffelung, die vom Betrachter zu erkennen und anzugeben ist. Wie Bild 6.9 zeigt, ist hierzu jeder Balken mit einer Zahl versehen, so dass relative Entfernungsangaben wie „neun vor sechs“, „drei vor zwölf“ usw. möglich sind. Neben den Zahlen enthält der Test einen unpolarisierten Punkt in der Mitte, der aufgrund der fehlenden Querdisparationen im Vergleich zu den Balken als „weiter entfernt“ einzustufen ist.

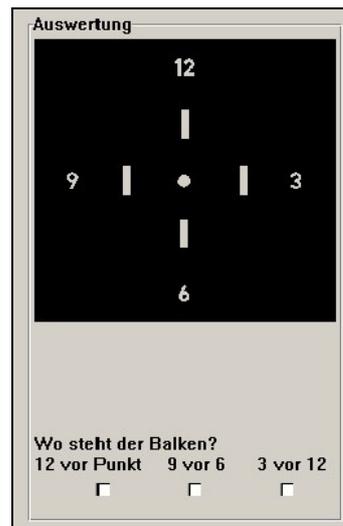


Bild 6.9: Stereoskopischer Test des Binoptometer II

Im Handbuch des Binoptometers werden bezüglich der Tiefenstaffelung folgende Angaben gemacht:

- die 12 liegt ca. 600 Winkelsekunden vor dem Punkt
- die 3 liegt ca. 80 Winkelsekunden vor der 12
- die 9 liegt ca. 160 Winkelsekunden vor der 6

6.1.3 Phorie

Als Phorie wird die Stellung der Augen bei Fehlen eines fusionierbaren Reizes bezeichnet /Dors98/. Der Binoptometer testet die Horizontal- und Vertikal-Phorie anhand des Worth-Tests. Der Reiz wird bei diesem Test für beide Augen getrennt (dichoptisch) dargeboten und besteht aus einem zentralen und peripheren Fusionsreiz und zwei Noniusstreifen, von denen jeweils nur einer für das rechte bzw. linke Auge sichtbar ist. Wie Bild 6.10 zeigt, besteht der für beide Augen sichtbare zentrale Fusionsreiz aus einem weißen Balken mit der Zeichenfolge OX0. Die rundherum angeordneten Zahlen bilden den peripheren Fusionsreiz. Je nachdem, ob der Test eine nicht regelrechte horizontale oder vertikale Heterophorie aufdecken soll, sind die beiden Noniusstreifen senkrecht über- und unterhalb des zentralen Fusionsreizes angeordnet oder befinden sich links und rechts von ihm. Eine tiefe zentrale Hemmung ist vorhanden, wenn die Testperson nur eine der beiden Noniusstreifen sieht. Nur wenn beide Streifen erkannt und so wahrgenommen werden, dass sie mit dem + des Fusionsreizes in einer Flucht stehen, attestiert der Test eine regelrechte Herophorie. Anderenfalls liegt je nach gegebenen Seheindruck eine unkompenzierte Esophorie, Exophorie oder Hyperphorie vor, die nach ihrem Stellungsfehler noch weiter unterschieden wird.

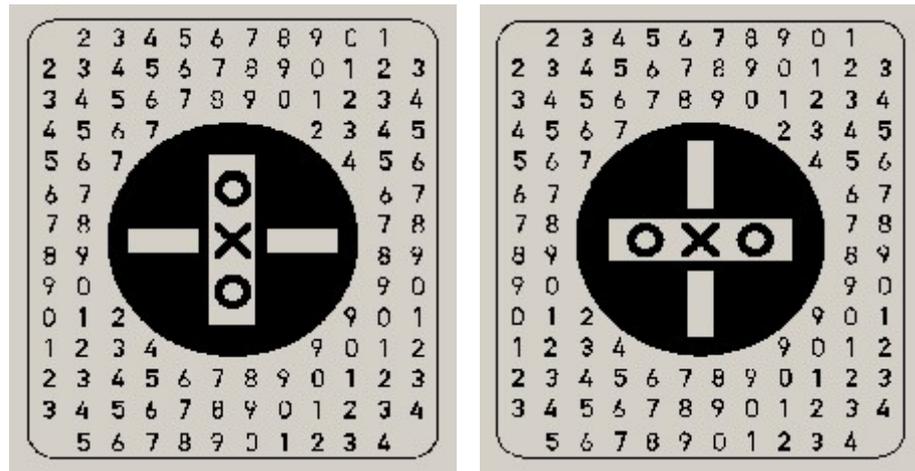


Bild 6.10: Phorietest des Binoptometer II

6.1.4 Zentrales Gesichtsfeld

Als Gesichtsfeld wird der Bereich bezeichnet, der bei ruhiggestelltem Auge wahrgenommen werden kann. Die beiden sich teilweise überlappenden monokularen Gesichtsfelder bilden zusammen das binokulare Gesichtsfeld. Das Ausmaß des Gesichtsfelds, das sich mit Hilfe eines Perimeters exakt bestimmen lässt, ist, wie Bild 6.11 zeigt, nicht nur richtungsabhängig, sondern wird auch davon bestimmt, welche Farbe der bei der Messung dargebotene Lichtpunkt aufweist. Generell ist das Gesichtsfeld für das Farbsehen viel kleiner als für die Hell - Dunkel - Empfindungen. Bild 6.12 zeigt, wie unterschiedlich die Sehschärfe über das Gesichtsfeld verteilt ist.

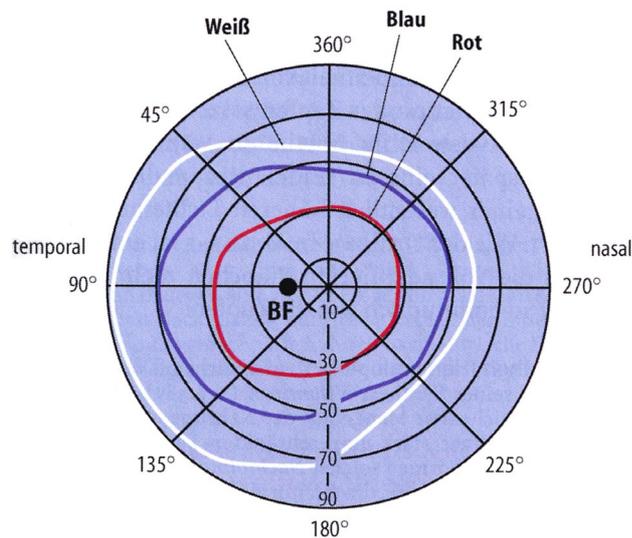


Bild 6.11: Gesichtsfeldgrenzen /Birb99/

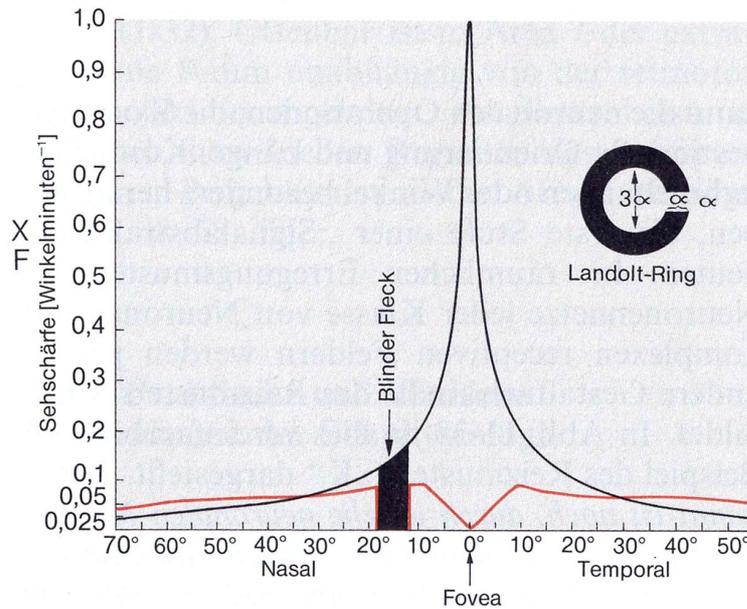


Bild 6.12: Verteilung der Sehschärfe für photopisches und skotopisches Sehen /Schm87/

Untersuchungen zum zentralen Gesichtsfeld beschränken sich auf den Bereich mit dem höchsten Auflösungsvermögen, um eventuell vorhandene Erkrankungen des als Makula bezeichneten Ausschnitts der Netzhaut aufzudecken. Dieser Teil der Netzhaut hat einen Durchmesser von wenigen Millimetern und enthält bzw. umschließt, wie Bild 6.13 zeigt, die Fovea.

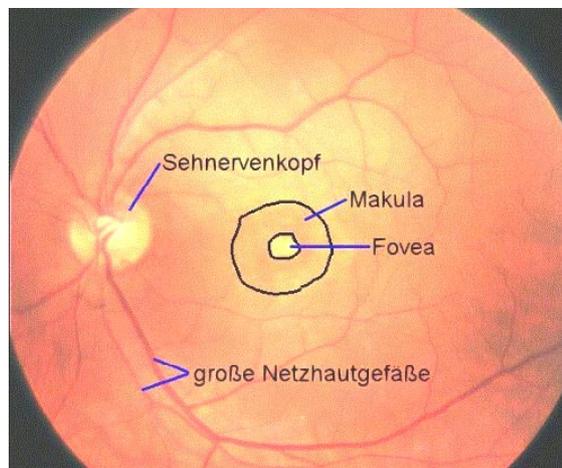


Bild 6.13: Netzhaut /Schm01/

Gemäß dem berufsgenossenschaftlichen Grundsatz für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchung (G 37) wurde das zentrale Gesichtsfeld der Probanden anhand einer sog. Standard-Tafel überprüft. Diese auch als "Amsler Gittertafel" bezeichnete Tafel enthält ein insgesamt 10x10cm großes Gitter-Quadrat mit einem Linienabstand von jeweils 0,5 cm, in dessen Mittelpunkt eine Fixiermarke aufgetragen ist (Bild 6.14). Wird diese Marke in einem Abstand von 33 cm fixiert und dabei das vollständige Gitterquadrat erkannt, liegt unter der Bedingung, dass alle Linien gerade und parallel erscheinen, keine Beeinträchtigung des zentralen Gesichtsfelds vor. Alle Testpersonen absolvierten

diesen Siebttest erfolgreich. Auf eine Testung des peripheren Gesichtsfeldes wurde verzichtet, da das Gesichtsfeld bei dem verwendeten Sichtsystem ohnehin sehr stark eingeschränkt ist (vgl. Kapitel 8).

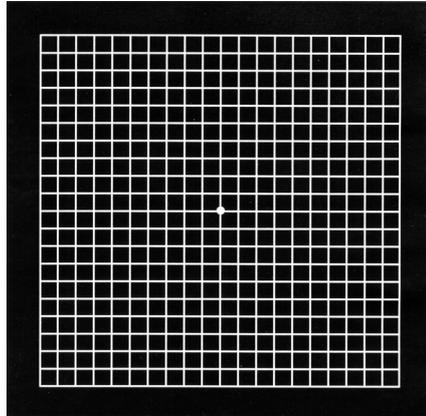


Bild 6.14: Amsler-Gittertafel /VISUS GmbH/

6.2 Hörtest

Jede Versuchsperson wurde vor Beginn der Hauptuntersuchung einem Hörtest unterzogen, um auszuschließen, dass eventuell vorhandene Beeinträchtigungen des Hörvermögens die Messergebnisse verfälschen. Die audiometrische Untersuchung wurde in einem Laborraum des Fachgebiets für Arbeitsphysiologie, Arbeitsmedizin und Infektionsschutz der BUGH-Wuppertal durchgeführt.

Zur Bestimmung des Hörvermögens wurde eine Audiometrie mit reinen Tönen vorgenommen, bei der die Hörschwelle für eine Reihe von Sinusschwingungen unterschiedlicher Frequenz ermittelt wird. Bei der durchgeführten Audiometrie befand sich der Proband in einer schallisolierten Kabine, trug einen Kopfhörer und hatte Sichtkontakt zum Versuchsleiter am Bedienpult des Audiometers direkt hinter der Glasscheibe der Messkabine (Bild 6.15).



Bild 6.15: Messaufbau Audiometrische Untersuchung

Der verwendete Audiometer der Herstellerfirma Siemens trägt die Produktbezeichnung Beomat 5000 SR. Die in einer festgelegten Frequenzreihenfolge präsentierten Sinus-schwingungen werden bei diesem Audiometer von einem analogen Synthesizer erzeugt, der es erlaubt, die Intensität der Töne (Lautheit) für jedes Ohr getrennt mittels zweier Schieberegler sukzessiv zu erhöhen. Der Proband signalisiert bei diesem Messablauf dem Versuchsleiter durch Betätigen eines Tasters, ab welchem Schalldruckpegel er den über die Luftleitung eingespielten Sinuston gerade noch wahrnehmen kann. Bild 6.16 zeigt die farbigen Schieberegler in der Ausgangsposition bei Beginn der Messung mit einer eingestellten Audiofrequenz von 1000 Hz und einem Pegel von -10 dB unterhalb der sog. Nulllinie, einem Pegel, bei der eine normal hörende Person nichts wahrnimmt, da die Hörschwelle noch nicht erreicht ist. In begradigter Form entspricht die über der Normalbevölkerung gemittelte natürliche Hörschwelle, wie Bild 6.17 zeigt, der Nulllinie eines Audiogramms.

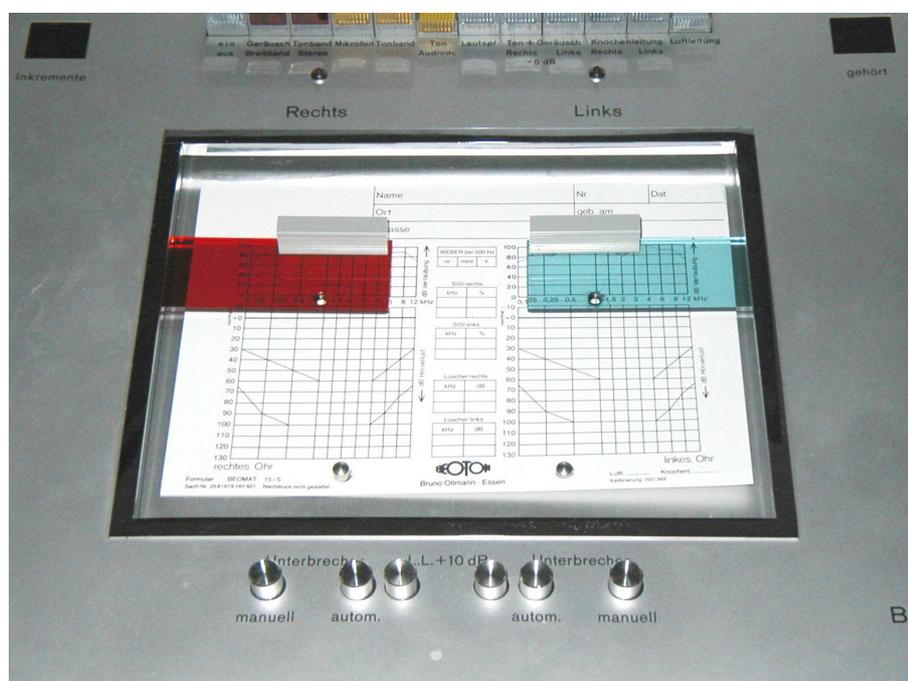


Bild 6.16: Grundstellung des Audiometers zu Messbeginn

Nachdem für alle Testfrequenzen die ermittelten Schwellenwerte in Relation zur Nulllinie im Audiogramm für beide Ohren getrennt aufgetragen und durch eine Linie miteinander verbunden wurden, entstehen zwei Hörkurven, die auf sehr anschauliche Weise das Hörvermögen des Probanden grafisch abbilden (Bild 6.18).

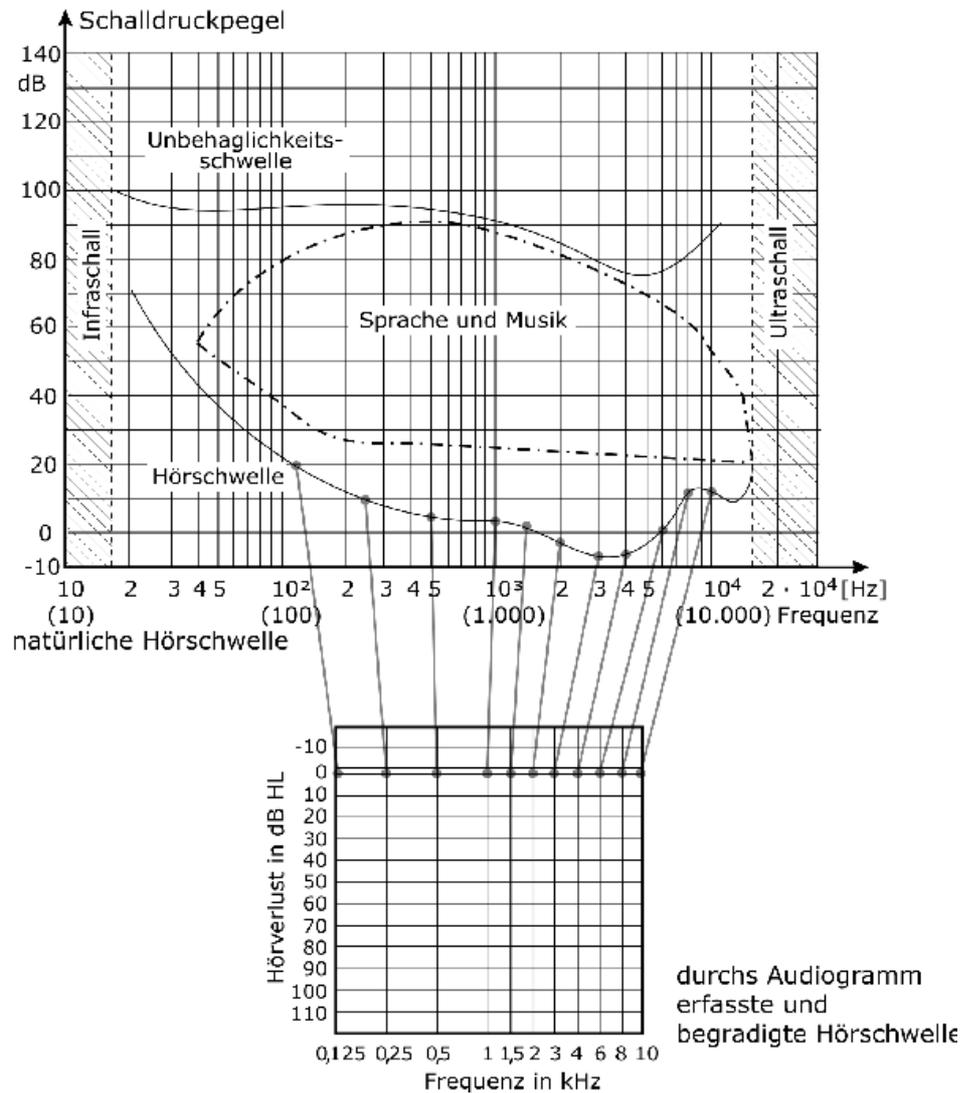


Bild 6.17: Pegelentsprechungen der Nulllinie eines Audiogramms /Henn99/

Eine auf dieser Grundlage erfolgende Bewertung des Hörvermögens orientiert sich im Wesentlichen am Verlauf und der Symmetrie der beiden Hörkurven unter Berücksichtigung des Lebensalters und Geschlechts der Testpersonen. Dies ist notwendig, da eine altersbedingte Verschlechterung des Hörvermögens, die bei Männern etwas eher einsetzt, in einer industriellen Gesellschaft als normal anzusehen ist. Sie zeigt sich daran, dass die Hörschwelle im oberen Frequenzspektrum zunehmend ansteigt. Hörverluste in einem Bereich von 3 – 6 kHz deuten dagegen auf eine innenohrbedingte Lärmschwerhörigkeit hin (Deutsche Gesellschaft für Arbeitsmedizin und Umweltmedizin: *Leitlinie Audiometrie in der Arbeitsmedizin*). Die durchgeführte Luftleitungsaudiometrie überprüft die gesamte Gehörfunktion. Im Gegensatz hierzu spiegelt ein Knochenleitungsaudiogramm ausschließlich die Leistungsfähigkeit des Innenohrs wider, da bei dieser Messung der Gehörgang und das Mittelohr umgangen und die Schwingungen mittels des Knochenleitungshörers direkt auf den Warzenfortsatz (Processus) aufgebracht werden, der seinerseits die Schwingungen auf das Innenohr überträgt.

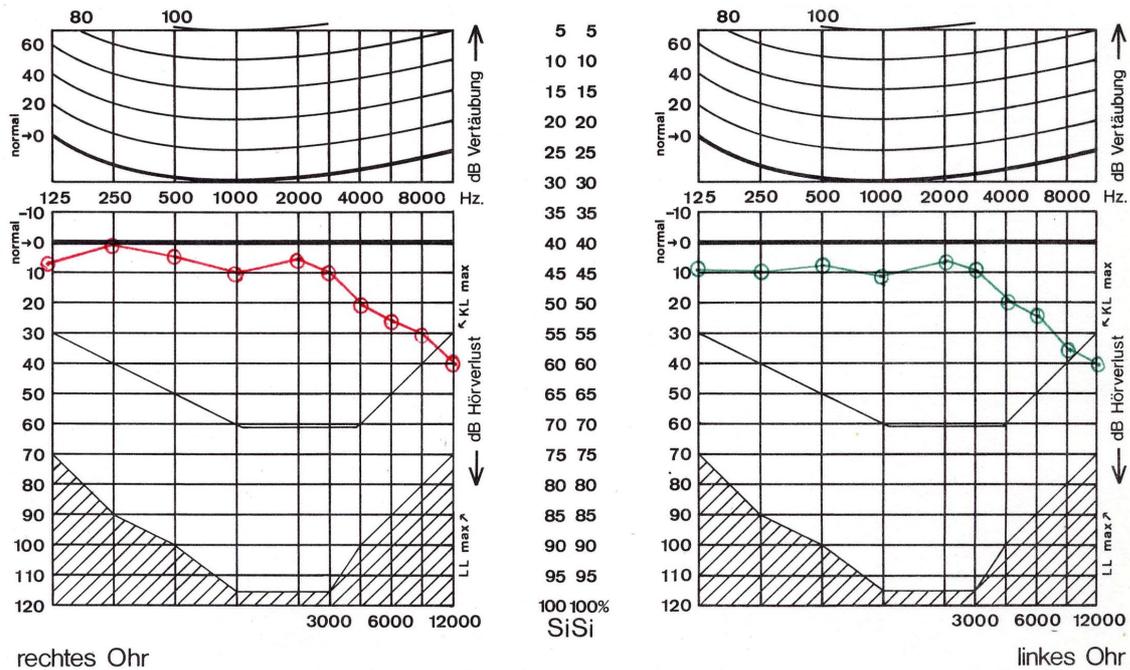


Bild 6.18: Hörkurven eines Audiogramms

Auf die Erstellung eines Knochenleitungsaudiogramms wurde aus Zeitgründen verzichtet, zumal ein Vergleich zwischen einem Luftleitungs- und Knochenleitungsaudiogramm zwar für die Ursachenbestimmung eines verminderten Hörvermögens wertvoll sein kann, eine gesicherte Diagnose aber erst im Rahmen einer ärztlichen Untersuchung im Verbund mit weiteren Kriterien und Tests möglich ist. In diesem Sinne versteht sich der durchgeführte Hörtest als Siebtest für die Teilnahme am Hauptversuch, der lediglich sicher stellen will, dass die gesamte Hörfunktion intakt ist.

Als Bewertungskriterium der bei der audiometrischen Untersuchung bestimmten Hörfunktion diente der Wert der maximalen Abweichung der gemessenen Hörkurve von der Nulllinie. Betrug dieser Wert bei keiner Messfrequenz mehr als 30 dB, wurde die Hörfunktion als hinreichend bzw. intakt angesehen und die Person zum Wahrnehmungsversuch zugelassen. Ergänzend hierzu wurde geprüft, ob die in Tabelle 6.3 aufgeführten Hörverlustgrenzwerte für Erstuntersuchungen des Berufsgenossenschaftlichen Grundsatz für arbeitsmedizinische Vorsorgeuntersuchungen G20 eingehalten wurden. Hierzu wurden die frequenzspezifischen Hörschwellen in ein Tabellenkalkulationsprogramm (Excel) übertragen und ausgewertet. Es zeigte sich, dass alle zugelassenen Versuchspersonen auch diesem Kriterium genügten.

Tabelle 6.3: Hörverlustgrenzwerte für Erstuntersuchungen /BG Grundsatz 20

Lebensalter L in Jahren	Frequenz in kHz				
	1	2	3	4	6
	(Hörverluste in dB)				
$L \leq 30$	15	15	20	25	25
$30 < L \leq 35$	15	20	25	25	30
$35 < L \leq 40$	15	20	25	30	35
$40 < L \leq 45$	20	25	30	40	40
$L > 45$	20	25	35	45	50

7 Internet-Fragebogen

Eine frühere Untersuchung hatte bereits ergeben, dass die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung individuell sehr unterschiedlich ist. Durch das in der vorliegenden Untersuchung verwendete Schwellenmessverfahren war es möglich, diese Leistungsunterschiede genauer zu analysieren. Von Interesse war in diesem Zusammenhang die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen der erbrachten Diskriminierungsleistung und den individuellen Merkmalen der Probanden gibt. Zur Auswertung des Hauptversuchs wurden daher, neben dem Alter und dem Geschlecht, noch weitere personenbezogene Daten herangezogen, die mittels eines Internet-Fragebogens erfasst wurden. Bei diesen Daten handelt es sich um Angaben zur Fahrpraxis sowie um die Beurteilung der eigenen Fahrweise und der eigenen Fahrfertigkeiten (Fahrertyp). Darüber hinaus wurden mit Hilfe des Hamburger Persönlichkeitsinventars (HPI) sechs Basisdimensionen der Persönlichkeit ermittelt. Im Unterschied zum etablierten Fünf-Faktoren-Modell (*Big-Five*) beinhaltet der HPI auch den Basisfaktor Risikobereitschaft, der für die vorliegende Studie von besonderem Interesse ist.

Der Fragebogen wurde in Form eines HTML-Dokuments jeder Versuchsperson per E-Mail zugeschickt. Diese Vorgehensweise hat den Vorteil, dass jede Versuchsperson unbeobachtet, in ihrer gewohnten Umgebung und ohne Zeitdruck die Fragen beantworten kann. Es ist anzunehmen, dass die damit verbundene Anonymisierung eine wahrheitsgemäße Beantwortung der Fragen begünstigt und insbesondere bei der Selbsteinschätzung Hemmungen abbaut, extremere Standpunkte einzunehmen. Eine Überprüfung dieser These war jedoch nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Ein weiterer Vorteil dieser Vorgehensweise ergibt sich aus der Möglichkeit, den Fragebogen mit logischen Kontrollmechanismen zu versehen, die verhindern, dass der Fragebogen unvollständig oder unsinnig ausgefüllt wird. Auf diese Weise kann z.B. überprüft

werden, ob die Zahlenfelder tatsächlich positive Zahlen enthalten, die einem definierten Wertebereich entsprechen und in ihrer Teilsumme nicht zu Unstimmigkeiten führen.

Nachdem der Befragte das HTML-Formular erfolgreich per Tastendruck abgeschickt hat, erhält er unverzüglich eine Rückmeldung in Form einer sich automatisch öffnenden HTML-Seite, die ihm bestätigt, dass der Fragebogen per E-Mail an den Versuchsleiter (an eine Sammeladresse) versendet wurde. Damit die Ergebnisse dieser Befragung mit einer Statistiksoftware direkt weiterverarbeitet werden können, enthalten die Antwort-E-Mails nicht den gesamten Fragebogen, sondern bestehen aus vorausgewerteten ASCII-Wertetabellen, die sich direkt weiterverarbeiten lassen.

In Bezug auf die Einschätzung der eigenen Fahrweise und der eigenen Fahrfertigkeiten konfrontierte der Fragebogen die Probanden mit gegensätzlichen Aussagen (*Items*). Durch Ankreuzen eines der sechs Antwortfelder ergibt sich bei dieser Art der Befragung der Grad der persönlichen Zustimmung bzw. Ablehnung. Die Extremaussagen basieren zum Teil auf anderen Fragebögen /Assm00/, /Theis02/, /Bast98/. In Tabelle 7.1 sind einige der konträren Aussagen beispielhaft aufgeführt.

Tabelle 7.1: Auszug aus dem Fragebogenteil zur Fahrweise

Ich vermeide prinzipiell jedes Risiko		Um schneller voranzukommen, nutze ich jede sich bietende Gelegenheit
In schwierigen V-Situationen fahre ich besonders vorsichtig auch wenn andere das für übertrieben halten könnten.		In schwierigen V-Situationen, z.B. auf kurvigen Landstraßen, zeige ich anderen gern wie so etwas gefahren wird.
Es ist ein gutes Gefühl, andere abzuhängen		Ich trete nie in Wettbewerb mit anderen Verkehrsteilnehmern

Wie bereits eingangs erwähnt, wurden getrennt für jede Versuchsperson mit Hilfe des Hamburger Persönlichkeitsinventars verschiedene Basisdimensionen der Persönlichkeit ermittelt. Unter der Persönlichkeit eines Individuums wird gemäß der allgemeinen Definition nach Guilford die einzigartige Struktur von Persönlichkeitszügen verstanden, die sich aus allen abstrahierbaren und relativ konstanten Persönlichkeitszügen (*traits*) zusammensetzt und eine Person von anderen Personen unterscheidbar macht /Sader00/. Diese Definition verdeutlicht, dass bei der Persönlichkeitsforschung nur relativ konstante und überdauernde Merkmale und Züge von Interesse sind. Die Eigenschaften stehen folglich für eine Klasse von Verhaltensweisen, die einen Mensch auszeichnen, da er diese über die Zeit (Stabilität) und über unterschiedliche Situationen hinweg (Konsistenz) weitgehend konstant an den Tag legt. Aggressivität als Eigenschaft lässt sich z.B. daran erkennen, dass sich eine Person unabhängig von der Situation (Straßen-

verkehr, Beruf, Familie usw.) für gewöhnlich sehr leicht provozieren lässt. Momentane Gefühlslagen können Verhaltensweisen maßgeblich beeinflussen. Sie kennzeichnen Zustände, die je nachdem, ob die daraus resultierende Verhaltensweise als typisch einzustufen ist oder nicht, eine bestimmte Eigenschaft bestätigen bzw. erst ausmachen oder aber im Gegensatz zu ihr stehen.

In der Persönlichkeitspsychologie existieren zahlreiche Vorgehensweisen bzw. Theorien, anhand derer sich die Persönlichkeit eines Einzelnen bestimmen bzw. beschreiben lässt, die jedoch an dieser Stelle nicht alle aufgeführt werden können. Der mechanische Interaktionismus untersucht z.B. das Verhalten eines Menschen situationsgebunden, da davon ausgegangen wird, dass sich eine Eigenschaft erst in einer passenden Situation manifestiert. Die Vorstellung, dass sich eine Persönlichkeit in Interaktion mit der Umwelt fortwährend ändern kann (dynamischer Interaktionismus), steht der Auffassung von Eigenschaftstheoretikern wie Allport, Catell, Eysenck usw. gegenüber, die Eigenschaften eine Beständigkeit attestieren, da ihnen, ihrer Meinung nach neurophysiologische Strukturen oder biochemische Prozesse zugrunde liegen /Sader00/. Dieser als Theorie der Wesenszüge bezeichnete Ansatz hat in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen, zumal sich hinsichtlich der Methodik und der Anzahl der Wesenszüge mit dem Fünf-Faktoren-Modell ein allseits anerkanntes Konzept etabliert hat.

Bestand bei Eysenck die grundlegende Dimension der Persönlichkeit noch aus zwei Dimensionen (Bild 7.1), die er später durch eine dritte erweiterte, und beschrieb der Myers-Briggs Type Indicator (MBTI) 16 Typen auf der Basis eines vierdimensionalen Modells der Persönlichkeit, so wird nach heutiger Erkenntnis davon ausgegangen, dass im wesentlichen fünf Persönlichkeitsfaktoren existieren bzw. dazu ausreichen, die Vielfalt individueller Unterschiede abzudecken. Die einzelnen Persönlichkeitszüge, die zusammen das Persönlichkeitsprofil bilden, sind linear abgestuft und unterscheiden sich folglich von einer bloßen Typklassifikation. Gebildet werden diese Persönlichkeitsprofile vornehmlich anhand von Fragebögen, die auch als Inventare bezeichnet werden. Mit dem HPI wurde ein Inventar ausgewählt, das sechs verschiedene Basisdimensionen der Persönlichkeit erfasst. Im Unterschied zum etablierten Fünf-Faktoren-Modell (*Big-Five*) beinhaltet der HPI auch den Basisfaktor Risikobereitschaft, der für die vorliegende Studie von besonderem Interesse ist. Die 84 Einzelfragen des Inventars wurden in ein HTML-Dokument übertragen, das aufgrund integrierter Auswertelgorithmen dazu in der Lage ist, die sechs Persönlichkeitsfaktoren direkt zu bestimmen. Zur Weiterverarbeitung wurden die standardisierten Werte dieser Faktoren automatisch in eine E-Mail übertragen und über das Internet an eine bestimmte Sammeladresse verschickt. Die Kurzbeschreibungen der den einzelnen Basisdimensionen zugeordneten Eigenschaften bei extremen Merkmalsausprägungen (> 90%-Perzentil, < 10%-Perzentil) sind Kapitel 9 zu entnehmen.

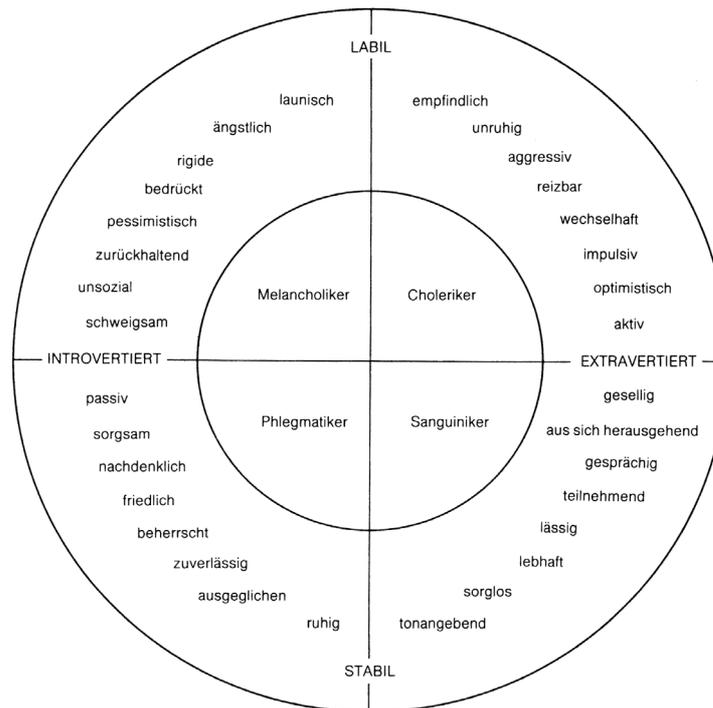


Bild 7.1: Die Beziehung zweier Persönlichkeitsdimensionen zu den vier klassischen griechischen Temperamentstypen nach Eysenck /Lawr00/

8 Simulationsumgebung

Der Wahrnehmungsversuch wurde in einer eigens hierfür erstellten Simulationsumgebung durchgeführt. Die beim technischen Aufbau verwendete Hardware setzt sich aus industriell gefertigten Komponenten zusammen, die sich entweder direkt in einen IBM-kompatiblen PC einbauen lassen oder über eine genormte Schnittstelle verfügen, die eine Rechneranbindung ermöglicht. Insgesamt wurden fünf verschiedene Subsysteme in die Simulationsumgebung integriert, die sich nach ihren Teilfunktionen folgendermaßen aufgliedern lassen:

- Grafiksystem
- Audiosystem
- Kopfpositionserfassung
- Versuchsablaufsteuerung
- Datenkommunikation

Neben der verwendeten Hardware bedingte jedes Subsystem der Simulationsumgebung eine spezielle Software, die entweder eine Eigenentwicklung oder zumindest eine Systemanpassung erforderlich machte. Darüber hinaus wurden die Simulationsinhalte

und versuchsbedingten Zusatzinformationen wie Sprachausgabe und Hell/Dunkel-Steuerung usw. erstellt.

8.1 Grafiksystem

Zur Bildgenerierung wurde eine mit der Stereo-Grafikkarte Wildcat 4210 ausgestattete Workstation eingesetzt. Das verwendete System zeichnet sich insbesondere durch seine zwei parallel arbeitenden Grafikkanäle aus, die sich zur Ansteuerung von Mehrkanalsichtsystemen (Domprojektion, Cave usw.) noch mit weiteren Bildgenerierungseinheiten synchronisieren lassen. In der vorliegenden Untersuchung wurde mit dem HMD V8 der Herstellerfirma AT ein Zweikanal-Sichtsystem verwendet, das es dem Betrachter ermöglicht, die virtuellen, computergenerierten Versuchsszenen stereoskopisch wahrzunehmen (Bild 8.1). Die Basiskomponenten eines *Head-Mounted-Displays* (HMD) sind:

- Halter bzw. Tragegestell
- Display
- Optiken
- Kopfhörer



○ Bild 8.1: Verwendetes HMD

Das V8 ist mit zwei Flüssigkristallanzeigen (LCD) ausgestattet, die sich durch eine leichte und kompakte Bauweise auszeichnen. Die Hauptkennwerte eines HMDs sind das Sichtfeld, die optische Auflösung sowie das Gesamtgewicht des HMDs. Tabelle 8.1 zeigt die für das V8 zutreffenden Werte.

Tabelle 8.1: Hauptkennwerte des verwendeten HMDs

V8 von Virtual Research mit zwei 1.3" LCDs	
Sichtfeld (Field of view)	60° diagonal
Auflösung (pro Seite)	((640x3)x480), (921.600 Farbelemente) entsprechen 307.200 Pixeln
Gewicht	1,0 kg

Das Programm zur Visualisierung der Versuchsszenen wurde mit Visual C++, unter Verwendung der Grafikbibliothek Open Inventor, erstellt. Die zunächst nur für das Betriebssystem IRIS (Silicon Graphics) entwickelte Software-Library wurde von der Firma TGS auf Windows und Linux portiert. Dies hat prinzipiell der Vorteil, dass sich der in C++ geschriebene Quellcode unabhängig vom eingesetzten Betriebssystem verwenden und weiter entwickeln lässt. Dies unterliegt in der Praxis jedoch einigen Einschränkungen, so dass eine Portierung auf ein anderes Betriebssystem eine Anpassung des Quellcodes bedingt. Ferner existiert noch eine Java-Version der Softwarebibliothek, um eine gänzliche Abkoppelung von Quellcode und Betriebssystem zu erreichen. Aus Performance-Gründen wurde auf die Windows-Variante zurückgegriffen. Linux schied als Betriebssystem aus, da für die verwendete Stereografikkarte bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt kein geeigneter Treiber existiert.

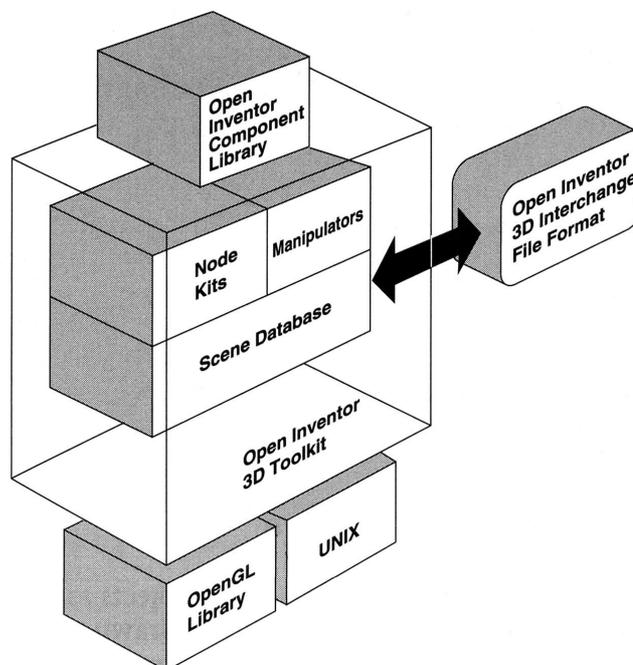


Bild 8.2: Open Inventor Architektur /Wern00/

Open Inventor ist eine Softwarebibliothek, die sich aus Objekten und Methoden zusammensetzt, mit denen sich interaktive 3D-Grafikanwendungen programmieren lassen. Da die Bibliothek, wie Bild 8.2 verdeutlicht, auf OpenGL, dem klassischen Standard für Grafikanwendungen im Simulationsbereich, aufsetzt, handelt es sich bei Open Inventor um eine Verquickung zweier Softwarebibliotheken. Die eigens für die Entwicklung dieser übergeordneten Softwarelibrary ins Leben gerufene Open Inventor Architecture Group verfolgte hierbei das Ziel, einen Standard für interaktive 3D-Grafikanwendungen zu kreieren, der sich in dieser Form jedoch nur bedingt durchsetzen konnte. So mündeten die Bemühungen zur Schaffung eines einheitlichen Datenformats für virtuelle Welten nicht im Open Inventor Format, sondern in der sog. VRML (*Virtual Reality Modeling Language*). Dieser Standard etablierte sich insbesondere für interaktive 3D-Welten im World Wide Web /Klos98/. Aber auch für die professionelle Anwendung zur Modellierung von 3D-Objekten und Datenlandschaften stellt das VRML-Format einen Standard dar, was sich daran zeigt, dass unabhängig von der eigentlichen Zielrichtung, wie etwa Maschinenbau, Architektur, 3D-Animation usw., meist ein Exportfilter für dieses Datenformat existiert.

Aufgrund der Tatsache, dass VRML aus Open Inventor abgeleitet wurde, ähneln sich die beiden Datenformate in weiten Teilen, was eine Datenkonvertierung entsprechend vereinfacht. Die unter Verwendung der Open Inventor Bibliothek eigenentwickelte Visualisierungssoftware zeichnet sich im Wesentlichen dadurch aus, dass eine beliebige im Open Inventor- oder VRML-Format vorliegende Datenbasis so auf dem HMD ausgegeben werden kann, dass für den Betrachter eine stereoskopische Abbildung der virtuellen Welt entsteht. Darüber hinaus ist es möglich, mehrere Einzelobjekte hinzuladen, die sich in der Datenlandschaft frei bewegen lassen (*Moving Model*). Um eine ständige Anpassung an die Blickrichtung und Eigenposition des Betrachters zu gewährleisten, wurde eine Netzwerkanbindung in die Applikation integriert, die es ermöglicht, die aktuellen Kopfpositionsdaten und weitere für den Versuch relevante Informationen in einer Echtzeitschleife einzulesen und zu verrechnen. Die Updaterate für diesen Anpassungsprozess lag für die verwendete Datenbasis und das geladene Fremdobjekt bei ca. 40 Hz.

Die eingesetzte Datenbasis wurde mit einem VRML-Editor VRML-Pad des Softwareherstellers Parallelgraphics erstellt, der in erster Linie darauf abzielt, die manuelle Erstellung eines Quellcodes zu vereinfachen und übersichtlicher zu gestalten. Hierzu werden kontextgebundene Funktionen eingesetzt, die z.B. bestimmte Schlüsselbegriffe und Textbereiche farbig hervorheben oder automatisch sinnvolle Textergänzungen vorschlagen. Zudem wird dem objektorientierten Aufbau des VRML-Formats dadurch Rechnung getragen, dass parallel zur Sourcetexterstellung auch die entstehende hierarchische Objektstruktur in Form eines sog. *Scene Tree* dargestellt wird (Bild 8.3).

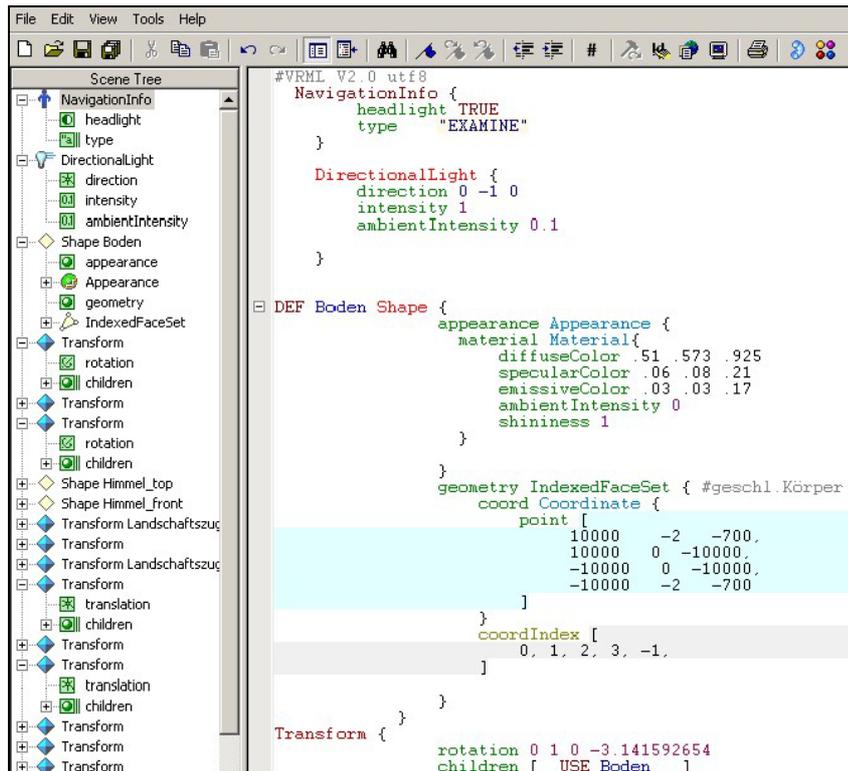


Bild 8.3: Erstellung der Datenbasis mit einem VRML-Editor

Diese verzeichnisbaumähnliche Abbildung der VRML-Datei lässt sich durch Verschieben, Kopieren oder Umbenennen einzelner Gruppen- oder Kindknoten, aus denen sich ein *Scene Tree* zusammensetzt, auch direkt bearbeiten. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, sich die in der Datenbasis eingebundenen Texturen in einer Übersicht anzeigen zu lassen.

Die Ausdehnung der erstellten virtuellen Datenlandschaft entspricht einer quadratischen Grundfläche von 400 km². Für den Betrachter erscheint die Landschaft jedoch keine Grenzen aufzuweisen, da die leicht hügelige Landschaft die Fernsicht begrenzt. Einzig der absolut gerade und ebene Verlauf der Straße, welche die abgebildete Landschaft in zwei gleich große Abschnitte unterteilt, ermöglicht die Sicht auf die Objektgrenze, die leicht versetzt unter dem Horizont erscheint. Dadurch, dass über den Gruppenknoten *Background* eine Bodenfläche definiert wurde, die direkt an den Horizont anschließt und sich diese Fläche, aufgrund der tief bläulich bis türkisene Farbgebung, vom Himmel absetzt, entsteht jedoch der Eindruck, auf ein Meer oder einen großen See zu blicken. Da dies an beiden Enden der Straße zu beobachten ist, wird dem Betrachter suggeriert, er befände sich auf einer größeren Insel bzw. Halbinsel.

Die Straße wurde nach den Vorgaben der Richtlinie für die Anlage von Straßen /RAS96/ so erstellt, dass sie gegenüber den direkt angrenzenden Flächen leicht erhöht ist und zu beiden Seiten eine Böschung aufweist. Als Straßenquerschnitt wurde der Regelquerschnitt RQ-10,5 gewählt. Maßgeblich für die Zuordnung eines Regelquerschnitts ist die funktionale Gliederung des Straßennetzes (RAS-N) nach Lage,

angrenzender Bebauung und maßgeblicher Funktion. Für die Simulationsszene ergibt sich eine Zuordnung zur Kategoriengruppe AIII, die für außerhalb bebauter Gebiete, anbaufreie und zwischengemeindliche Straßenverbindungen zutrifft. Innerhalb dieser Kategorie kommen insgesamt vier verschiedene Regelquerschnitte in Betracht, die nach der gemessenen oder zu erwartenden Verkehrsstärke auszuwählen sind. Aufgrund der im Wahrnehmungsversuch gezeigten Anzahl von vorbeifahrenden Fahrzeugen fiel hierbei die Wahl auf den Regelquerschnitt RQ-10,5. Der Aufbau und die Breiten der Bestandteile des Straßenquerschnitts sind Tabelle 8.2 und Bild 8.4 zu entnehmen.

Tabelle 8.2: Breiten der Bestandteile ausgewählter Regelquerschnitte /RAS96/

Regelquerschnitt	Anzahl der Fahrstreifen	Breite [m]				
		Fahrstreifen	Randstreifen	Mittelstreifen	Bankette	Seitentrennstreifen
RQ-20	4	3,25	0,50	2,00	1,50	1,75
RQ-15,5	2+1	3,75/3,25/3,5	0,25		2,50/1,50	1,75
RQ-10,5	2	3,50	0,25	-	1,50	1,75
RQ-9,5	2	3,00	0,25	-	1,50	1,75

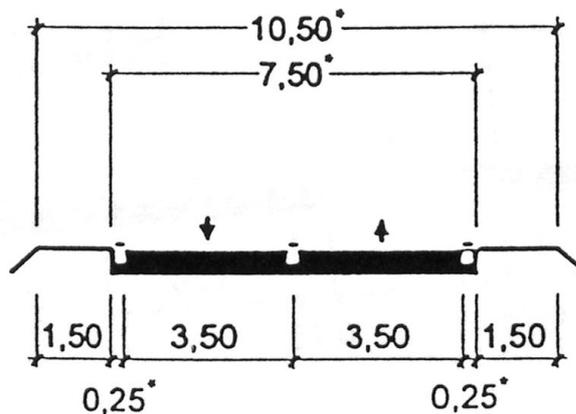


Bild 8.4: Regelquerschnitt RQ-10,5 /RAS96/

Bei der Straßengestaltung wurde auf Mittellinie, Leitpfosten, Schutzplanken und Verkehrsschilder bewusst verzichtet, um dem Probanden keinerlei Anhaltspunkte zu liefern, aus denen sich ein oder mehrere Referenzabstände ableiten lassen. Dies würde nämlich die Bewertung der Fahrzeuggeschwindigkeiten dahingehend beeinflussen, dass es für den Probanden möglich wäre, die Zeitlängen miteinander zu vergleichen, die ein Fahrzeug für das Zurücklegen einer bestimmten Strecke benötigt. Dies widerspräche jedoch dem Ziel der Untersuchung, da dabei nicht die Geschwindigkeits-, sondern die Zeitwahrnehmung im Vordergrund stünde. Eine objektive Bewertung der Zeitwahrnehmung wäre zudem nicht gegeben, da nicht feststünde, welcher Strecken-

abschnitt dem Zeitvergleich zugrunde liegt und ob diese Strategie überhaupt von allen Probanden angewendet wird.

Die gleiche Problematik ergibt sich für die geometrische Form, Bebauung und Vegetation der an die Straße angrenzenden Flächen. Entsprechend fiel die Wahl auf eine ungleichförmige, leicht hügelige, grünlich eingefärbte Landschaft. Um die Datenlandschaft optisch ansprechender zu gestalten, sind auf zwei Hügeln einige Bäume gruppiert, die jedoch nur dann ins Blickfeld kommen, wenn der Betrachter seinen Kopf so weit dreht, dass er den Straßenverlauf nicht mehr erkennen kann.

Die für die Simulationsumgebung eingesetzten Texturen wurden in Eigenregie erstellt. Hierzu wurden Außenaufnahmen mit einer Digitalkamera angefertigt. Nachdem diese auf einem Computer übertragen wurden, fand zunächst eine Auswahl der geeigneten Aufnahmen statt, bevor diese mit dem Bildverarbeitungsprogramm Photoshop weiterbearbeitet wurden. Zu den einzelnen Bearbeitungsschritten zählen u.a. Ausschnittfestlegung, Perspektivenentzerrung, Helligkeits- und Farbanpassung, Spiegelungen der Randbereiche und Freistellungen von Einzelobjekten. Bild 8.5 und 8.6 verdeutlichen an zwei Beispielen den Vorgang der Texturerstellung.



Bild 8.5: Ausgangsmaterial und Baumtextur im Vergleich

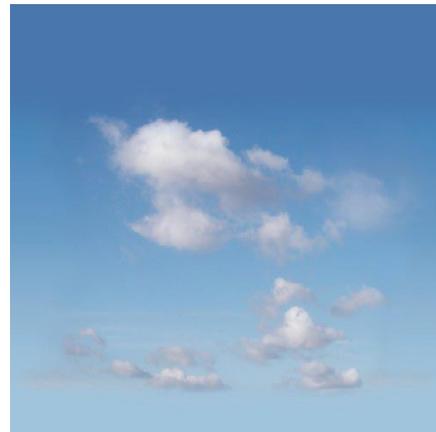


Bild 8.6: Ausgangsmaterial und Himmeltextrur im Vergleich

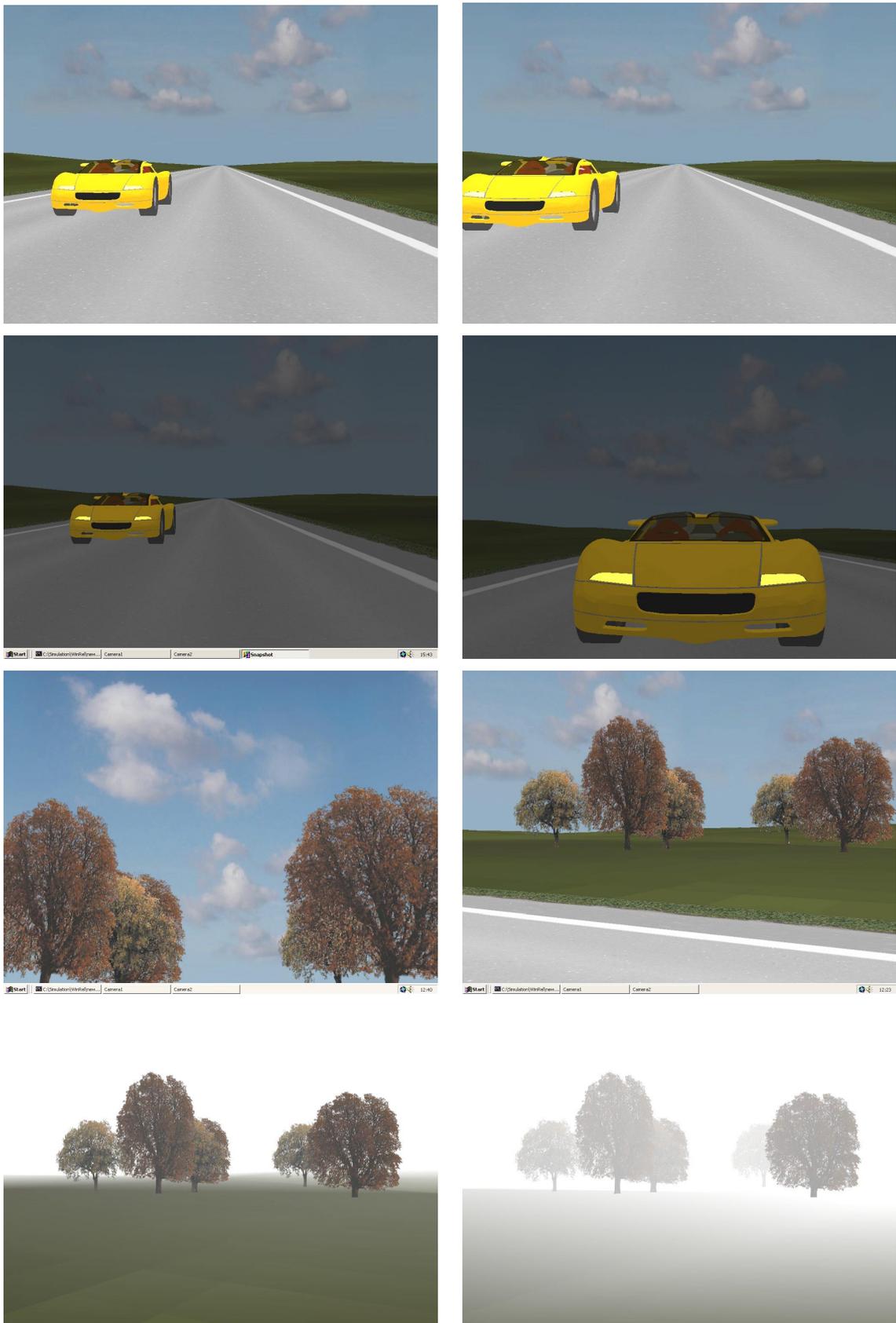


Bild 8.7: Szenen des Visualisierungsprogramms

Als bewegtes Fremdobjekt wurde ein Fahrzeugmodell verwendet, das mit der Modellierungs- und Animationssoftware 3ds max von Autodesk erstellt wurde. Das Fahrzeug entstand in Anlehnung an ein bereits bestehendes Modell, welches vom Grafikrechner aufgrund seiner Detailgenauigkeit nicht in Echtzeit wiedergegeben werden konnte. In Bild 8.7 sind Ausschnitte aus der verwendeten Datenlandschaft zusammengefasst, die zudem das Fahrzeugmodell zeigen und belegen, dass die Versuchsszenen auch unter veränderten Bedingungen, wie zunehmende Dunkelheit oder Nebel, durchführbar wären.

8.2 Audiosystem

Das in der Simulationsumgebung verwendete Audiosystem besteht, was die Hardware betrifft, aus einem mit einer speziellen Audiokarte ausgestatteten Standard-PC, der über eine Netzwerkkarte an ein lokales Netzwerk (LAN) angebunden ist. Die Audiokarte mit der Produktbezeichnung Acousticron der Herstellerfirma Firma Crystal River Engineering erlaubt es, zwei unabhängige Audiosignale räumlich positioniert über Kopfhörer auszugeben. Die Audiosignale können dabei wahlweise von einem an den Audiorechner angeschlossenen externen Klangerzeuger wie Sampler, Synthesizer usw. stammen oder direkt von dem Audiorechner selbst generiert werden. Der Audiorechner übernimmt bei der zuletzt genannten Variante neben der Audiopositionierung auch gleichzeitig die Funktion eines Samplers, der digitalisierte Audiofiles (Samples) schon beim Auslesen von einem Datenspeicher unverzüglich wiedergibt. Die für den Versuch verwendeten Audiodateien waren im WAF-Format auf der lokalen Festplatte des Audiorechners abgelegt. Dieses Datenformat zeichnet sich zum einen dadurch aus, dass es das weltweite Standardformat für Audiotbearbeitung am PC darstellt und, im Unterschied zu anderen Formaten, wie MP3 oder AIFF, Audiosignale nicht komprimiert. Dies ist bei der binauralen Signalbearbeitung notwendig, da es ansonsten zu Qualitätsverlusten kommt. Insbesondere breitbandige Audiosignale, wie sie bei einer Geräuschsimulation häufig vorkommen, können mit derzeitigen Algorithmen nur unzulänglich komprimiert werden.

Die binaurale Signalbearbeitung beruht auf der sog. Kopfübertragungsfunktion (*Head Related Transfer Function*), die die räumliche Übertragungscharakteristik des Ohres in Abhängigkeit von der relativen räumlichen Position der Schallquelle wiedergibt. Das räumliche Platzieren von Geräuschen bzw. Audiosignalen wird erreicht, indem die beiden über Kopfhörer ausgegebenen Signale an den beiden zugehörigen HRTFs gefaltet werden. Hierbei kommen digitale Filteralgorithmen kanalspezifisch zur Anwendung.

Obwohl die einzelnen Kopfübertragungsfunktionen aus hörphysiologischen Gründen Unterschiede aufweisen, können bei Personen mit einem ausgeprägten Ortungssinn jedoch große Ähnlichkeiten festgestellt werden. Dies geht sogar soweit, dass bestimmte Übertragungsfunktionen für einen Großteil der Bevölkerung als repräsentativ angesehen werden können /Wenz92/.

Auf die Kopffübertragungsfunktion und ihre messtechnische Erfassung wurde bereits in Kapitel 3 eingegangen. Die wichtigsten technischen Eigenschaften des verwendeten 3D-Positionierungssystems sind:

- 2 frei positionierbare Schallquellen im Freischallfeld
- HRTF-Audiofilter mit minimaler Phasenverschiebung
- Übertragungsfunktion 256 Koeffizienten pro Ohr und Quelle
- 4-fache Interpolation der Zwischenwerte auf der Basis von 74 Filterpaaren
- atmosphärisches Absorptions-Modell zur Entfernungsdarstellung
- Dopplereffekt
- 40 MHz Motorola 56001 DSP (20MIPS)
- Update-Rate: 44 Hz
- Abtastfrequenz: 44.1 kHz
- Auflösung: 16-Bit

Zur programmtechnischen Realisierung des Audiosystems wurde eine Software entwickelt, die sowohl die Sprachausgabe als auch die Geräuschpositionierung in Abhängigkeit von den Versuchsvorgaben dynamisch steuert. Neben der netzwerktechnischen Anbindung des Audiosystems an die übrigen Teilkomponenten der Simulationsumgebung bestand die Hauptaufgabe des erstellten Programms darin, die Audiokarte so anzusteuern, dass eine entsprechende Sprach- und Geräuschausgabe erfolgt. Hierfür wurde eine hardware-spezifische Softwarelibrary des Audiokartenherstellers verwendet, mit der sich eine Echtzeitansteuerung realisieren lässt.

Zur Realisierung der Sprachausgabe wurden vor Beginn der Untersuchung Aufnahmen in einem privaten Tonstudio durchgeführt, die aufgrund der hochwertigen Mikrofontchnik eine hohe Sprachverständlichkeit aufweisen. Die Sprachausgabe lässt sich entsprechend ihrer Funktion in folgende Bereiche aufgliedern:

- Begrüßung und Versuchseinführung
- Verhaltensanweisung zur Kopfpositionskalibrierung
- Feedback über die getroffene Entscheidung
- Aufforderung zur Selbstbewertung der Diskriminierungsleistung

Das Audiofile, das zur Abbildung des Fahrzeuggeräusches eingesetzt wurde, basiert auf der Geräuschsimulation des Motorrad-Fahrsimulators SAFE II der BUGH-Wuppertal, die vom Verfasser dieser Arbeit entwickelt wurde. Das Fahrzeuggeräusch setzt sich aus dem Motor-, Wind- und Abrollgeräusch zusammen, das bei einer Fahrsimulation in Abhängigkeit von Motordrehzahl, Lastzustand und Fahrzeuggeschwindigkeit dynamisch verändert wird. Bei dem durchgeführten Wahrnehmungsversuch hingegen

blieben die Gewichtung der einzelnen Geräuschkomponenten und die Motordrehzahl konstant. Dies resultiert aus der Vorgabe, dass der Proband die Fahrzeuggeschwindigkeiten nur aufgrund der räumlichen Verschiebung der Geräuschquelle unterscheiden soll. Die Fähigkeit, Audiosignale nach ihrer Frequenz oder Zusammensetzung zu unterscheiden, war nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Folglich wurde auch auf die Abbildung des Dopplereffekts verzichtet, da dieser mit einer Frequenzverschiebung des Audiosignals einhergeht.

8.3 Kopfpositionserfassung

In Simulationsumgebungen werden verschiedene Verfahren eingesetzt, um die Kopfposition zu erfassen. Die gängigsten Funktionsprinzipien der hierbei verwendeten Messgeräte, die als Trackingsysteme bezeichnet werden, sind in Tabelle 8.3 zusammengefasst.

Tabelle 8.3: Funktionsprinzipien von Trackingsystemen

Funktionsprinzip	Beschreibung
mechanisch	geführtes Gelenkgestell; eingeschränkter Aktionsraum; schnell; genau
optisch	Raumanordnung wird von einer oder mehreren Kameras erfasst und anhand von Bildauswertelgorithmen bestimmt; aktiv: mittels Leuchtdioden; passiv: mittels reflektierender Markierungen oder markanter Bildpunkte; drahtlos und flexibel; direkte Sicht zwischen Sender und Empfänger muss gewährleistet sein; Auflösung und Verzögerungszeiten sind systemabhängig
kinematisch	eine auf der Kreiseltechnologie basierende Messung; schnell; genau
akustisch	Messung von Laufzeit und Phasenverschiebung hochfrequenter Audiosignale an verschiedenen Punkten; gröbere Auflösung, stöempfindlich auf akustische Signale; große Bewegungsfreiheit, jedoch mit eingeschränktem Aktionsraum
elektromagnetisch	in sequenzieller Folge werden drei senkrecht aufeinanderstehende Magnetfelder erzeugt, die in den ebenso angeordneten Spulen des Empfängers einen messbaren Strom induzieren; genau; große Bewegungsfreiheit mit großen Aktionsraum; umgebungsempfindlich
satellitengesteuert (GPS-System)	satellitengestützte Positionsbestimmung, deren Auflösung mittels terrestrischer Sender erhöht werden kann, schnell, Auflösung vom Ausbaugrad abhängig

Für die Qualität der Positionsbestimmung eines Trackingsystems sind die Parameter Update-Rate (Messwertausgabe pro Sekunde), Genauigkeit (Messwerttrauschen des

Trackingverfahrens), Auflösung (Genauigkeit des Sensors), Reichweite (erfasster Aktionsraum), Lag und Interferenz von Bedeutung /Henn97/. Als Lag wird in diesem Zusammenhang die Verzögerungszeit zwischen der Ausführung einer Bewegung und der dadurch hervorgerufenen Änderung des Messsignals verstanden. Die Interferenz entspricht der Anfälligkeit des Messverfahrens gegenüber äußeren Störgrößen wie vorhandene oder induzierte elektromagnetische Felder, Temperatur, Helligkeit usw.

Bei dem eingesetzten Kopfpositionserfassungssystem *Flock of Birds* der Firma Ascention Technologies handelt es sich um ein elektromagnetisches Sensorsystem, das sich im Wesentlichen aus 4 Systemkomponenten zusammensetzt:

- Transmitter zur Erzeugung eines Referenzmagnetfeldes
- Receiver zur Messung der Magnetfeldstärke im Raum
- Elektronikbox zur Ansteuerung des Transmitters und Vorverarbeitung der Messwerte
- Software zur Initialisierung und Steuerung des Messprozesses sowie Weiterverarbeitung der Messwerte

Je nachdem welche Reichweite für die Positionserfassung erforderlich ist, kann zur Erzeugung des Referenzmagnetfeldes wahlweise ein *Near-Range* oder einen *Extended-Range Transmitter* verwendet werden. Da sich der Proband bei dem durchgeführten Versuch nicht frei im Raum bewegt, sondern auf einem Stuhl sitzt, wurde für die Abtastung dieses eingeschränkten Aktionsraums ein *Near-Range Transmitter* eingesetzt. Der Transmitter wird hierbei von der zugehörigen Elektronikbox so gesteuert, dass in sequenzieller Folge drei senkrecht aufeinander stehende Magnetfelder erzeugt werden. In den ebenfalls senkrecht zueinander angeordneten Spulen des Receivers werden in Abhängigkeit von der Entfernung und der relativen Ausrichtung des Transmitters und Receivers verschieden starke Ströme induziert. Ein Messumlauf liefert insgesamt neun verschiedene Werte, aus denen die Position des Receivers im Raum bestimmt wird. Die Elektronikbox übernimmt die Auswertung und übergibt die relativen Positionsdaten über eine serielle Schnittstelle an den Hostrechner, der den gesamten Messprozess steuert. Für den Versuch wurde eine modifizierte Variante der vom Gerätehersteller zur Verfügung gestellten Software auf dem Hostrechner eingesetzt. Sie erlaubt ein Messverfahren, bei dem die Kopfposition in Relation zu einer zuvor bestimmten Nulllage angegeben wird. Zur Kalibrierung wird der Proband zu Beginn der Versuchsreihe aufgefordert, seinen Kopf für einen Moment gerade zu halten, um so die Nulllage bestimmen zu können. Alle von diesem Zeitpunkt an gemessenen Werte geben die Veränderungen in Bezug auf diese Nulllage an. Dieses Messverfahren stellt sicher, dass jeder Proband unabhängig von Sitzposition, Körpergröße und Einstellung des HMDs die Versuchsszenen aus der gleichen Perspektive wahrnimmt.

Um die Kopfpositionserfassung in die Simulationsumgebung zu integrieren, wurde die vom Gerätehersteller entwickelte Software um eine Netzwerkanbindung erweitert. Sie

erlaubt einerseits, allen beteiligten Subsystemen der Simulationsumgebung die aktuelle Kopfposition zuzuspielen. Andererseits ermöglicht sie, die Messwertkalibrierung von außen einzuleiten, so dass die Versuchsablaufsteuerung die entsprechende Kontrollfunktion übernehmen kann.

Das verwendete Trackingsystem ist störanfällig gegenüber Metallen und bereits vorhandenen elektromagnetischen Feldern. Um die Interferenz auf ein Minimum zu reduzieren, wurde der *Near-Range Transmitter* auf einem eigens dafür angefertigten Holzstativ so positioniert, dass der Abstand zwischen Sender und Empfänger möglichst gering ist. Infolgedessen kann davon ausgegangen werden, dass die in Tabelle 8.4 aufgeführten technischen Leistungsdaten bei dem Versuch auch tatsächlich erreicht wurden.

Tabelle 8.4: Technische Werte des verwendeten Trackingsystems

Translation:	+/- 95 cm in jede Richtung (<i>Near-Range Transmitter</i>) +/- 3,65 m in jede Richtung (<i>Extended-Range Transmitter</i>)
- Auflösung	0,762 mm bei 30,48 cm Entfernung
- Messwerttrauschen	2,54 mm im Mittel über die translatorische Reichweite
Rotation:	+/- 180° in Azimut- und Rollwinkel +/- 90° im Elevationswinkel
- Auflösung	0,1° bei 30,48 cm Entfernung
- Messwerttrauschen	0,5° im Mittel über die translatorische Reichweite
Update Rate:	100Hz

8.4 Versuchsablaufsteuerung

Zur Durchführung des Vor- und Hauptversuchs wurden zwei unterschiedliche Softwareprogramme zur Steuerung und Protokollierung eingesetzt. Die beide in C geschriebenen Programme wurden auf einem über das Netzwerk angebotenen IBM-kompatiblen PC unter dem Betriebssystem Linux entwickelt und umfassen im Wesentlichen die Teilfunktionen:

- Einleitung und Überwachung der Kopfpositionskalibrierung
- Steuerung des Messablaufs nach gewichteter Up-Down-Methode
- Ausgabe der Szenenzustandskennung sowie der für das Graphik- und Soundsystem benötigten aktuellen Positionsdaten des Fahrzeugs (*Moving-Model*)
- Messung und Protokollierung aller relevanter Versuchsdaten

Für den Vorversuch erweitert sich diese Aufstellung um die Programmpunkte Versuchseinführung und Erfassung personenbezogener Daten. Da die Darbietungsform

im Vorversuch nur in den Faktorstufen *visuell* und *akustisch* variiert, konnte hier im Unterschied zum Hauptversuch auf eine Randomisierung der Szenenabfolge verzichtet werden. Stattdessen wurde ein Verfahren gewählt, bei dem alternierend, d.h. von Versuchsperson zu Versuchsperson wechselnd, zuerst die Faktorstufe *visuell* bzw. *akustisch* ausgewählt wurde.

Die beim Hauptversuch eingesetzte Randomisierung der Szenenabfolge wurde vor Beginn der Versuchsdurchführung mit Hilfe eines weiteren, selbstentwickelten Programms vorgenommen und in Form einer Ausgabedatei gespeichert. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, da sie, für jede Versuchsperson getrennt, eine Überprüfung der nach dem Zufallsprinzip abgelegten Abfolgen der Faktorstufenkombinationen ermöglicht. Folglich konnte bereits vor Beginn der Versuchsdurchführung sicher gestellt werden, dass die einzelnen Szenen tatsächlich randomisiert sind, und dass jede Faktorstufenkombination auch nur einmal vorkommt. Die Ablaufsteuerung ist so konzipiert, dass zu Beginn jeder Messreihe die Datei eingelesen wird, die die Vorgabe für die zu präsentierende Szenenabfolge enthält. Hieraus wird dann die für die Versuchspersonennummer zugehörige Szenenabfolge bestimmt und programmtechnisch umgesetzt.

8.5 Datenkommunikation

Die zuvor beschriebenen Komponenten der Simulationsumgebung sind als dezentrale, unabhängig voneinander fungierende *Stand-Alone*-Systeme konzipiert. Sie sind über ein Netzwerksystem unter Verwendung eines Datenservers und einer speziellen eigenentwickelten Datenübertragungssoftware miteinander verbunden. Die Datenkommunikation fungiert im übertragenden Sinne als Bindeglied zwischen den einzelnen Subsystemen der Simulationsumgebung.

Der Vorteil, der sich aus diesem Aufbau der Simulationsumgebung ergibt, liegt in der Parallelisierung der Einzelprozesse. Die Anforderungen, die an die einzelnen Teilsysteme gestellt werden, sind im Vergleich zum Gesamtsystem um ein vielfaches geringer, so dass sich auch mit den verwendeten Standard-PCs eine leistungsfähige Simulationsumgebung aufbauen ließ.

Das Konzept zur echtzeitfähigen Datenkommunikation wurde von Dipl.-Ing. Ludger Blind entwickelt und basiert auf dem TCP/IP-Protokoll (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*). Mit diesem Protokoll ist zugleich ein offenes Netzwerk-Betriebssystem verbunden, das standardisierte Schnittstellen zur Netzwerkübertragung beinhaltet. Die Datenkommunikation ist unabhängig von der verwendeten Hardware und dem verwendeten Betriebssystem (MS-DOS, Windows, Linux usw.) der einzelnen, am Netzwerk angeschlossenen Computer.

Zur Datenkommunikation zwischen den einzelnen Subsystemen der Simulationsumgebung wurde ein lokales Netzwerk (LAN), bestehend aus vier PCs, aufgebaut. Hierzu wurde ein sog. *Switch* eingesetzt, über den alle beteiligten Rechner sternförmig

miteinander verbunden wurden. Die verwendeten Standard-Netzwerkkarten und Datenkabel ermöglichen eine Datenübertragungsgeschwindigkeit von 100 Mbit pro Sekunde. Die Größe der für den Informationsaustausch relevanten Nutzdaten wurde bei dem angewendeten Verfahren auf 88 Byte begrenzt, um eine echtzeitfähige Datenkommunikation zu gewährleisten.

Die Funktion des Datenservers wurde mit der Versuchsablaufsteuerung gekoppelt, da beide Prozesse ohne großen Leistungsverlust auf einem einzigen Rechner miteinander kombiniert werden konnten. Die zur Kommunikation notwendigen *Client*-Prozesse der übrigen Teilsysteme wurden direkt mit in die entsprechende Software integriert. Um zu verhindern, dass Übertragungsfehler die Datenkommunikation verfälschen, wurde ein Kontrollmechanismus eingesetzt, der die empfangenen Datenpakete auf Aktualität prüft.

Um einen bidirektionalen Informationsaustausch der einzelnen Teilsysteme zu gewährleisten, wurde ein spezielles *Multiplex*-Verfahren eingesetzt, das die Voll-duplex-Fähigkeit einer *Socket*-Verbindung nutzt [Blind97]. Die *Transport-Delay*-Zeiten betragen ca. 3-5 ms.

9 Versuchsauswertung

9.1 Verfahren

Zur Auswertung der beiden Versuchsreihen werden verschiedene Verfahren der deskriptiven Statistik und der Inferenzstatistik angewandt. Zur Beurteilung von Mittelwertsunterschieden zwischen zwei oder mehreren abhängigen Stichproben werden neben verschiedenen nichtparametrischen Tests vor allem univariate Varianzanalysen durchgeführt.

Den beiden in Tabelle 9.1 aufgeführten Versuchsplänen des Haupt- und Vorversuchs ist zu entnehmen, dass bei den Messreihen mehrere abhängige Variablen erfasst wurden. Bei der Auswertung würde es sich daher anbieten, auf multivariate Varianzanalysen zurückzugreifen. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn die abhängigen Variablen nicht unabhängig voneinander sind, sondern untereinander Korrelationen aufweisen /Bühl02/. Wenn dies zuträfe, wäre es möglich, Unterschiedshypothesen aufzustellen, die sich auf mehrere abhängige Variablen beziehen, und diese dann mit einem multivariaten Mittelwertvergleich zu prüfen. Im vorliegenden Fall sind die abhängigen Variablen jedoch als wechselseitig unabhängig zu betrachten, was sich auch durch eine entsprechende Berechnung der Korrelationskoeffizienten bestätigt. Zudem geht es nicht primär um die Frage, ob sich die Stichproben in Bezug auf alle erfassten Messdaten unterscheiden, sondern vor allem darum, wie sich die Faktorstufenvariationen auf die einzelnen abhängigen Variablen auswirken.

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die beiden Variablen Reaktionszeit und Note bei einigen Faktorstufenkombinationen miteinander korrelieren. Da der Korrelationskoeffizient als Maßzahl für die Stärke des Zusammenhangs zwischen den beiden Variablen zumeist nur eine geringe Korrelation attestiert und bei mehreren Faktorstufenkombinationen die beiden Variablen als vollkommen unabhängig voneinander einzustufen sind, erschien auch in diesem Fall die Durchführung einer multivariaten Varianzanalyse als unzweckmäßig.

Zur Erläuterung der einzelnen Variablen und ihrer Einstufung in ein bestimmtes Skalenniveau sei Folgendes angemerkt:

Als Kennwert für die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung fungieren die aus den Messreihen gewonnenen Diskriminierungsschwellen. Um diese zu bestimmen und zusammen mit den übrigen Messwerten auszuwerten, wurden die Messdaten zunächst in ein Tabellenkalkulationsprogramm (Excel) übertragen und so aufbereitet, dass die statistische Analyse der Daten anhand des Statistikprogramms SPSS (Version 11) durchgeführt werden konnte. Als Arbeitsschritte des hierzu erstellten "Excel-Makros" sind zu nennen:

- Sortierung der chronologisch (randomisierte Reihenfolge) aufgezeichneten Daten nach den einzelnen Faktorstufen
- Bestimmung der individuellen Wahrnehmungsschwellenwerte der einzelnen Faktorstufen entsprechend dem Kriterium: Arithmetisches Mittel aus allen ab dem Erreichen des ersten Umkehrpunktes aufgezeichneten Messwerten

Um zu prüfen, inwieweit sich die Versuchsdauer auf die Messdaten auswirkt, wurde für den Hauptversuch noch eine zweite Messdatendatei erzeugt, bei der die Daten in ihrer chronologischen Reihenfolge belassen wurden.

Voraussetzung für die Durchführung einer Varianzanalyse sind eine auf dem Intervallskalenniveau oder höher gemessene abhängige Variable und mindestens eine als Faktor bezeichnete unabhängige Variable, wobei gilt, dass aus kontinuierlichen oder quasi kontinuierlichen Variablen zuvor geeignete Klassen gebildet werden müssen. Die Faktorbezeichnung Geschwindigkeitsgrößenordnung wurde von daher bewusst ausgewählt, um schon durch die Namensgebung die Klasseneinteilung (schnell, mittel, langsam) zum Ausdruck zu bringen.

Wie dem Versuchsplan zu entnehmen ist, wurde der zweite als Darbietungsform bezeichnete Faktor als nominalskaliert eingestuft. Es ist auch möglich die Darbietungsform als eine ordinalskalierte Variable aufzufassen, mit der Begründung, dass sich die verschiedenen Darbietungsformen in der Menge der zu verarbeitenden Informationen unterscheiden. Die folgende aufsteigende Codierung entspräche der Vorgabe:

1 = akustisch

2 = visuell

3 = visuell-akustisch

Da jedoch nicht davon auszugehen ist, dass die Güte einer Wahrnehmungsleistung allein von der Menge der Reizinformationen bestimmt wird und sich nicht automatisch, sozusagen durch Aufsummierung der Informationsaufnahmen zweier Sinneskanäle, eine höhere Leistungsgüte einstellt, wurde von diesem Ansatz Abstand genommen. Durch die Bewertung des Skalenniveaus als nominal, distanziert sich die vorliegende Untersuchung indirekt von einer quantitativen oder gar qualitativen Einteilung der verschiedenen Darbietungsformen. Die Bewertung des Skalenniveaus ist in diesem Fall jedoch als durchaus umstritten anzusehen.

Dass die als Note bezeichnete Kriteriumsvariable ebenso wie die übrigen abhängigen Variablen als verhältnisskaliert einzustufen ist, ergibt sich daraus, dass die eigentlich ordinalskalierte Variable durch Bildung des arithmetischen Mittels in ihrem Skalenniveau aufgewertet wird. Hierbei wurden, wie auch bei allen abhängigen Variablen, nur diejenigen Messdaten berücksichtigt, die ab dem Erreichen des ersten Umkehrpunktes aufgezeichnet wurden. Die Reaktionszeit entspricht in diesem Zusammenhang der gemittelten Zeitdifferenz zwischen dem Beginn des Vergleichsreizes und dem Auslösen der Antworttaste. Wie bereits im Kapitel 5 erläutert, legt sich der Proband durch das

Betätigen der Antworttaste in seiner Geschwindigkeitseinschätzung fest und beendet zugleich die Szene. Die Zeit, die vergeht, bis die Versuchsperson ihre Selbsteinschätzung abgibt, gilt als Antwortzeit.

Der Versuchsplan des Hauptversuchs enthält die beiden Gruppierungsvariablen Alter und Geschlecht. Die eigentlich verhältnisskalierte Variable erfährt durch eine Klasseneinteilung (älter, jünger) eine Abstufung ihres Skalenniveaus. In der Auswertung der Versuchsdaten werden noch weitere Zwischensubjektfaktoren mit in die Betrachtung einbezogen, die nicht in direktem Zusammenhang mit dem Versuchsplan stehen. Um welche es sich dabei handelt und wie diese bestimmt wurden, wird an späterer Stelle erläutert.

Tabelle 9.1: Versuchspläne des Vor- und Hauptversuchs

Vorversuch		Skalenniveau
Abhängige Variable (Kriteriumsvariable)	Diskriminierungsschwelle Reaktionszeit Antwortzeit Note (Selbsteinschätzung)	Verhältnis Verhältnis Verhältnis Intervall**
Faktor mit Messwiederholung	Darbietungsform	Nominal 2 Faktorstufen: <i>visuell, akustisch</i>
Hauptversuch		Skalenniveau
Abhängige Variable (Kriteriumsvariable)	Diskriminierungsschwelle Reaktionszeit Antwortzeit Note (Selbsteinschätzung)	Verhältnis Verhältnis Verhältnis Intervall**
Faktor mit Mess- wiederholung	Darbietungsform	Nominal 3 Faktorstufen: <i>visuell, visuell-akustisch, akustisch</i>
	Geschwindigkeits- größenordnung	Ordinal 3 Faktorstufen <i>120 km/h, 60 km/h, 30 km/h</i>
Faktor ohne Mess- wiederholung (Gruppierungs- variable)	Alter Geschlecht	Ordinal* (dichotom) Nominal (dichotom)

* Die verhältnisskalierte Variable Alter erfährt durch eine Klasseneinteilung eine Abstufung des Skalenniveaus.

** Die ordinalskalierte Variable wird durch Bildung des arithmetischen Mittels (über der Messreihe) in ihren Skalenniveau aufgewertet

9.2 Stichprobenumfang und Altersverteilung

An dem Versuch nahmen insgesamt 50 Versuchspersonen teil. Jede Versuchsperson absolvierte sowohl den Vorversuch als auch die als Hauptversuch deklarierte Messreihe. Bei der Auswertung konnten von den 50 Einzeluntersuchungen fünf nicht berücksichtigt werden, so dass sich der Stichprobenumfang entsprechend auf 45 reduziert. Grund hierfür waren fehlerhafte Messungen bzw. nicht vollständig durchgeführte Messumläufe.

Die Probanden waren fast ausnahmslos Studenten und Doktoranden des Fachbereichs Sicherheitstechnik. Gemessen an der Gesamtbevölkerung ist die Stichprobe als nicht repräsentativ anzusehen. Der Altersdurchschnitt betrug 27,51 Jahre. Die wichtigsten statistischen Werte zur Altersverteilung sind in Tabelle 9.2 zusammengefasst.

Tabelle 9.2: Deskriptive Statistiken zur Altersverteilung

Variablen		
N		45
		0
Mittelwert		27,51
Median		27,00
Modus		23
Standardabweichung		4,273
Minimum		22
Maximum		37
Perzentile	25	24,00
	50	27,00
	75	31,00

Von den zur Auswertung herangezogenen 45 Versuchspersonen im Alter zwischen 22 und 37 Jahren waren sechs weiblich. Eine Geschlechtsabhängigkeit der Diskriminierungsleistung ist entsprechend zu prüfen, wobei anzumerken ist, dass der Anteil der weiblichen Probanden verhältnismäßig klein ausfällt. Der Vergleich der geschlechtsspezifischen Alterszusammensetzung ergibt sich aus dem in Bild 9.1 aufgeführten Boxplots und den in Tabelle 9.3 zusammengefassten deskriptiven Statistiken. Jede Box ist vom ersten und dritten Quartil (Tukey-Angelpunkte) begrenzt. Neben dem Median sind die Werte für das geringste und das höchste Alter, die nicht als "Ausreißer" angesehen werden, durch die Linien begrenzt. Die mit 23 Jahren jüngste Teilnehmerin ist ebenso wie der 37-jährige älteste Proband als "Ausreißer" gekennzeichnet. Da die Definition eines "Ausreißers" nicht einheitlich ist, sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Statistikprogramm SPSS bei der Darstellung von Boxplots diejenigen Werte als "Ausreißer" kennzeichnet, die um das 1,5 bis 3-fache des der Boxhöhe entsprechenden

Betrags von der oberen bzw. unteren Boxgrenze abweichen. Größere Abstände, die als "Extremwerte" ausgewiesen würden, liegen in diesem Fall nicht vor.

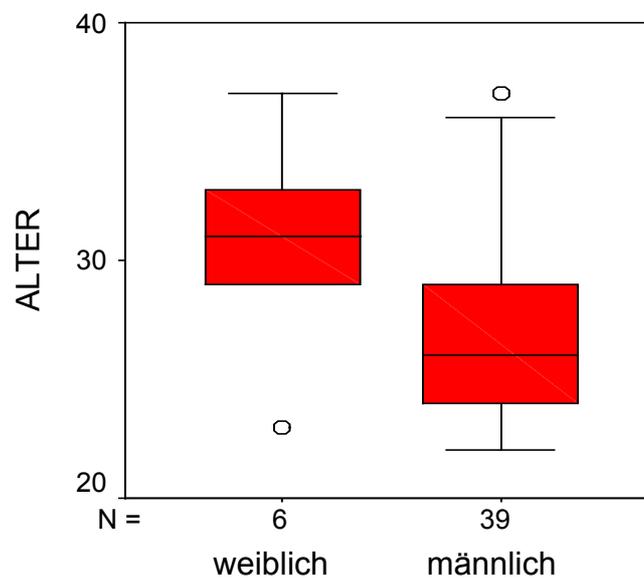


Bild 9.1: Geschlechtsspezifische Boxplots der Altersstruktur

Tabelle 9.3: Geschlechtsspezifische deskriptive Statistiken zur Altersverteilung

Alter	männlich	weiblich
N	39	6
Mittelwert	27,03	30,67
Modus	23,00(a)	31,00
Standardabweichung	4,06	4,63
Varianz	16,50	21,47
Minimum	22	23
Maximum	37	37
25. Perzentile	24,0	27,5
50. (Median) Perzentile	26	31
75. Perzentile	29,0	34,0

a Mehrere Modi vorhanden. Der kleinste Wert wird angezeigt

9.3 Geschwindigkeitsdiskriminierung

Wie bereits in Kapitel 5 beschrieben, wurde der Hauptversuch auf der Basis eines 3x3-faktoriellen Versuchsplans durchgeführt, bei dem die beiden unabhängigen Variablen Geschwindigkeitsgrößenordnung und Darbietungsform zwei Messwiederholungsfaktoren darstellen. Die Geschwindigkeitsgrößenordnung variiert dabei in den drei Stufen 120, 60 und 30 km/h. Bei der Darbietungsform wird zwischen *visuell*, *visuell-akustisch* und *akustisch* unterschieden.

Zur Auswertung der Messreihen wurden zunächst für jede Faktorstufe getrennt die entsprechenden Schwellenwerte für die Geschwindigkeitsdiskriminierung bestimmt. Die zu den neun Faktorstufenkombinationen gehörenden deskriptiven Statistiken der abhängigen Stichproben sind in Tabelle 9.5 zusammengefasst. Im Anschluss daran wurde eine univariate zweifaktorielle Varianzanalyse mit vollständiger Messwiederholung über beide Faktoren durchgeführt. Die Zuordnungen der verwendeten Variablenbezeichnungen zu den Faktorkombinationen (Zellendaten) sind folgender Tabelle zu entnehmen:

Tabelle 9.4: Innersubjektfaktoren des Hauptversuchs (DS1-DS9)

Geschwindigkeitsgrößenordnung	Darbietungsform		Abhängige Stichproben
1 (120 km/h)	1	<i>visuell</i>	DS1
	2	<i>visuell-akustisch</i>	DS2
	3	<i>akustisch</i>	DS3
2 (60 km/h)	1	<i>visuell</i>	DS4
	2	<i>visuell-akustisch</i>	DS5
	3	<i>akustisch</i>	DS6
3 (30km/h)	1	<i>visuell</i>	DS7
	2	<i>visuell-akustisch</i>	DS8
	3	<i>akustisch</i>	DS9

Tabelle 9.5: Deskriptiven Statistiken der abhängigen Stichproben DS1-DS9

	N	Parameter		Extremste Differenzen		
		MW	Stand.abw.	Abs.	Pos.	Neg.
DS1	45	18,17	9,86	,110	,110	-,077
DS2	45	19,26	10,20	,076	,076	-,057
DS3	45	24,17	12,45	,112	,112	-,048
DS4	45	18,68	10,35	,114	,114	-,068
DS5	45	19,05	9,86	,138	,138	-,079
DS6	45	25,15	13,02	,079	,079	-,056
DS7	45	17,74	8,97	,097	,097	-,060
DS8	45	17,71	10,36	,084	,084	-,069
DS9	45	28,70	12,51	,101	,101	-,052

Die Ergebnisse der Varianzanalyse lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die Prüfung auf Sphärizität (Zirkularität), die als Voraussetzung für die Durchführung der Varianzanalyse gemäß der klassischen Methode nach Fisher dient, ergibt, wie Tabelle 9.6 zeigt, dass diese Eigenschaft für den Faktor Darbietungsform nicht gegeben ist. Die für die Anpassung (Adjustierung) der Freiheitsgrade der F-Tests notwendigen Epsilon-Werte, die eine Durchführung der Varianzanalyse dennoch erlauben, sind ebenfalls in der Tabelle aufgeführt. Dass sich eine solche Anpassung in Hinblick auf die Einstufung der Haupteffekte nicht bzw. nur marginal auswirkt, ergibt sich aus der Ergebnisdarstellung der Varianzanalyse in Tabelle 9.7.

Tabelle 9.6: Mauchly-Test auf Sphärizität (DS1-DS9)

		Innersubjekteffekt		
		GE	DARB	GE * DARB
Mauchly-W		,993	,826	,733
Approximiertes Chi-Quadrat		,290	8,210	13,199
df		2	2	9
Signifikanz		,865	,016	,154
Epsilon	Greenhouse-Geisser	,993	,852	,877
	Huynh-Feldt	1,000	,883	,962
	Untergrenze	,500	,500	,250

Tabelle 9.7: Tests der Innersubjekteffekte (DS1-DS9)

Quelle		Epsilon-Korrekturen		
		Sphärizität angenommen	Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt
GE	Quadratsumme vom Typ III	48,63	48,63	48,63
	df	2	1,987	2,000
	Mittel der Quadrate	24,32	24,48	24,32
	F	,452	,452	,452
	Signifikanz	,638	,636	,638
	Beobachtete _a Schärfe	,122	,121	,122
DARB	Quadratsumme vom Typ III	5171,21	5171,21	5171,21
	df	2	1,704	1,765
	Mittel der Quadrate	2585,61	3035,01	2929,05
	F	30,214	30,214	30,214
	Signifikanz	,000	,000	,000
	Beobachtete _a Schärfe	1,000	1,000	1,000
GE * DARB	Quadratsumme vom Typ III	545,54	545,54	545,54
	df	4	3,509	3,850
	Mittel der Quadrate	136,39	155,49	141,70
	F	2,982	2,982	2,982
	Signifikanz	,021	,026	,022
	Beobachtete _a Schärfe	,787	,745	,775

a. Unter Verwendung von Alpha = ,05 berechnet

Bezüglich der Kernfrage, inwieweit die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung von der Geschwindigkeitsgrößenordnung und der Darbietungsform beeinflusst wird, bleibt festzuhalten, dass die Geschwindigkeitsgrößenordnung im Gegensatz zur Darbietungsform keinen signifikanten Einfluss auf die Diskriminierungsschwelle ausübt. Der Einfluss der Darbietungsform ist (auf dem Niveau von 0,001) höchst signifikant. Der Interaktionseffekt zwischen beiden Faktoren ist auch bei den Epsilon-Korrekturen nach Greenhouse-Geisser und Huynh-Feldt als signifikant einzustufen.

Werden die Berechnungen zu den Faktoren und ihren Wechselwirkungen auf der Basis des allgemeinen linearen Modells (ALM) wiederholt, so zeigt sich ebenfalls - auch unabhängig davon, ob der T²-Test nach Hotelling oder einem anderen der hier aufgeführten Verfahren (Pillai, Wilks oder Roy) durchgeführt wird -, dass die Geschwindigkeitsgrößenordnung im Gegensatz zur Darbietungsform keinen signifikanten Einfluss auf die Diskriminierungsschwelle ausübt. Da sich die Ergebnisse der verschiedenen Prüfverfahren bei Vorliegen nur einer abhängigen Variablen generell nicht vom T²-Test nach Hotelling unterscheiden, wird im Folgenden immer auf ihre Darstellung verzichtet. Die Signifikanzwerte sind, wie Tabelle 9.8 zeigt, fast identisch mit denen der klassischen Methode nach Fisher, wobei dies für den Interaktionseffekt jedoch nicht zutrifft. Dieser gilt sogar als nicht signifikant.

Tabelle 9.8: Multivariate Tests (ALM DS1-DS9)

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Signifikanz	
GE	Pillai-Spur	,021	,456 ^b	2,000	43,000	,637
	Wilks-Lambda	,979	,456 ^b	2,000	43,000	,637
	Hotelling-Spur	,021	,456 ^b	2,000	43,000	,637
	Größte charakteristische Wurzel nach Roy	,021	,456 ^b	2,000	43,000	,637
DARB	Pillai-Spur	,494	20,972 ^b	2,000	43,000	,000
	Wilks-Lambda	,506	20,972 ^b	2,000	43,000	,000
	Hotelling-Spur	,975	20,972 ^b	2,000	43,000	,000
	Größte charakteristische Wurzel nach Roy	,975	20,972 ^b	2,000	43,000	,000
GE *	Pillai-Spur	,175	2,167 ^b	4,000	41,000	,090
	Wilks-Lambda	,825	2,167 ^b	4,000	41,000	,090
	Hotelling-Spur	,211	2,167 ^b	4,000	41,000	,090
DARB	Größte charakteristische Wurzel nach Roy	,211	2,167 ^b	4,000	41,000	,090

b. Exakte Statistik

Um zu prüfen, ob und zwischen welchen Faktorstufen sich signifikante Änderungen in den Werten der abhängigen Variablen ergeben, wurden vom Auswerteprogramm paar-

weise Vergleiche für beide Faktoren angefordert. Diese paarweisen Vergleiche entsprechen prinzipiell mehreren t-Tests für gepaarte Stichproben, wobei sich die Stichprobenwerte aus den Zeilen- und Spaltenmitteln der 3x3-Faktorstufenmatrix berechnen. Da diese paarweisen Vergleiche zwischen den verschiedenen Kategorien (Faktorstufen) des jeweiligen Faktors nicht unabhängig voneinander sind und bei isolierter Betrachtung eines einzelnen Vergleichs die Gefahr besteht, die Irrtumswahrscheinlichkeit zu unterschätzen /Bros02/, wurde bei dieser Testreihe auf die Auswerteoption "Anpassung nach Bonferroni" zurückgegriffen.

Tabelle 9.9 bestätigt, dass für den Faktor Geschwindigkeitsgrößenordnung keine Faktorstufenpaarung existiert, bei denen die entsprechenden Stichproben signifikant voneinander abweichen. Für die Faktorstufenpaarungen die sich in Bezug auf die verschiedenen Darbietungsformen ergeben, ist hingegen zu sagen, dass alle Stichprobenpaarungen mit der Faktorstufe 3 (*akustisch*) signifikante Abweichungen aufweisen. Diese Feststellung deckt sich mit den Ergebnissen aus dem Vorversuch, bei dem ebenfalls zwischen der *visuellen* und der *akustischen* Darbietung ein signifikanter Mittelwertsunterschied zwischen den Geschwindigkeitsdiskriminierungsschwellen festgestellt wurde. Ergänzt wird dies durch die Feststellung, dass sich die Diskriminierungsschwellen zwischen den Darbietungsformen *visuell* und *visuell-akustisch* im Mittel nicht signifikant voneinander unterscheiden. Was auch indirekt erklärt, dass sich zwischen der letztgenannten Darbietungsform und der *akustischen* Darbietung ebenfalls signifikante Unterschiede ergeben.

Insgesamt ist festzustellen, dass sich aus der durchgeführten Varianzanalyse einige Aussagen bezüglich der Kernfrage, inwieweit die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung von der Geschwindigkeitsgrößenordnung und der Darbietungsform beeinflusst wird, ableiten lassen. Die Aussagekraft ist jedoch aufgrund des signifikanten Interaktionseffekts, der anhand der klassischen Methode nach Fisher nachgewiesen werden konnte, teilweise eingeschränkt.

Tabelle 9.9: Paarweise Vergleiche für den Faktor Geschwindigkeit (DS1-DS9)

(I) GE	(J) GE	Mittlere Differenz (I-J)	Standardf.	Signifikanz ^a	95% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-,427	,927	1,000	-2,736	1,881
	3	-,849	,881	1,000	-3,042	1,344
2	1	,427	,927	1,000	-1,881	2,736
	3	-,422	,868	1,000	-2,581	1,738
3	1	,849	,881	1,000	-1,344	3,042
	2	,422	,868	1,000	-1,738	2,581

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Tabelle 9.10: Paarweise Vergleiche für den Faktor Darbietungsform (DS1-DS9)

(I) DARB	(J) DARB	Mittlere Differenz (I-J)	Standardf.	Signifikanz ^a	95% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					Untergrenze	Obergrenze
1	2	-,476	,869	1,000	-2,639	1,686
	3	-7,807*	1,278	,000	-10,989	-4,625
2	1	,476	,869	1,000	-1,686	2,639
	3	-7,331*	1,189	,000	-10,291	-4,371
3	1	7,807*	1,278	,000	4,625	10,989
	2	7,331*	1,189	,000	4,371	10,291

*. Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau ,05 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Um die Ursache für den signifikanten Interaktionseffekt zu ermitteln, ist es im vorliegenden Fall günstig, Einzelvergleiche zwischen den Zeilen- und Spaltenmittel mit dem Kontrasttyp "Einfach" durchzuführen. Bei diesem Kontrasttyp werden die Mittelwerte der einzelnen Stufen jeweils mit dem Mittel der ersten oder letzten Stufe verglichen. Wie sich aus den in Tabelle 9.11 und 9.12 aufgelisteten Tests der Inner-subjektkontraste ablesen lässt, ergibt sich für den Haupteffekt des Faktors Darbietungsform für alle Vergleiche mit dem Zeilenmittel der dritten Stufe ein signifikanter Kontrast. Eine Feststellung, die sich mit den zuvor erläuterten Ergebnissen aus den Paarvergleichen für diesen Faktor deckt. Bezüglich des Interaktionseffekts ist festzustellen, dass sich hoch signifikante Kontraste ergeben, wenn für beide Faktoren die Mittelwertsunterschiede zu den dritten Stufen mit in den Test einfließen.

Tabelle 9.11: Tests der Innersubjektkontraste (Kontrasttyp: Einfach, Erste)

Quelle	GESCH	DARB	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
GE	Stufe 2 gegen Stufe 1		8,214	1	8,214	,212	,647
	Stufe 3 gegen Stufe 1		32,420	1	32,420	,928	,341
DARB	Stufe 2 gegen Stufe 1		10,208	1	10,208	,301	,586
	Stufe 3 gegen Stufe 1		2742,722	1	2742,722	37,294	,000
GE * DARB	Stufe 2 gegen Stufe 1	Stufe 2 gegen Stufe 1	23,666	1	23,666	,164	,687
	Stufe 2 gegen Stufe 1	Stufe 3 gegen Stufe 1	9,930	1	9,930	,054	,817
GE * DARB	Stufe 3 gegen Stufe 1	Stufe 2 gegen Stufe 1	57,271	1	57,271	,408	,526
	Stufe 3 gegen Stufe 1	Stufe 3 gegen Stufe 1	1104,078	1	1104,078	6,240	,016

Tabelle 9.12: Tests der Innersubjektkontraste (Kontrasttyp: Einfach, Letzte)

Quelle	GESCH	DARB	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
GE	Stufe 1 gegen Stufe 3		32,420	1	32,420	,928	,341
	Stufe 2 gegen Stufe 3		7,997	1	7,997	,236	,629
DARB		Stufe 1 gegen Stufe 3	2742,722	1	2742,722	37,294	,000
		Stufe 2 gegen Stufe 3	2418,283	1	2418,283	37,995	,000
GE * DARB	Stufe 1 gegen Stufe 3	Stufe 1 gegen Stufe 3	1104,078	1	1104,078	6,240	,016
	Stufe 1 gegen Stufe 3	Stufe 2 gegen Stufe 3	1664,269	1	1664,269	6,898	,012
	Stufe 2 gegen Stufe 3	Stufe 1 gegen Stufe 3	904,598	1	904,598	4,930	,032
	Stufe 2 gegen Stufe 3	Stufe 2 gegen Stufe 3	1074,499	1	1074,499	4,929	,032

Tabelle 9.13: Aufteilung des 3x3-faktoriellen Versuchsplans

	<i>akustisch</i>			<i>visuell</i>		<i>visuell-akustisch</i>
120 km/h		DS3	120 km/h	DS1	DS2	
60 km/h		DS6	60 km/h	DS4	DS5	
30 km/h		DS9	30 km/h	DS7	DS8	

Der Grund für dieses Testergebnis wird deutlich, wenn der Hauptversuch aufgrund der Sonderstellung, die die dritte Stufe der Darbietungsform (*akustisch*) zweifellos einnimmt, nicht in einem, sondern in zwei Schritten analysiert wird. Der 3x3-faktorielle Versuchsplan wird hierbei theoretisch in zwei verschiedene Versuchspläne aufgeteilt. Tabelle 9.13 verdeutlicht, dass dieses Vorgehen einerseits zu einer einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung führt und sich andererseits ein 3x2-faktorieller Versuchsplan ergibt, der sich anhand einer zweifaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung auswerten lässt.

Schritt 1

Wird infolge der separaten Betrachtung der auditiven Diskriminierungsschwelle (linker Teil der Tabelle 9.13) eine einfaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt, so zeigt sich (bei positivem Mauchly-Test auf Sphärizität), dass der Faktor Geschwindigkeitsgrößenordnung einen signifikanten Einfluss auf die Güte der auditiven Geschwindigkeitsdiskriminierung ausübt. Wie sich Tabelle 9.14 entnehmen lässt, liegt, unabhängig davon, ob Sphärizität angenommen wird oder ob eine Adjustierung der Freiheitsgrade für die F-Tests erfolgt, der Signifikanzwert bei 0,028.

Tabelle 9.14: Tests der Innersubjekteffekte (DS3 DS6 DS9)

Quelle		Sphärizität angenommen	Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt
GE	Quadratsumme vom Typ III	510,37	510,37	510,37
	df	2	1,98	2,00
	Mittel der Quadrate	255,19	257,80	255,19
	F	3,734	3,734	3,734
	Signifikanz	,028	,028	,028
	Beobachtete Schärfe ^a	,670	,667	,670

a. Unter Verwendung von Alpha = ,05 berechnet

Die in Tabelle 9.15 aufgeführten paarweisen Vergleiche zeigen, dass nur zwischen den Stichproben der Faktorstufen 1 und 3 signifikante Abweichungen vorliegen. Um die Irrtumswahrscheinlichkeiten nicht zu unterschätzen /Bros02/, wurde bei dieser Testreihe die Auswertoption "Anpassung nach Bonferroni" verwendet. Geschieht dies nicht, so ergeben sich erwartungsgemäß niedrigere Irrtumswahrscheinlichkeiten, und die mittleren Differenzen werden bei allen Paarungen mit der Stichprobe der Faktorstufe 3 als signifikant eingestuft (Tabelle 9.16).

Tabelle 9.15: Paarweise Vergleiche für den Faktor Geschwindigkeit (Bonferroni DS3 DS6 DS9)

(I) GE	(J) GE	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	95% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					UG	OG
1	2	-,982	1,825	1,000	-5,525	3,561
	3	-4,527*	1,677	,029	-8,701	-,353
2	1	,982	1,825	1,000	-3,561	5,525
	3	-3,545	1,723	,137	-7,833	,743
3	1	4,527*	1,677	,029	,353	8,701
	2	3,545	1,723	,137	-,743	7,833

*. Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau ,05 signifikant

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Tabelle 9.16: Paarweise Vergleiche für den Faktor Geschwindigkeit (DS3 DS6 DS9)

(I) GE	(J) GE	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	95% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					UG	OG
1	2	-,982	1,825	,593	-4,660	2,696
	3	-4,527*	1,677	,010	-7,907	-1,147
2	1	,982	1,825	,593	-2,696	4,660
	3	-3,545*	1,723	,046	-7,017	-,073
3	1	4,527*	1,677	,010	1,147	7,907
	2	3,545*	1,723	,046	,073	7,017

*. Die mittlere Differenz ist auf dem Niveau ,05 signifikant

a. Keine Anpassung für Mehrfachvergleiche

Schritt2:

Zur Auswertung des in Tabelle 9.13 aufgeführten 3x2-faktoriellen Versuchsplans wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse mit Messwiederholung durchgeführt. Die in Tabelle 9.17 zusammengefassten Ergebnisse belegen (bei positivem Mauchly-Test auf Sphärizität), dass sich weder aus den verschiedenen Geschwindigkeitsgrößenordnungen noch aus den beiden unterschiedlichen Darbietungsformen Unterschiede in Hinblick auf die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung ergeben. Zudem ist der Interaktionseffekt der beiden Faktoren nicht signifikant.

Tabelle 9.17: Tests der Innersubjekteffekte (ALM DS1 DS2 DS4 DS5 DS7 DS8)

Quelle		Sphärizität angenommen	Greenhouse- Geisser	Huynh-Feldt
GE	Quadratsumme vom Typ III	69,091	69,091	69,091
	Mittel der Quadrate	34,546	34,668	34,546
	F	,772	,772	,772
	Signifikanz	,465	,465	,465
DARB	Quadratsumme vom Typ III	15,312	15,312	15,312
	Mittel der Quadrate	15,312	15,312	15,312
	F	,301	,301	,301
	Signifikanz	,586	,586	,586
GE * DARB	Quadratsumme vom Typ III	14,707	14,707	14,707
	Mittel der Quadrate	7,354	7,685	7,358
	F	,229	,229	,229
	Signifikanz	,796	,786	,796

Die Ergebnisse der beiden in Bezug auf die Güte der Diskriminierungsleistung durchgeführten Varianzanalysen werden in den beiden Tabellen 9.18 und 9.19 in komprimierter Form zusammengefasst. Die Aufstellung enthält neben den wichtigsten Signifikanzwerten (Hotellings T²-Test und Paarvergleiche), die deskriptiven Statistiken und die Profildiagramme der Randmittel. Die sich aus den Paarvergleichen ergebenden Irrtumswahrscheinlichkeiten sind hierbei in einer Matrix zusammengefasst und farblich nur dann hervorgehoben, wenn ihr Wert auf signifikante Mittelwertsdifferenzen schließen lässt. Ergänzend hierzu sind in Bild 9.2 über die drei Geschwindigkeitsstufen, nach Darbietungsform getrennt, die Mittelwerte aus den zugehörigen neun abhängigen Stichproben aufgetragen

Tabelle 9.18: Deskriptive Statistiken, Paarvergleiche und Profildiagramm (auditive Diskriminierungsschwelle)

		GE			
		1	2	3	
Mittelwert		24,17	25,15	28,70	
Standardfehler		1,856	1,942	1,865	
95%-KI	UG	20,43	21,24	24,94	
	OG	27,91	29,06	32,45	
Signifikanz		,024*			
**	1		1	,029	
Paarvergl.	2	1		,137	
	3	,029	,137		
		Profildiagramm			
Diskriminierungsschwelle					
	GE				
	120	60	30		

* Hotellings T²-Test

**Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Tabelle 9.19: Deskriptive Statistiken, Paarvergleiche und Profildiagramm (Diskriminierungsschwelle, 3x2-faktorieller Plan)

		GE			DARB	
		1	2	3	1	2
Mittelwert		18,72	18,87	17,73	18,20	18,67
Standardfehler		1,326	1,349	1,317	1,260	1,292
95%-KI	UG	16,05	16,15	15,07	15,66	16,07
	OG	21,39	21,59	20,38	20,74	21,28
Signifikanz		,471*			,586*	
				,820*		
**	1		1	1		,586
Paarvergl.	2	1		,741	,586	
	3	1	,741			

		Profildiagramme			
Diskriminierungsschwelle					
		GE		DARB	
		120	60	30	V

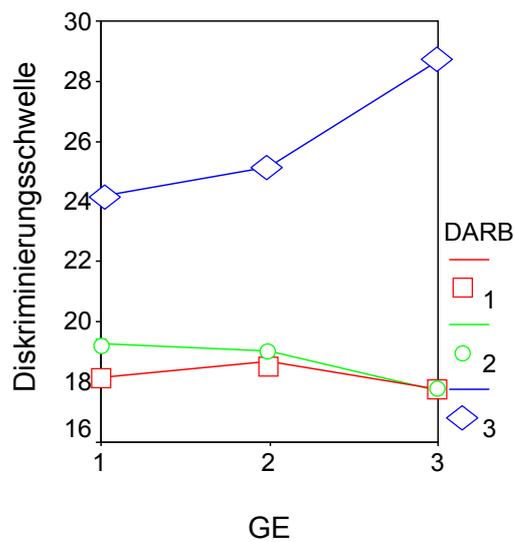


Bild 9.2: Die über die drei Geschwindigkeitsstufen getrennt nach Darbietungsform aufgetragenen Mittelwerte der neun abhängigen Stichproben (Diskriminierungsschwelle)

9.4 Mittlere Selbsteinschätzung, Reaktions- und Antwortzeit

Neben der Kernfrage, inwieweit die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung von der Geschwindigkeitsgrößenordnung und der Darbietungsform beeinflusst wird, sind auch die Auswirkungen der Faktorstufenvariationen auf die mittleren Selbsteinschätzungen, Reaktions- und Antwortzeiten von Interesse. Um diese genauer zu untersuchen, werden die im vorherigen Kapitel angewandten Analysemethoden auf diese Fragestellung übertragen. Dabei wurden die in Tabelle 9.20 aufgelisteten Variablenbezeichnungen für die abhängigen Stichproben des 3x3-faktoriellen Versuchsplans verwendet.

Tabelle 9.20: Innersubjektfaktoren des Hauptversuchs (RZ AZ Note)

Geschwindigkeitsgrößenordnung	Darbietungsform		Abhängige Variablen		
1 (120 km/h)	1	visuell	RZ1	AZ1	NOTE1
	2	visuell-akustisch	RZ2	AZ2	NOTE2
	3	akustisch	RZ3	AZ3	NOTE3
2 (60 km/h)	1	visuell	RZ4	AZ4	NOTE4
	2	visuell-akustisch	RZ5	AZ5	NOTE5
	3	akustisch	RZ6	AZ6	NOTE6
3 (30km/h)	1	visuell	RZ7	AZ7	NOTE7
	2	visuell-akustisch	RZ8	AZ8	NOTE8
	3	akustisch	RZ9	AZ9	NOTE9

Mittlere Reaktionszeit

Die Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse, die durchgeführt wurde, um zu beurteilen, ob und inwieweit sich die mittleren Reaktionszeiten in Abhängigkeit von der Geschwindigkeitsgrößenordnung und der Darbietungsform verändern, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Die Prüfung der Haupt- und Interaktionseffekte der Faktoren ergibt, unabhängig davon, ob hierbei das allgemeine lineare Modell (Tabelle 9.21) oder das klassische Methode nach Fischer (Tabelle 9.22) angewandt wird, dass von beiden Faktoren ein (höchst-) signifikanter Einfluss ausgeht. Ihre Wechselwirkungen sind nicht signifikant. Der durchgeführte Mauchly-Test bestätigt Sphärizität. Aus den paarweise für die Haupteffekte ausgeführten Vergleichen ergibt sich, dass bei allen Stufenkombinationen des Faktors Darbietungsform signifikante Abweichungen zwischen den Randmitteln auftreten (Tabelle 9.23). Beim Faktor Geschwindigkeit ist dies ausschließlich bei allen Kombinationen mit Faktorstufe 1 der Fall (Tabelle 9.24). Um die Ergebnisse der Varianzanalyse in kompakter Form zusammenzufassen, sind in Tabelle 9.25 die wichtigsten Signifikanzwerte (Hotellings T^2 -Test und Paarvergleiche), die deskriptiven Statistiken und die Profildiagramme der Randmittel aufgeführt. Die sich aus den Paarvergleichen ergebenden Irrtumswahrscheinlichkeiten sind hierbei in einer Matrix

zusammengefasst und farblich nur dann hervorgehoben, wenn ihr Wert auf signifikante Mittelwertsdifferenzen schließen lässt.

Tabelle 9.21: Multivariate Tests (ALM RZ1-RZ9)

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Signifikanz
GE Hotelling-Spur	,388	8,347 ^b	2,000	43,000	,001
DARB Hotelling-Spur	5,219	112,208 ^b	2,000	43,000	,000
GE * DARB Hotelling-Spur	,144	1,480 ^b	4,000	41,000	,226

b. Exakte Statistik

Tabelle 9.22: Tests der Innersubjekteffekte (RZ1-RZ9)

Quelle		Sphärizität angenommen	Greenhouse-Geisser
GE	Quadratsumme vom Typ III	2,913	2,913
	df	2	1,861
	Mittel der Quadrate	1,456	1,565
	F	10,313	10,313
	Signifikanz	,000	,000
DARB	Quadratsumme vom Typ III	87,554	87,554
	df	2	1,859
	Mittel der Quadrate	43,777	47,101
	F	135,830	135,830
	Signifikanz	,000	,000
GE * DARB	Quadratsumme vom Typ III	,972	,972
	df	4	3,569
	Mittel der Quadrate	,243	,272
	F	1,615	1,615
	Signifikanz	,172	,179

Tabelle 9.23: Paarweise Vergleiche für den Faktor Geschwindigkeit (Bonferroni RZ1-RZ9)

(I) GE	(J) GE	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	95% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					UG	OG
1	2	,142	,049	,016	,021	,263
	3	,202	,049	,000	,080	,324
2	1	-,142	,049	,016	-,263	-,021
	3	,060	,039	,388	-,037	,157
3	1	-,202	,049	,000	-,324	-,080
	2	-,060	,039	,388	-,157	,037

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Tabelle 9.24: Paarweise Vergleiche für den Faktor Darbietungsform (Bonferroni RZ1-RZ9)

(I) DARB	(J) DARB	Mittlere Differenz (I-J)	Standardfehler	Signifikanz ^a	95% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					UG	OG
1	2	-,469	,059	,000	-,616	-,322
	3	-1,133	,075	,000	-1,320	-,946
2	1	,469	,059	,000	,322	,616
	3	-,665	,072	,000	-,844	-,485
3	1	1,133	,075	,000	,946	1,320
	2	,665	,072	,000	,485	,844

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Tabelle 9.25: Deskriptive Statistiken, Paarvergleiche und Profildiagramme der Randmittel (Reaktionszeit)

		GE			DARB			
		1	2	3	1	2	3	
Mittelwert		2,86	2,72	2,66	2,21	2,68	3,34	
Standardfehler		,070	,076	,086	,076	,092	,080	
95%-KI	UG	2,72	2,57	2,48	2,06	2,49	3,18	
	OG	3,00	2,87	2,83	2,36	2,86	3,51	
Signifikanz		,001*			,000*			
		,226*						
**	1		,016	,000		,000	,000	
Paarvergl.	2	,016		,388	,000		,000	
	3	,000	,388		,000	,000		
Profildiagramme								
Reaktionszeit								
			GE			DARB		
			120	60	30	V	V&A	A

* Hotellings T²-Test **Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Ein Vergleich der beiden in Tabelle 9.25 abgebildeten Profildiagramme der Zeilen- und Spaltenmittel weist eindeutig darauf hin, dass der Faktor Darbietungsform einen dominanten Einfluss auf die Messdaten der mittleren Reaktionszeiten ausübt. Obwohl ein Interaktionseffekt zwischen den beiden Faktoren nicht nachgewiesen werden konnte, fällt bei den in Tabelle 9.26 aufgeführten Einzelvergleichen zwischen den Zeilen- und Spaltenmittel mit dem Kontrasttyp "Einfach" dennoch auf, dass sich in Bezug auf die Interaktion Werte ergeben, die auf starke Kontraste hindeuten. Konkret ergeben sich in den beiden Fällen, bei denen die Mittelwertsunterschiede zwischen der dritten und ersten Stufe des Faktors Darbietungsform in die Berechnungen mit einfließen, Irrtumswahrscheinlichkeiten (0,054 und 0,064), die nur knapp über dem üblicherweise angenommenen Grenzwert für Signifikanz (0,05) liegen.

Tabelle 9.26: Tests der Innersubjektkontraste (Kontrasttyp: Einfach, Letzte; Reaktionszeit)

Quelle	GESCH	DARB	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
GE	Stufe 1 gegen Stufe 3		1,842	1	1,842	17,057	,000
	Stufe 2 gegen Stufe 3		,164	1	,164	2,391	,129
DARB		Stufe 1 gegen Stufe 3	57,793	1	57,793	227,665	,000
		Stufe 2 gegen Stufe 3	19,877	1	19,877	84,960	,000
GE * DARB	Stufe 1 gegen Stufe 3	Stufe 1 gegen Stufe 3	2,246	1	2,246	3,619	,064
	Stufe 1 gegen Stufe 3	Stufe 2 gegen Stufe 3	1,541	1	1,541	1,789	,188
	Stufe 2 gegen Stufe 3	Stufe 1 gegen Stufe 3	1,876	1	1,876	3,923	,054
	Stufe 2 gegen Stufe 3	Stufe 2 gegen Stufe 3	,066	1	,066	,108	,744

Werden zudem in einem Diagramm über die drei Geschwindigkeitsstufen, nach Darbietungsform getrennt, die Mittelwerte aus den zugehörigen neun abhängigen Stichproben aufgetragen (Bild 9.3), zeigt sich, neben der horizontalen Staffelung der Werte, die den starken Einfluss des Faktors Darbietungsform widerspiegelt, dass sich die drei Geschwindigkeitsstufen je nach Darbietungsform verschieden stark auf die abhängige Variable auswirken. Um dies genauer zu untersuchen, erscheint es vor allem unter Berücksichtigung der Überlegungen zu den Innersubjektkontrasten sinnvoll, die Darbietungsform *akustisch* separat zu betrachten. Die in Tabelle 9.27 zusammengefassten Ergebnisse der zugehörigen einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung zeigen, dass bei *akustischer* Darbietung der Faktor Geschwindigkeitsgrößenordnung keinen signifikanten Einfluss auf die mittlere Reaktionszeit ausübt.

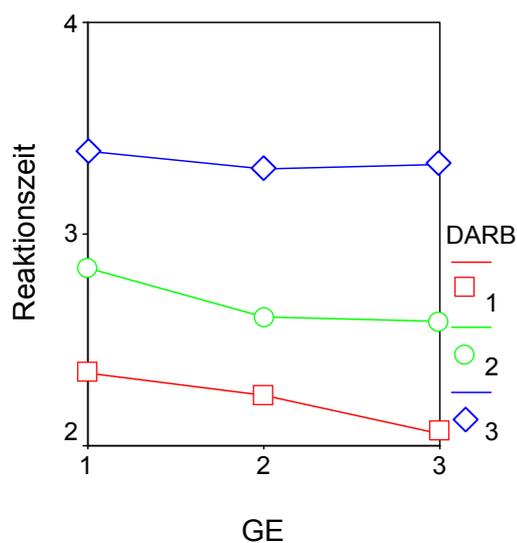


Bild 9.3: Die über die drei Geschwindigkeitsstufen getrennt nach Darbietungsform aufgetragenen Mittelwerte der neun abhängigen Stichproben (Reaktionszeit)

Tabelle 9.27: Deskriptive Statistiken, Paarvergleiche und Profildiagramm (mittlere auditive Reaktionszeit)

		GE			
		1	2	3	
Mittelwert		3,39	3,31	3,33	
Standardfehler		,093	,082	,096	
95%-KI	UG	3,21	3,14	3,13	
	OG	3,58	3,47	3,52	
Signifikanz		,448*			
**	1		,633	1	
Paarvergl.	2	,633		1	
	3	1	1		
		Profildiagramm			
Reaktionszeit					
	GE				
		120	60	30	

* Hotellings T²-Test

**Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Wird aufgrund der Separierung der Darbietungsform *akustisch* für die beiden übrigen Darbietungsformen von einem 3x2-faktoriellen Plan ausgegangen und die entsprechende Varianzanalyse durchgeführt, bestätigen sich, wie Tabelle 9.28 zeigt, die zuvor getroffenen Aussagen, die im Zusammenhang mit der Auswertung des 3x3-faktoriellen Plans getroffen wurden.

Tabelle 9.28: Deskriptive Statistiken, Paarvergleiche und Profildiagramme der Randmittel (Reaktionszeit, 3x2-faktorieller Plan)

		GE			DARB	
		1	2	3	1	2
Mittelwert		2,59	2,42	2,32	2,21	2,68
Standardfehler		,076	,089	,096	,076	,092
95%-KI	UG	2,44	2,24	2,13	2,06	2,49
	OG	2,75	2,60	2,51	2,36	2,86
Signifikanz		,003*			,000*	
				,324*		
**	1		,047	,002		,000
Paarvergl.	2	,047		,184	,000	
	3	,002	,148			
Profildiagramme						
Reaktionszeit	<p>Line graph for GE: The y-axis is 'Reaktionszeit' (0-4) and the x-axis is '1', '2', '3'. A red line with square markers shows values of approximately 2.59, 2.42, and 2.32.</p>			<p>Line graph for DARB: The y-axis is 'Reaktionszeit' (0-4) and the x-axis is '1', '2'. A red line with square markers shows values of approximately 2.21 and 2.68.</p>		
	GE			DARB		
		120	60	30	V	V&A

* Hotellings T²-Test **Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Antwortzeit und Note

Um die Betrachtungen über die Einflüsse der beiden Faktoren Geschwindigkeitsgrößenordnung und Darbietungsform auf die abhängigen Variablen zu komplettieren, ist es notwendig, auch für die Variablen Antwortzeit und Note jeweils eine univariate Varianzanalyse durchzuführen. In den Tabelle 9.29 und 9.30 sind nur die wichtigsten Analysedaten zusammengefasst. Das Schema der kompakten Ergebniszusammenfassung wurde von den vorherigen Analysen übernommen. Als Gesamtergebnis lässt sich für die beiden abhängigen Variablen Antwortzeit und Note fest-

halten, dass weder von der Darbietungsform noch der Geschwindigkeitsgrößenordnung ein signifikanter Einfluss auf die entsprechenden Messwerte ausgeht. Es besteht auch keine Notwendigkeit, wie bei den zuvor untersuchten abhängigen Variablen, eine Darbietungsform gesondert zu betrachten.

Tabelle 9.29: Deskriptive Statistiken, Paarvergleiche und Profildiagramme der Randmittel (Antwortzeit)

		GE			DARB		
		1	2	3	1	2	3
Mittelwert		1,97	1,95	1,96	1,95	1,97	1,97
Standardfehler		,076	,085	,082	,083	,081	,082
95%-KI	UG	1,82	1,78	1,79	1,78	1,81	1,80
	OG	2,13	2,12	2,13	2,12	2,13	2,13
Signifikanz		,780*			,897*		
		,311*					
**	1		1	1		1	1
Paarvergl.	2	1		1	1		1
	3	1	1		1	1	
Profildiagramme							
Antwortzeit							
		GE			DARB		
		120	60	30	V	V&A	A

* Hotellings T²-Test

**Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Tabelle 9.30: Deskriptive Statistiken, Paarvergleiche und Profildigramme der Randmittel (Note)

		GE			DARB			
		1	2	3	1	2	3	
Mittelwert		2,94	2,85	2,91	2,93	2,87	2,90	
Standardfehler		,105	,111	,106	,116	,105	,104	
95%-KI	UG	2,72	2,63	2,70	2,70	2,66	2,69	
	OG	3,15	3,08	3,13	3,17	3,08	3,11	
Signifikanz		,228*			,364*			
		,194*						
**	1		,268	1		,518	1	
Paarvergl.	2	,268		,703	,518		1	
	3	1	,703		1	1		
Profildigramme								
Note								
			GE			DARB		
		120	60	30	V	V&A	A	

* Hotellings T²-Test **Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

9.5 Alter und Geschlecht

Wie bereits in Kapitel 9.1 dargestellt, enthält der Versuchsplan für den Hauptversuch neben den abhängigen und unabhängigen Variablen auch die beiden Gruppierungsvariablen Alter und Geschlecht. Auf die geschlechtsspezifische Altersstruktur wurde bereits in Kapitel 9.2 eingegangen und angemerkt, dass der Anteil der weiblichen Probanden verhältnismäßig gering ausfällt. Um nun die Stichproben der abhängigen Variablen auf Altersabhängigkeit hin zu überprüfen, wurde die weitaus größere Gruppe der männlichen Versuchsteilnehmer bewusst isoliert betrachtet und in zwei etwa gleich große Altersklassen eingeteilt. Die Daten der weiblichen Versuchspersonen hierbei nicht zu berücksichtigen erschien notwendig, um einen möglichen Einfluss geschlechtsspezifischer Unterschiede auf die Altersabhängigkeit auszuschließen. Die als "jünger" bzw. "älter" titulierten (dichotomen) Altersklassen orientieren sich hierbei an einem dem Median entsprechenden Grenzwert von 26 Jahren (Tabelle 9.31).

Tabelle 9.31: Altersgruppierung der männlichen Probanden

	Häufigkeit	Prozent
jünger (bis 25)	18	46,2
älter (ab 26)	21	53,8
gesamt	39	100,0

Werden nun ausschließlich für die Gruppe der männlichen Probanden sämtliche zuvor diskutierten analytischen Betrachtungen wiederholt und dabei zusätzlich die dichotome Variable Alter als Zwischensubjektfaktor berücksichtigt, so ergibt sich zum einen, dass sich alle bis zu diesem Zeitpunkt getroffenen Aussagen bezüglich der beiden Faktoren Geschwindigkeitsgrößenordnung und Darbietungsform und ihren Einflüssen auf die abhängigen Variablen bestätigen. Indirekt lässt sich hieraus ableiten, dass die geschlechtsspezifischen Unterschiede in den Messwerten nur gering sein können. Des Weiteren ist den zugehörigen Tests der Zwischensubjekteffekte, die in Tabelle 9.32 zusammengefasst wurden, zu entnehmen, dass sich die nach Alterklassenzugehörigkeit aufgeteilten Randmittel nur in Bezug auf die abhängige Variable Antwortzeit voneinander unterscheiden. Für alle anderen abhängigen Variablen gilt gleichermaßen, dass keine Interaktionseffekte zwischen der gruppenbildenden Variablen und einer der beiden Messwiederholungsfaktoren vorliegen.

Wie Bild 9.4 verdeutlicht, liegen die Antwortzeiten für die als älter eingestuft Probanden im Mittel über denen der jüngeren. Dies trifft auch für alle neun abhängigen Stichproben zu, sofern man diese nach den beiden Altersgruppen aufgeteilt und ihre mittleren Reaktionszeiten miteinander vergleicht. Dies kann als eindeutiges Indiz dafür gewertet werden, dass die Spontaneität, mit der die Selbsteinschätzung vorgenommen wird, mit dem Alter abnimmt.

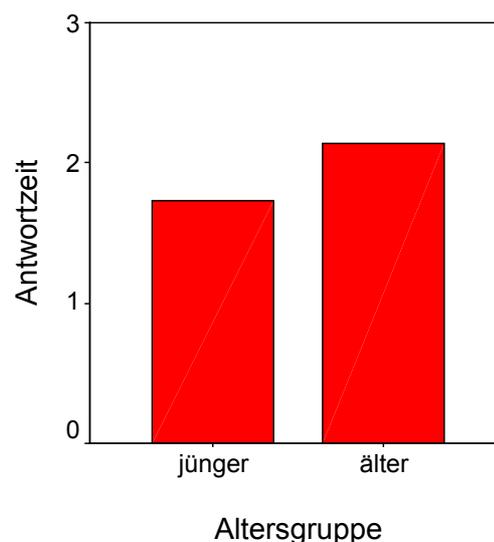


Bild 9.4: Die nach Altersgruppenzugehörigkeit unterschiedenen mittleren Antwortzeiten

Tabelle 9.32: Tests der Zwischensubjekteffekte der Variable Alter

DS					
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Intercept	150717,454	1	150717,454	220,177	,000
ALTERSGR	649,288	1	649,288	,949	,336
Fehler	25327,512	37	684,527		
RZ					
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Intercept	2619,796	1	2619,796	1238,535	,000
ALTERSGR	2,234	1	2,234	1,056	,311
Fehler	78,264	37	2,115		
AZ					
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Intercept	1307,265	1	1307,265	636,397	,000
ALTERSGR	14,430	1	14,430	7,025	,012
Fehler	76,004	37	2,054		
Note					
Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Intercept	2933,761	1	2933,761	626,488	,000
ALTERSGR	3,537	1	3,537	,755	,390
Fehler	173,266	37	4,683		

Die weiter oben geäußerte Vermutung, dass geschlechtsspezifische Unterschiede in den Messwerten von eher geringer Bedeutung sind, bestätigt sich auch dann, wenn für sämtliche abhängige Variablen die entsprechenden Zwischensubjekteffekttests durchgeführt werden. So konnte weder ein Interaktionseffekt zwischen dem gruppenbildenden Faktor Geschlecht und einer der beiden Messwiederholungsfaktoren noch ein signifikanter Haupteffekt der dichotomen Variablen aufgedeckt werden.

9.6 Versuchsdauer

Die Versuchsdauer setzt sich zum einen aus der Zeit zusammen, die für die Durchführung des Seh- und Hörtest erforderlich ist. Hierfür kann jeweils eine Zeitdauer von etwa 5 Minuten veranschlagt werden. Wenn man jedoch berücksichtigt, dass die beiden Tests in unterschiedlichen Räumen stattfanden und sich alle Probanden sowohl für ihr Testergebnis als auch für die Testprozedur interessierten, so ergibt sich eine ungefähre Testdauer von 20 Minuten.

Zum zweiten ergibt sich für die Durchführung der eigentlichen wahrnehmungspsychologischen Untersuchung eine bestimmte Versuchsdauer. Diese lässt sich wiederum in drei Phasen unterteilen. Für die Phase der Versuchseinweisung, die gleichzeitig auch die Überprüfung des korrekten Sitzes und die Justierung des HMDs mit einschließt, kann eine Zeitspanne von ca. 12 Minuten angenommen werden. Für den Vor- und Hauptversuch sind die mittleren Zeitspannen in Tabelle 9.33 zusammengefasst. Zu berücksichtigen ist hierbei, dass der Hauptversuch in drei Blöcke aufgeteilt wurde, und dass zwischen diesen Blöcken ebenso wie zwischen dem Vor- und Hauptversuch eine Erholungs- bzw. Entspannungsphase eingeschoben wurde, die jeweils fünf Minuten betrug.

Tabelle 9.33: Mittlere Versuchsdauer des Haupt- und Vorversuchs

	Mittelwert
Vorversuch	0:06:42
Pause 1	0:05:00
Hauptversuch	
Block1	0:10:17
Pause 2	0:05:00
Block2	0:10:30
Pause 3	0:05:00
Block3	0:10:41
Gesamtlänge des Wahrnehmungsversuchs	0:53:10

Um den gesamten Zeitaufwand eines Probanden für die Teilnahme an dieser Untersuchung zu bestimmen, ist es zudem erforderlich, die Zeit für die Beantwortung des Fragebogens inklusive des Persönlichkeitstest mit einzubeziehen. Da es sich hierbei um einen Internet-Fragebogen handelt, der von jeder Versuchsperson anonym und von zu Hause aus durchgeführt wurde, kann hierfür nur ein ungefährer Wert angenommen werden. Ausgehend von einer ungefähren Bearbeitungszeit von etwa 40 Minuten ergibt sich für die gesamte Untersuchung rechnerisch ein mittlerer Zeitaufwand von etwas mehr als 2 Stunden (2:05:10).

Um zu klären, inwieweit bei dem Hauptversuch Ermüdungserscheinungen oder Lerneffekte auftreten, wurden die erfassten Messdaten auf ihren Zeitverlauf hin untersucht.

Aus statistischer Sicht eignet sich für diese Fragestellung die Durchführung einer ein-faktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung.

In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass die Versuchspersonen während jeder Messreihe zur Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle eine mentale Tätigkeit ausüben, die mit einem Verbrauch an Ressourcen verbunden ist. Die Beanspruchung ergibt sich hierbei aus dem Grad der Ausschöpfung der individuellen Ressourcen. Bei einem zu erbringenden Geschwindigkeitsvergleich zwischen zwei sequenziell dargebotenen Fahrzeugen sind neben dem Sinnessystem vor allem das Gedächtnis sowie Integrationsprozesse des Zentralnervensystems beteiligt, deren Zusammenspiel es dem Menschen erst ermöglicht, die auf den psychischen Grundfähigkeiten basierenden höheren geistigen Leistungen zu erbringen. An der mentalen Tätigkeit sind ferner Teilbereiche des neuro-muskulären Systems beteiligt, die der Informationsaufnahme oder –weitergabe dienen. Hierzu zählen z.B. Kopf- oder Augenbewegungen (zur zielgerichteten Informationsaufnahme) oder Handlungen wie das Betätigen eines Tasters. Darüber hinaus ist auch der Stütz- und Halteapparat des Organismus an der mentalen Tätigkeit beteiligt, wobei beim gegebenen Versuchsaufbau zu berücksichtigen ist, dass die Versuchspersonen über längere Zeit ein HMD trägt. Werden das Herz-Kreislauf-System und die Teilbereiche des neuro-muskulären System außer Betracht gelassen, die ohne zwingende Notwendigkeit mitaktiviert werden, so sind für mentale Tätigkeiten noch die gegebenen physikalischen und sozialen Umgebungsbedingungen von Bedeutung.

Die Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse mit Messwiederholung (ALM) lassen sich getrennt für jede abhängige Variable folgendermaßen zusammenfassen:

Bezogen auf die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung und die Länge der mittleren Reaktionszeiten lassen sich keine Ermüdungserscheinungen oder Lerneffekte nachweisen. Wie den Tabellen 9.34 und 9.35 zu entnehmen ist, übt der Faktor Zeit (Versuchsdauer) keinen signifikanten Einfluss auf die beiden abhängigen Variablen aus. Ein paarweiser Vergleich (mit Bonferroni-Anpassung) ergibt für alle Kombinationsmöglichkeiten den größtmöglichen Wert für die Irrtumswahrscheinlichkeit bei Ablehnung der Nullhypothese, die davon ausgeht, dass die Mittelwertsunterschiede zwischen den Stichproben auf zufälligen Werteschwankungen beruhen. Die zu den einzelnen Messreihen gehörenden Stichprobenmittelwerte der beiden abhängigen Variablen Diskriminierungsschwelle und mittlere Reaktionszeit sind in Bild 9.5 in Säulenform dargestellt.

Tabelle 9.34: Prüfergebnis für den Faktor Versuchsdauer (ALM, Diskriminierungsschwelle)

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Signifikanz
ZEIT Hotelling-Spur	,103	,479	8,000	37,000	,863

Tabelle 9.35: Prüfergebnis für den Faktor Versuchsdauer (ALM, Reaktionszeit)

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Signifikanz
ZEIT Hotelling-Spur	,167	,774	8,000	37,000	,628

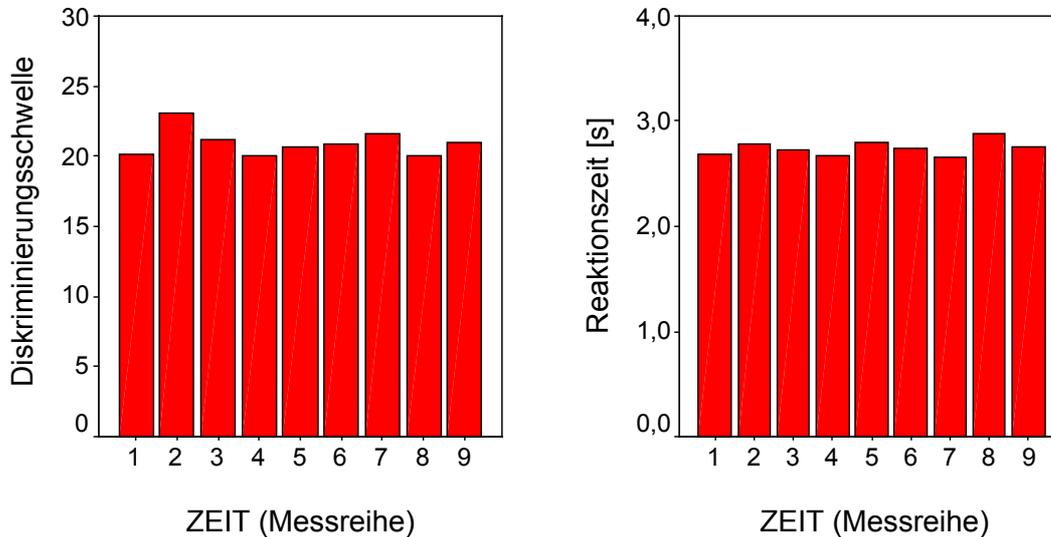


Bild 9.5: Die auf die Messreihen (Versuchsdauer) bezogenen Stichprobenmittelwerte der beiden abhängigen Variablen Diskriminierungsschwelle und mittlere Reaktionszeit

Erweitert man die Betrachtung der Auswirkungen der Versuchsdauer auf die abhängigen Variablen Antwortzeit und Note, so bestätigen die durchgeführten Varianzanalysen einen signifikanten Einfluss der Faktorvariable Zeit (Messzeitpunkte). Die zugehörigen Werte sind den Tabellen 9.36 und 9.37 zu entnehmen. Die zeitlichen Veränderungen der Stichprobenmittelwerte, die für die beiden abhängigen Variablen in Bild 9.6 aufgetragen sind, zeigen über die neun Messreihen, dass die mittleren Antwortzeiten über die gesamte Versuchsdauer gesehen kürzer werden, wohingegen die mittleren Notenwerte über die Messreihen hinweg ansteigen. Der Notenanstieg lässt auf ein sinkendes Vertrauen in die persönliche Diskriminierungsleistung schließen. Bei den zahlreichen Paarvergleichen, die bei den 9 Faktorstufen durchgeführt werden können, sind insbesondere die Stichprobenkombinationen mit der ersten und letzten Messreihe von Interesse. Tabelle 9.38 und 9.39 zeigen für die entsprechenden Stufenkombinationen die Ergebnisse aus den Mittelwerttests der gepaarten Stichproben.

Tabelle 9.36: Prüfergebnis für den Faktor Versuchsdauer (ALM, Antwortzeit)

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Signifikanz
ZEIT Hotelling-Spur	,771	3,565	8,000	37,000	,004

Tabelle 9.37: Prüfergebnis für den Faktor Versuchsdauer (ALM, Note)

Effekt	Wert	F	Hypothese df	Fehler df	Signifikanz
ZEIT Hotelling-Spur	,605	2,799	8,000	37,000	,016

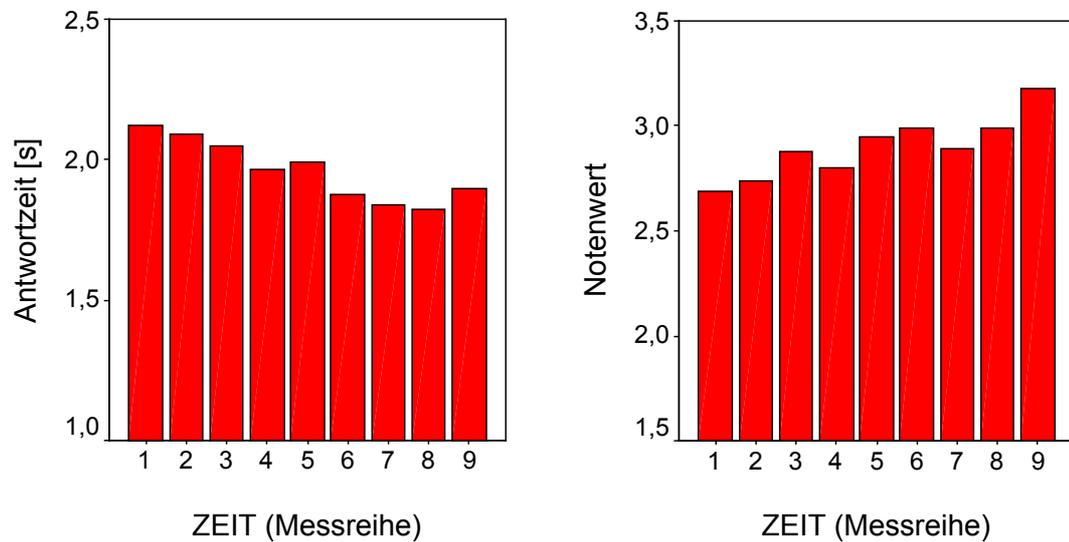


Bild 9.6: Die auf die Messreihen (Versuchsdauer) bezogenen Stichprobenmittelwerte der beiden abhängigen Variablen mittlere Antwortzeit und mittlerer Notenwert

Tabelle 9.38: Paarweise Vergleiche für die Faktorstufe 1 der Variablen Versuchsdauer (Antwortzeit)

(I) ZEIT	(J) ZEIT	Statistik				
		Mittlere Differenz (I-J)	Standardf.	Signifikanz ^a	95% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					UG	OG
1	2	,029	,051	1,000	-,144	,203
	3	,074	,057	1,000	-,120	,268
	4	,156	,060	,457	-,049	,361
	5	,129	,061	1,000	-,078	,336
	6	,243	,065	,020	,020	,465
	7	,280	,065	,003	,059	,500
	8	,297	,063	,001	,083	,511
	9	,223	,068	,075	-,010	,457

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Tabelle 9.39: Paarweise Vergleiche für die Faktorstufe 9 der Variablen Versuchsdauer (Note)

(I) ZEIT	(J) ZEIT	Mittlere Differenz (I-J)	Standardf.	Signifikanz ^a	95% Konfidenzintervall für die Differenz ^a	
					UG	OG
9	1	,485	,102	,001	,136	,835
	2	,435	,103	,004	,084	,786
	3	,300	,078	,013	,035	,566
	4	,377	,089	,004	,073	,682
	5	,232	,067	,045	,003	,461
	6	,188	,089	1,000	-,118	,493
	7	,281	,076	,020	,024	,539
	8	,185	,077	,730	-,077	,448

a. Anpassung für Mehrfachvergleiche: Bonferroni.

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich aus den Unterschieden, die zwischen den zeitlich versetzten Stichproben über die gesamte Dauer des Hauptversuchs entstehen, keine eindeutigen Anzeichen für Ermüdungserscheinungen oder Lerneffekte ableiten lassen.

Wird in Hinblick auf mögliche Lerneffekte ein Vergleich zwischen dem Vor- und Hauptversuch mit in die Betrachtungen einbezogen, so ist dieser nur zwischen denjenigen (abhängigen) Stichproben von Bedeutung, deren Messwerte bzw. Kenngrößen bei vergleichbaren Versuchsbedingungen erfasst wurden. Konkret ergibt sich daraus, dass lediglich die beiden bei *akustischer* und *visueller* Darbietung durchgeführten Messreihen aus dem Hauptversuch von Interesse sind, die auf dem Geschwindigkeitsniveau der Stufe 2 (*60 km/h*) durchgeführt wurden. Ein mit dem t-Test durchgeführter Vergleich dieser Stichproben mit ihren Pendanten aus dem Vorversuch liefert den Nachweis für signifikante Mittelwertsänderungen. Auffällig ist hierbei jedoch, dass es zwischen den mittleren Reaktionszeiten bei *akustischer* Darbietung im Gegensatz zu allen anderen möglichen Paarungen kein signifikanter Mittelwertsunterschied vorliegt. Die Irrtumswahrscheinlichkeit für die Ablehnung der Nullhypothese fällt überdies mit einem Wert von über 0,7 vergleichsweise hoch aus. Diese Auffälligkeit deckt sich insofern mit den Ergebnissen aus dem Hauptversuch, als sich für diese Kombination aus anhängiger Variable und Darbietungsform ebenfalls keine signifikanten Werteveränderungen ergeben, wenn das Geschwindigkeitsniveau variiert wird.

Tabelle 9.40: t-Test bei gepaarten Stichproben (Vergleich Vor- und Hauptversuch)

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		MW	Stand.abw.	Standardf. des Mittelwertes	95% Konfidenzi. der Differenz				
					UG	OG			
Paaren 1	DS1 - DS4 (visuell)	9,59	9,79	1,46	6,65	12,53	6,569	44	,000
Paaren 2	DS2 - DS6 (akustisch)	11,35	12,50	1,86	7,59	15,10	6,089	44	,000
Paaren 3	RZ1 - RZ4 (visuell)	,26	,55	,08	,09	,42	3,134	44	,003
Paaren 4	RZ2 - RZ6 (akustisch)	-,04	,84	,12	-,29	,21	-,322	44	,749
Paaren 5	AZ1 - AZ4 (visuell)	,36	,61	,09	,17	,54	3,897	44	,000
Paaren 6	AZ2 - AZ6 (akustisch)	,41	,43	,06	,28	,53	6,406	44	,000
Paaren 7	NOTE1 - NOTE4 (visuell)	-,35	,64	,10	-,54	-,16	-3,696	44	,001
Paaren 8	NOTE2 - NOTE6 (akustisch)	-,33	,62	,09	-,52	-,14	-3,537	44	,001

Bei den signifikanten Mittelwertsunterschieden zwischen den Stichproben aus dem Vor- und Hauptversuch fällt sowohl in Bezug auf die *visuelle* als auch auf die *akustische* Darbietungsform auf, dass die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung deutlich ansteigt. Die Diskriminierungsschwelle sinkt für beide Darbietungsformen im Mittel um etwa 10 Prozentpunkte auf einen Wert von 18,68 bzw. 25,15 %. Inwieweit sich dieser deutliche Anstieg des Leistungsniveaus allein auf einen Lerneffekt zurückführen lässt, oder ob (entgegen den theoretischen Grundüberlegungen zu diesem Messverfahren) die veränderte (dreifache) Schrittweite in der Messprozedur des Vorversuchs hierbei einen Einfluss ausübt, kann an dieser Stelle nicht beantwortet werden, da hierzu eine separate Untersuchung nötig wäre.

Tabelle 9.41: Paarweise Vergleiche bezüglich der mittleren Diskriminierungsleistung beim Vor- und Hauptversuch

		Mittelwert	N	Stand.abw.	Standardf. des Mittelwertes
Paaren 1	DS1	28,27	45	9,63	1,44
	DS4	18,68	45	10,35	1,54
Paaren 2	DS2	36,50	45	13,61	2,03
	DS6	25,15	45	13,02	1,94

Bezüglich der Mittelwertveränderung der Variablen Antwortzeit und Note ist anzumerken, dass diese sich für beide Darbietungsformen gleichermaßen dem Trend anschließen, der bereits im Zusammenhang mit der Versuchsdauer festgestellt wurde. Die Antwortzeiten verkürzen sich und die Notenwerte steigen an. Die Veränderungen, die sich zwischen dem Vor- und Hauptversuch (Tabelle 9.40) ergeben, sind im

Vergleich zu denjenigen, die sich über die Gesamtdauer des Hauptversuchs einstellen (Tabelle 9.38 und 9.39), beträchtlich.

9.7 Fahrpraxis

Die Versuchspersonen wurden gebeten, detaillierte Angaben bezüglich ihrer Fahrpraxis zu machen. Neben Fragen zum Führerscheinbesitz und der durchschnittlich in den letzten beiden Jahren erbrachten Fahrleistung wurden die Probanden auch danach gefragt, ob ihnen täglich ein Kraftfahrzeug zur Verfügung steht, an wie vielen Tagen pro Woche sie am Straßenverkehr teilnehmen und welches Verkehrsmittel sie dabei benutzen. Bild 9.7 zeigt, anhand eines Säulendiagramms, wie viel Prozent der Befragten einen Führerschein einer bestimmten Klasse besitzen. Neben den Klassenbezeichnungen A, B, C und M sind zum einfacheren Verständnis der Säulenzuordnung auch die zugehörigen Kraftfahrzeugtypen in der Grafik mit aufgeführt. Die genauen numerischen Werte für die Häufigkeiten sind Tabelle 9.42 zu entnehmen, in der auch weitere auf die Führerscheinklassen bezogene statistische Kennwerte aufgeführt sind.

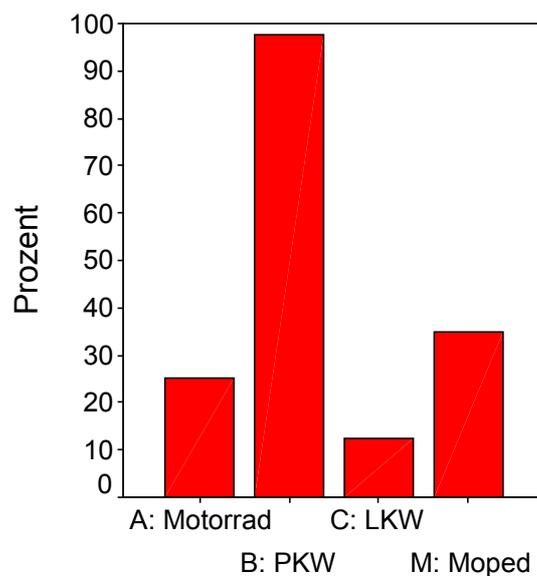


Bild 9.7: Die auf die Führerscheinklassen bezogenen Häufigkeiten

Tabelle 9.42: Deskriptive Statistiken für die Jahre des Führerscheinbesitzes

	Häufigkeit		Min	Max	Mittelwert	Perzentile			Stand.abw.
	N	%				50			
Klasse A:	10	25,0	2	16	8,90	5,75	8,50	12,50	4,25
Klasse B:	39	97,5	4	19	9,38	7,00	7,00	12,00	4,16
Klasse C	5	12,5	2	7	4,00	2,50	4,00	5,50	1,87
Klasse M	14	35,0	4	19	11,00	6,75	11,00	14,50	4,87

Die in den letzten beiden Jahren durchschnittlich mit den verschiedenen Fahrzeugtypen zurückgelegten Entfernungen der Probanden gehen aus Tabelle 9.43 hervor. Neben dem Mittelwert der jeweiligen Fahrleistung sind noch weitere deskriptive Statistiken, wie Häufigkeit, Minimalwert, Maximalwert, Perzentile und Standardabweichung aufgeführt.

Tabelle 9.43: Deskriptive Statistiken für die jährliche Fahrleistung (km/Jahr)

	Häufigkeit		Min	Max	Mittelwert	Perzentile			Stand.abw.
	N	%				50			
Motorrad	10	25,0	0	10000	2250,00	0	250	5250	3521,76
Pkw:	39	97,5	200	45000	14430,77	5000	15000	20000	11019,44
Lkw	5	12,5	100	5000	1500,00	250	1000	3000	1994,99
Moped	14	35,0	0	5000	414,29	0	0	125	1327,15
Fahrrad	40	100,0	0	5000	518,38	50,0	175,0	500,0	944,05

Die Frage „*Steht Ihnen ein Kfz zur täglichen Verfügung?*“ beantwortete, wie Bild 9.8 zeigt, die überwiegende Mehrheit (72,5%) der Befragten mit „Ja“. An wie vielen Tagen pro Woche die Versuchspersonen am Straßenverkehr teilnehmen und wie häufig sie dabei welches Verkehrsmittel benutzen, geht aus Tabelle 9.44 hervor. Der Übersichtlichkeit halber wurden in dieser Tabelle die beiden häufigsten Antworten für jede einzelne Kategorie farblich hervorgehoben.

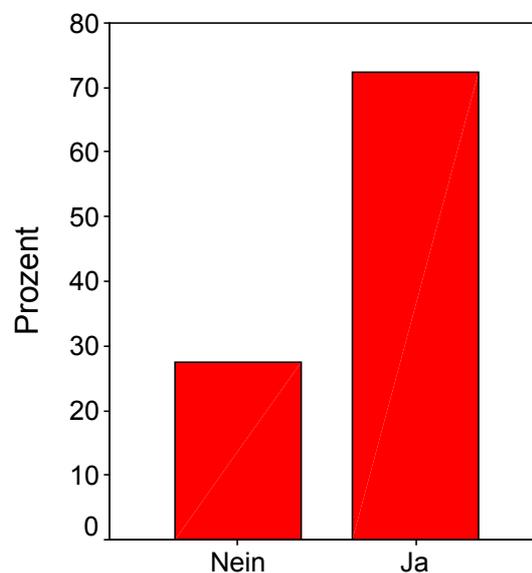


Bild 9.8: Tägliche Verfügbarkeit eines Kfz

Tabelle 9.44: Häufigkeitstabelle für die auf eine Woche bezogene Teilnahme am Straßenverkehr, Lenken eines Kfz, Mitfahren in einem Kfz, Benutzen eines öffentlichen Verkehrsmittels und Fahren mit einem Fahrrad

Tage	Straßenverkehr		Kfz		Beifahrer		ÖPNV		Fahrrad	
	N	%	N	%	N	%	N	%	N	%
0	1	2,5	3	7,5	8	20,0	8	20,0	17	42,5
1	1	2,5	9	22,5	12	30,0	2	5,0	12	30,0
2	1	2,5	2	5,0	10	25,0	2	5,0	6	15,0
3	0	0,0	6	15,0	8	20,0	2	5,0	3	7,5
4	1	2,5	4	10,0	0	0,0	3	7,5	1	2,5
5	7	17,5	4	10,0	1	2,5	12	30,0	0	0,0
6	8	20,0	4	10,0	0	0,0	5	12,5	0	0,0
7	21	52,5	8	20,0	1	2,5	6	15,0	1	2,5
Ges.	40	100,0	40	100,0	40	100,0	40	100,0	40	100,0

Um zu prüfen, inwieweit die im Hauptversuch erbrachte Wahrnehmungsleistung von der Fahrpraxis des Probanden beeinflusst wird, wurde zunächst die Hypothese aufgestellt, dass Personen, die häufig aktiv am Straßenverkehr teilnehmen und weite Strecken zurücklegen darin trainiert sind, Fahrzeuggeschwindigkeiten einzuschätzen. Gemäß dieser Hypothese müsste die im Hauptversuch gemessene Güte der visuellen Geschwindigkeitsdiskriminierung bei Probanden, die oft und über längere Zeit aktiv am Straßenverkehr teilnehmen, höher ausfallen als bei Versuchsteilnehmern mit geringer Fahrpraxis. Aufgrund der Tatsache, dass Pkw-Insassen akustisch von der Umwelt abgeschirmt sind, beschränkt sich die Hypothese jedoch nur auf die visuelle und nicht auf die auditive Geschwindigkeitswahrnehmung.

Als Kenngröße für die aktive Teilnahme am Straßenverkehr wurden zunächst die von den Probanden angegebenen Fahrleistungen in einer jährlichen Gesamtfahrleistung zusammengefasst. Hierbei wurden nicht nur die mit den Kraftfahrzeugen, sondern auch mit dem Fahrrad zurückgelegte Entfernungen aufsummiert, da auch das Fahrrad fahren eine aktive Teilnahme am Straßenverkehr darstellt. Um nicht nur die zurückgelegte Wegstrecke, sondern auch die Häufigkeit der aktiven Verkehrsteilnahme bei der Kenngröße zu berücksichtigen, wurde ein entsprechender Gewichtungsfaktor eingeführt. Wie Bild 9.9 verdeutlicht, führt dieser u.a. dazu, dass eine jährliche Fahrleistung, die durchschnittlich an fünf Tagen pro Woche erbracht wird, doppelt so stark in den Kennwert mit einfließt wie eine jährliche Fahrleistung, bei der die gleiche Wegstrecke im Durchschnitt nur an einem Tag pro Woche zurückgelegt wird. Der Gewichtungsfaktor für die tägliche Fahrpraxis berechnet sich aus der Formel:

$$\text{Gewichtungsfaktor} = 0,4 + \frac{\text{Tagesanzahl}}{7}$$

Anschließend wurde die als gewichtete jährliche Gesamtfahrleistung bezeichnete Kenngröße in eine vierstufige ordinalskalierte Variable überführt, bei der sich die Klassengrenzen an den Werten für das erste, zweite und dritte Perzentil ausrichten (Tabelle

9.45). In der anschließend durchgeführten Varianzanalyse, bei der die gewichtete jährliche Gesamtfahrleistung als Gruppierungsvariable fungierte, zeigte sich, dass kein signifikanter Zwischensubjekteffekt vorliegt (Tabelle 9.47). Ein Einfluss der Fahrpraxis auf die im Hauptversuch erbrachte visuelle Diskriminierungsleistung konnte folglich nicht nachgewiesen werden, obwohl, wie Bild 9.10 zeigt, die über die verschiedenen Geschwindigkeitsstufen gemittelten Schwellenwerte tendenziell bestätigen, dass die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung mit steigender Fahrpraxis zunimmt.

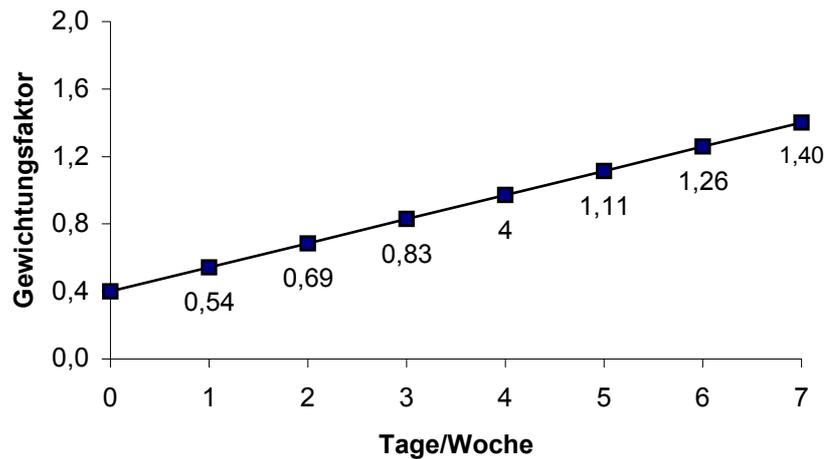


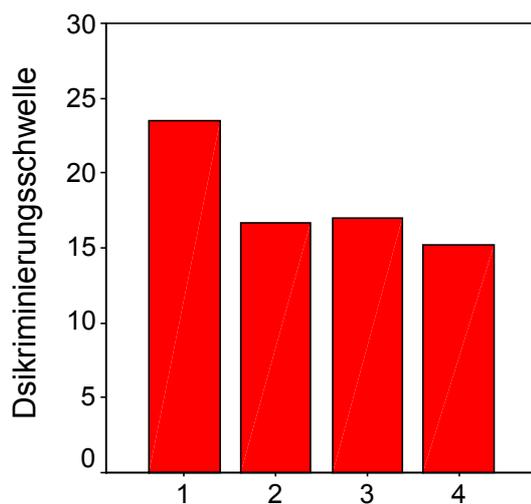
Bild 9.9: Gewichtungsfaktor tägliche Fahrpraxis

Tabelle 9.45: Deskriptive Statistiken für die gewichtete jährliche Gesamtfahrleistung

		N	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stand.abw
gewichtete Gesamtfahrleistung		40	120,57	70120,00	16981,74	15877,45
Perzentile						
5	10	25	50	75	90	95
570,64	629,43	3500,71	13884,29	24857,14	39186,00	56095,29

Tabelle 9.46: Deskriptive Statistiken für die nach den vier Kategorien der gewichteten jährlichen Fahrleistung unterschiedenen Mittelwerte der visuellen Diskriminierungsschwellen

	gewichtete jährliche Gesamtfahrleistung	Mittelwert	Stand.abw.	N
DS1	1,00	22,71	10,95	10
	2,00	15,19	11,31	10
	3,00	17,47	8,03	10
	4,00	15,74	6,31	10
	Gesamt	17,78	9,50	40
DS4	1,00	24,95	14,14	10
	2,00	17,73	11,20	10
	3,00	18,91	5,45	10
	4,00	14,11	7,96	10
	Gesamt	18,92	10,59	40
DS7	1,00	22,73	12,07	10
	2,00	17,27	6,28	10
	3,00	14,72	7,97	10
	4,00	15,86	7,26	10
	Gesamt	17,65	8,90	40



gewicht. jährl. Gesamtfahrleistung

Bild 9.10: Die nach den vier Kategorien der gewichteten jährlichen Gesamtfahrleistung unterschiedenen Mittelwerte der visuellen Diskriminierungsschwellen

Tabelle 9.47: Test auf Zwischensubjekteffekt der Variable gewichtete jährliche Gesamtfahrleistung

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Intercept	13126,59	1	13126,59	203,187	,000
GJGFL	400,06	3	133,35	2,064	,122
Fehler	2325,73	36	64,60		

Alternativ zur Bestimmung der gewichteten jährlichen Gesamtfahrleistung, bei der es sich aufgrund einer fehlenden Definition gewissermaßen um eine willkürliche Kenngröße handelt, wurde eine Faktorenanalyse durchgeführt, mit dem Ziel, die zur Fahrpraxis erhobenen Daten auf eine bzw. einige wenige Hintergrundvariablen zurückzuführen. Zur Faktorextraktion wurde das Verfahren der Hauptkomponentenanalyse eingesetzt.

Zunächst wurden die mittels des Fragebogens erfassten Variablen auf ihre Eignung hin überprüft. Hierbei wurde anhand der Korrelations- bzw. Anti-Image-Korrelationsmatrix sukzessive entschieden, welche Variablen von der Faktoranalyse auszuschließen sind, da sie nicht dem Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium genügen. Gemäß diesem allgemein anerkannten Ausschlusskriterium gelten Variablen mit einem MSA-Wert von unter 0,5 als "untragbar" /Back00/Bros02/. Das Maß für die Angemessenheit (MSA) der Stichprobe berechnet sich nach folgender Formel:

$$MSA_i = \frac{\sum_j r_{ij}^2}{\sum_j r_{ij}^2 + \sum_j a_{ij}^2}$$

Hierbei entspricht r_{ij} dem einfachen und a_{ij} dem partiellen Korrelationskoeffizienten zwischen den beiden Variablen i und j . Bei der in Tabelle 9.51 aufgeführten Anti-Image-Korrelationsmatrix sind die MSA-Werte in der Hauptdiagonalen enthalten.

Tabelle 9.48: Bewertung der Ergebnisse des KMO-Maßes nach Kaiser

Wert	Beurteilung
$MSA \geq 0,9$	erstaunlich
$MSA \geq 0,8$	verdienstvoll
$MSA \geq 0,7$	ziemlich gut
$MSA \geq 0,6$	mittelmäßig
$MSA \geq 0,5$	kläglich
$MSA \leq 0,5$	untragbar

Für die Bildung des faktoranalytischen Modells wurde auf die Fragen zur Fahrleistung und die Fragen zur durchschnittlichen Nutzung der verschiedenen Verkehrsmittel zurückgegriffen. Gemäß des Kaiser-Meyer-Olkin-Kriteriums mussten die folgenden drei Variablen aus dem Faktorenmodell ausgeschlossen werden:

- *Jährliche Fahrleistung Motorrad*
- *Jährliche Fahrleistung Lkw*
- *Tage pro Woche Fahrrad fahren*

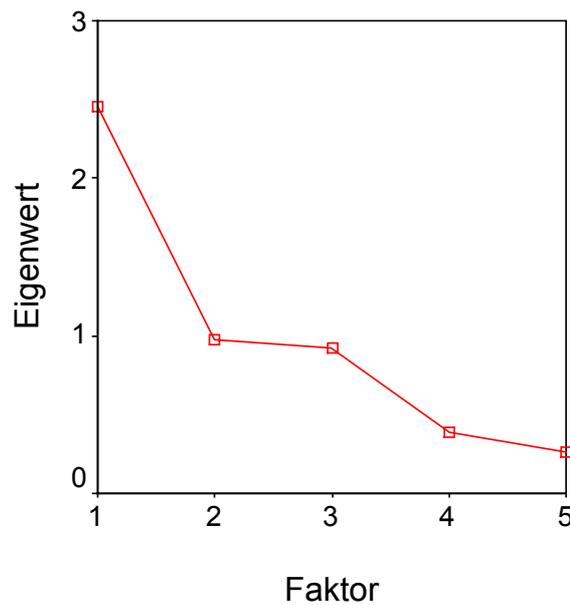


Bild 9.11: Screeplot (Fahrpraxis)

Aus der Faktorenextraktion der restlichen fünf Variablen ergibt sich gemäß der KG-Regel, die besagt, dass der Eigenwert einer Hintergrundvariablen nicht kleiner als eins sein darf, ein einziger Hintergrundfaktor. Werden jedoch zur Auswahl der optimalen Faktorenanzahl der Screeplot (Bild 9.11) und die Kommunalitäten, die sich bei nur einer Faktorzahl ergeben, herangezogen, so besteht auch die Möglichkeit, die Zahl der Faktoren auf zwei zu erhöhen, damit sich nicht nur für drei, sondern für vier Variablen hohe Kommunalitäten ergeben (Tabelle 9.53). Der prozentuale Anteil der erklärten Gesamtvarianz erhöht sich, wie Tabelle 9.52 zeigt, hierbei von 49 auf 68,6%. Aus den Unterschieden, die sich durch die Faktorenzahlerhöhung für die Kommunalitäten ergeben, lässt sich bereits entnehmen, dass der zweite Faktor vor allem mit der Variablen *jährliche Fahrleistung Fahrrad* in Beziehung steht. Dies zeigt sich insbesondere an dem zugehörigen Wert für die Faktorladung. Wie der in Tabelle 9.54 dargestellten Komponentenmatrix zu entnehmen ist, fällt dieser mit 0,908 sehr hoch aus. Ähnlich eindeutige Beziehungen ergeben sich auch für den ersten Faktor zu den Variablen

- *jährliche Fahrleistung PKW (Pkw km/J)*,
- *Tage pro Woche Kraftfahrzeugführer (Fahrer T/W)*,
- *Tage pro Woche Fahrgast im ÖPNV (ÖPNV T/W)*.

Aus dem Komponentendiagramm für die beiden Faktoren ergibt sich, dass diese nahezu eindeutige Faktorenzuzuordnung nicht für die Variable *jährliche Fahrleistung Moped (Moped km/J)* existiert. Die entsprechende Variablengleichung:

$$\text{jährliche Fahrleistung Moped} = 0,356 \cdot \text{Faktor1} + 0,372 \cdot \text{Faktor2}$$

zeigt, dass die Faktorkoeffizienten nahezu paritätisch besetzt sind und sich die Variable zu gleichen Teilen aus beiden Faktoren erklärt. Eine vollkommene Erklärung bzw. Herleitung einer Variablen durch die Faktoren ist im Allgemeinen nicht zu erwarten. Mit einem Wert von 0,265 für die betreffende Kommunalität fällt der erklärende Anteil jedoch gering aus. Für die übrigen Variablen ergeben sich vergleichsweise hohe Werte.

Werden die beiden Faktoren mit erklärenden Attributen versehen, so ergeben sich u.a. folgende plakative Faktorbezeichnungen:

- Faktor 1: *Notorischer-Pkw-Vielfahr-Anti-ÖPNF-Faktor*
- Faktor 2: *Fahrrad-Vielfahr-Faktor*

Solche plakativen Bezeichnungen vereinfachen naturgemäß die Abhängigkeiten zwischen den Faktoren und den beobachteten Variablen sowie unter den Variablen. Ein genaues Bild darüber, inwieweit die einzelnen Variablen in Beziehung zueinander stehen, ergibt sich aus den in Tabelle 9.49 zusammengefassten Korrelationskoeffizienten und den zugehörigen Signifikanzwerten. An den in Tabelle 9.51 farblich hervorgehobenen MSA-Werten, lässt sich ablesen, dass die für das Faktorenmodell ausgewählten Variablen alle dem Kaiser-Meyer-Olkin-Kriterium genügen. Das KMO-Maß, das sich im Unterschied zum MSA-Wert auf alle Variablen bezieht, liegt über 0,7 (Tabelle 9.50), woraus sich entsprechend der oben aufgeführten Bewertungsskala ablesen lässt, dass die Zusammenstellung der Variablen für ein faktoranalytisches Modell "ziemlich gut" geeignet ist.

Tabelle 9.49: Korrelationsmatrix (Fahrpraxis)

		Pkw km/J	Moped km/J	Fahrrad km/J	Fahrer T/W	ÖPNV T/W
Korrelation	Pkw km/J	1,000	,142	-,125	,705	-,606
	Moped km/J	,142	1,000	-,037	,206	-,236
	Fahrrad km/J	-,125	-,037	1,000	-,174	,091
	Fahrer T/W	,705	,206	-,174	1,000	-,692
	ÖPNV T/W	-,606	-,236	,091	-,692	1,000
Signifikanz (1-seitig)	Pkw km/J		,190	,221	,000	,000
	Moped km/J	,190		,409	,101	,072
	Fahrrad km/J	,221	,409		,142	,288
	Fahrer T/W	,000	,101	,142		,000
	ÖPNV T/W	,000	,072	,288	,000	

Tabelle 9.50: KMO- und Bartlett-Test

Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin.		,735
Bartlett-Test auf Sphärizität	Ungefähres Chi-Quadrat df	54,244 10
	Signifikanz nach Bartlett	,000

Tabelle 9.51: Anti-Image-Korrelationsmatrix (Fahrpraxis)

		Pkw km/J	Moped km/J	Fahrrad km/J	Fahrer T/W	ÖPNV T/W
Anti-Image- Korrelation	Pkw km/J	,751 ^a	,036	,014	-,492	,234
	Moped km/J	,036	,828 ^a	,008	-,069	,137
	Fahrrad km/J	,014	,008	,753 ^a	,127	,043
	Fahrer T/W	-,492	-,069	,127	,690 ^a	,455
	ÖPNV T/W	,234	,137	,043	,455	,763 ^a

a. Maß der Stichprobeneignung

Tabelle 9.52: Erklärte Gesamtvarianz (Fahrpraxis)

Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Summen von quadrierten Faktorladungen für Extraktion		
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	2,452	49,04	49,04	2,452	49,04	49,04
2	,975	19,51	68,55	,975	19,51	68,55
3	,921	18,41	86,96			
4	,386	7,71	94,67			
5	,266	5,33	100,00			

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Tabelle 9.53: Vergleich der sich bei der Extraktion von einem oder zwei Faktoren ergebenden Kommunalitäten (Fahrpraxis)

	Extraktion 1 Faktor		Extraktion 2 Faktoren	
	Anfänglich	Extraktion 1 Faktor	Anfänglich	Extraktion 2 Faktoren
Pkw km/J	1,000	,722	1,000	,722
Moped km/J	1,000	,127	1,000	,265
Fahrrad km/J	1,000	,059	1,000	,883
Fahrer T/W	1,000	,810	1,000	,810
ÖPNV T/W	1,000	,733	1,000	,747

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Tabelle 9.54: Komponentenmatrix (Fahrpraxis)

	Komponente	
	1	2
Pkw km/J	,850	,003
Moped km/J	,356	,372
Fahrrad km/J	-,244	,908
Fahrer T/W	,900	-,013
ÖPNV T/W	-,856	-,115

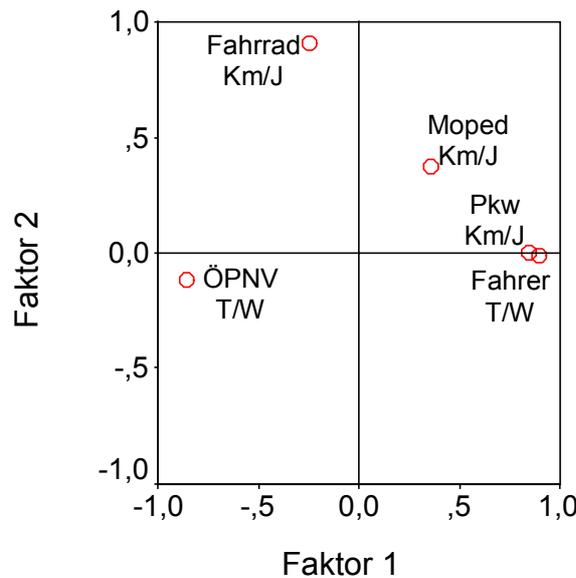


Bild 9.12: Ladungsplot für die beiden Faktoren (Fahrpraxis)

Um zu prüfen, inwieweit die im Hauptversuch erbrachte Wahrnehmungsleistung von dem extrahierten Faktor 1 (*Notorischer-Pkw-Vielfahr-Anti-ÖPNF-Faktor*) beeinflusst wird, wurde analog zur *gewichteten jährlichen Gesamtfahrleistung* der Faktor 1 ordinalskaliert. Bei der anschließenden Varianzanalyse wurde der von dieser Gruppierungsvariable ausgehende Haupteffekt auf Signifikanz geprüft. Die in Tabelle 9.56 und Bild 9.13 zusammengefassten Ergebnisse zeigen, dass kein signifikanter Zwischen-subjekteffekt vorliegt, obwohl die über die verschiedenen Geschwindigkeitsstufen gemittelten Schwellenwerte tendenziell bestätigen, dass die Güte der visuellen Geschwindigkeitsdiskriminierung mit steigender Fahrpraxis zunimmt.

Bei der Deckungsgleichheit der Ergebnisse verwundert es nicht, dass der extrahierte Fahrpraxisfaktor 1 mit der zuvor bestimmten *gewichteten jährlichen Fahrleistung*, wie Tabelle 9.55 belegt, stark korreliert.

Tabelle 9.55: Korrelation zwischen Fahrpraxisfaktor 1 und der gew. jährl. Fahrleistung

		gewichtete jährliche Fahrleistung	Fahrpraxisfaktor 1
gewichtete jährliche Fahrleistung	Korrelation nach Pearson	1	,880**
	Signifikanz (2-seitig)	.	,000
	N	40	40
Fahrpraxisfaktor 1	Korrelation nach Pearson	,880**	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	.
	N	40	40

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

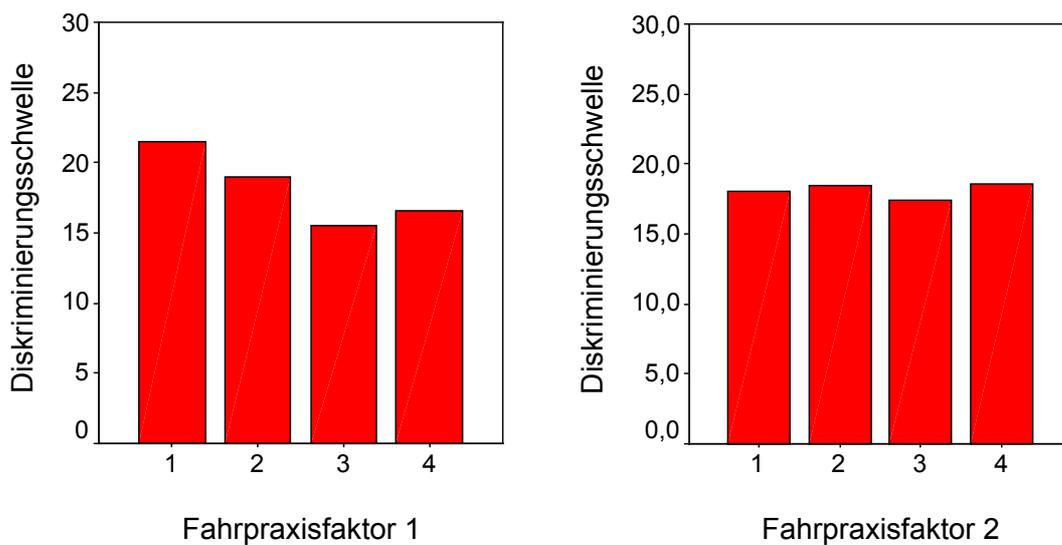


Bild 9.13: Die nach den vier Kategorien der extrahierten Fahrpraxisfaktoren unterschiedenen Mittelwerte der visuellen Diskriminierungsschwellen

Tabelle 9.56: Test auf Zwischensubjekteffekt des extrahierten Fahrpraxisfaktor

Quelle	Quadratsumme vom Typ III	df	Mittel der Quadrate	F	Signifikanz
Intercept	39379,78	1	39379,78	188,031	,000
FAKTOR1	637,80	3	212,60	1,015	,397
Fehler	7539,56	36	209,43		

9.8 Fahrertyp

Die über das Internet abgewickelte Probandenbefragung wurde auch mit dem Ziel durchgeführt, Informationen darüber zu erlangen, wie der einzelne Versuchsteilnehmer seine Fahrweise und seine Fahrfertigkeiten im Vergleich zur Allgemeinheit bzw. zu anderen Verkehrsteilnehmern einschätzt. In der Summe repräsentieren die zu diesem Themengebiet erhobenen Variablen ein Gesamtbild, das aus subjektiver Sicht den eigenen Fahrertyp charakterisiert.

In Tabelle 9.61 sind die verschiedenen konträren Aussagen (*Items*) aufgeführt, anhand derer die Selbsteinschätzung vorzunehmen war. Der Proband musste bei jeder einzelnen Aussage den Grad der Zustimmung bzw. Ablehnung durch Ankreuzen eines der sechs Antwortfelder angeben. Im Unterschied zur tatsächlich durchgeführten Befragung wurden bei dieser Aufstellung die Aussagen farblich hervorgehoben, die bei Zustimmung bzw. Ablehnung zu hohen Variablenwerten führen.

Wird auf der Grundlage dieser Variablenwerte eine Faktorenanalyse durchgeführt, ergibt sich, unter Beibehaltung der im vorherigen Abschnitt erläuterten Vorgehensweise, dass sich eine Variable aufgrund ihres zu niedrigen MSA-Wertes nicht für die Zusammenstellung eines faktoranalytischen Modells eignet. Die Faktorextraktion

zeigt, dass den übrigen neun beobachteten Variablen zwei Faktoren zugrunde gelegt werden können, die zusammen 55,25 % der Gesamtvarianz erklären. Wie Tabelle 9.59 verdeutlicht, wird dieser Prozentsatz auch dann erreicht, wenn keine Rotation der Faktorladungsmatrix nach der Varimax-Methode durchgeführt wird. Am Vergleich der beiden in Bild 9.14 dargestellten Komponentendiagramme ist jedoch zu erkennen, dass sich die als Punkte dargestellten Faktorkoeffizienten der Variablen noch etwas enger um die beiden Achsen scharen, wenn die orthogonale Rotation durchgeführt wird. Die genauen Werte für die Faktorladungen sind in Tabelle 9.60 aufgeführt. Der nach Faktorladung sortierten Reihenfolge und der farblichen Hervorhebung ist zu entnehmen, dass die Variablen, die sich auf das Fahrverhalten beziehen, dem ersten Faktor zuzuordnen sind, wohingegen der zweite Faktor die Variablen auf sich vereint, die die Bewertung der eigenen Fahrfähigkeit widerspiegeln. Für die beiden Fahrertypfaktoren eignen sich daher folgende plakative Faktorbezeichnungen:

- Faktor 1: *Fahrstil-Faktor*
- Faktor 2: *Fahrfertigkeits-Faktor*

Der Vollständigkeit halber sind in den Tabellen 9.57 und 9.58 die Ergebnisse des KMO- und Bartlett-Test und die einzelnen Kommunalitäten aufgeführt.

Wird wiederum unter Beibehaltung der Vorgehensweise untersucht, ob die beiden Faktoren einen Einfluss auf die im Hauptversuch gemessene Diskriminierungsleistung ausüben, so bestätigt sich erneut, dass sich die jeweiligen Randmittel nicht signifikant voneinander unterscheiden. Auf die Ergebnisdarstellung wird an dieser Stelle verzichtet.

Tabelle 9.57: KMO- und Bartlett-Test (Fahrertyp)

Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin.		,664
Bartlett-Test auf Sphärizität	Ungefähres Chi-Quadrat	105,046
	df	36
	Signifikanz nach Bartlett	,000

Tabelle 9.58: Kommunalitäten (Fahrertyp)

	Anfänglich	Extraktion
schnelles und sportl. Fahren	1,000	,507
risikobereites Fahren	1,000	,768
schnelles Erfassen von VS	1,000	,573
gute Reaktion	1,000	,438
sich hervortun in schwierigen VS	1,000	,800
gern in Konkurrenz treten	1,000	,489
Kreuzen und Einbiegen kein Problem	1,000	,580
gute Geschwindigkeitswahrnehmung	1,000	,393
geringer Sicherheitsabstand	1,000	,425

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Tabelle 9.59: Erklärte Gesamtvarianz (Fahrertyp)

Faktor	Phase								
	Anfängliche Eigenwerte			Summen von quadrierten Faktorladungen für Extraktion			Rotierte Summe der quadrierten Ladungen		
	Statistik			Statistik			Statistik		
	Gesamt	% der Varianz	Kumul. %	Gesamt	% der Varianz	Kumul. %	Gesamt	% der Varianz	Kumul. %
1	2,899	32,21	32,21	2,899	32,21	32,21	2,885	32,06	32,06
2	2,074	23,04	55,25	2,074	23,04	55,25	2,088	23,20	55,25
3	,944	10,49	65,75						
4	,794	8,82	74,57						
5	,707	7,85	82,42						
6	,611	6,79	89,21						
7	,478	5,31	94,52						
8	,328	3,64	98,16						
9	,165	1,84	100,00						

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

Tabelle 9.60: Komponentenmatrix (Fahrertyp)

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse	Ohne Rotation		Varimax mit Kaiser-Normalisierung	
	Komponente		Komponente	
	1	2	1	2
sich hervortun in schwierigen VS	,894	-,014	,885	-,130
risikobereites Fahren	,867	-,125	,844	-,236
gern in Konkurrenz treten	,699	,014	,695	-,076
geringer Sicherheitsabstand	,605	,243	,647	,297
Schnelles und sportl. Fahren	,603	,379	,631	,162
Kreuzen und Einbiegen kein Problem	,025	,761	,124	,752
schnelles Erfassen von VS	-,296	,697	-,203	,729
gute Reaktion	-,190	,634	-,106	,653
gute Geschwindigkeitswahrnehmung	,069	,623	,149	,609

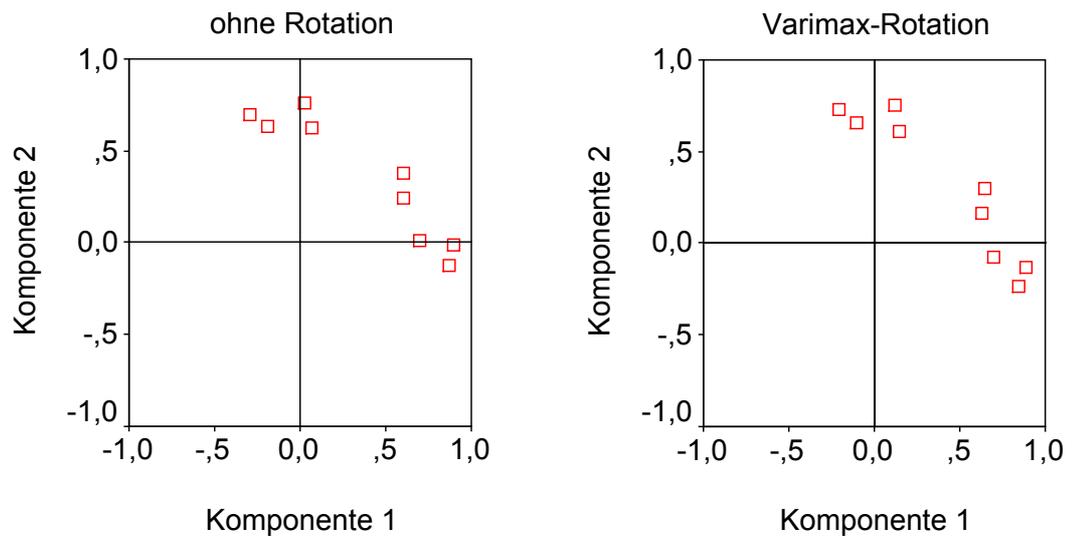


Bild 9.14: Komponentendiagramm vor und nach der Varimax-Rotation (Fahrertyp)

Tabelle 9.61: Fragebogen zur Bestimmung des Fahrertyps

Ich fahre in der Regel sehr gern schnell und sportlich	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich fahre eher ziemlich langsam und zurückhaltend
Ich vermeide prinzipiell jedes Risiko	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Um schneller voranzukommen, nutze ich jede sich bietende Gelegenheit
Komplizierte Verkehrssituationen erfasse ich sofort	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich brauche sehr lange, um komplizierte Verkehrssituationen zu erfassen
Ich reagiere sehr viel schneller als der Durchschnitt	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Meine Reaktion ist viel langsamer als der Durchschnitt
In schwierigen V-Situationen fahre ich besonders vorsichtig, auch wenn andere das für übertrieben halten könnten	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	In schwierigen V-Situationen, z.B. auf kurvigen Landstraßen, zeige ich anderen gern wie so etwas gefahren wird
Es ist ein gutes Gefühl, andere abzuhängen	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Ich trete nie in Wettbewerb mit anderen Verkehrsteilnehmern
Kreuzen und Einbiegen stellt für mich bei vielbefahrenen Straßen kein Problem dar. Es findet sich immer eine passende Lücke	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Kreuzen und Einbiegen empfinde ich bei vielbefahrenen Straßen als sehr unangenehm und stressig. Eine ausreichende Lücke zu finden ist oft sehr schwierig
Bei Autobahnfahrten kommt es oft vor, dass ich abbremsen muss, weil langsame vor mir her fahrende Fahrzeuge (Lkw, Pkw mit Anhänger usw.) nicht direkt überholt werden können, da die Überholspur nicht frei ist	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Wegen langsamen Fahrzeugen muss ich auf der Autobahn niemals abbremsen, da sich immer eine Möglichkeit findet sich rechtzeitig auf die Überholspur einzuordnen
In Vorfahrtsituationen kann ich die Geschwindigkeit von Fahrzeugen sehr schnell und genau einschätzen	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Mich überrascht in Vorfahrtsituationen oft, dass Fahrzeuge doch schneller oder langsamer fahren, als ich das auf den ersten Blick eingeschätzt hatte
Auf Autobahnen und Landstraßen halte ich immer einen großen Sicherheitsabstand ein, da ich mich sonst unsicher fühle	<input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/>	Auf Autobahnen und Landstraßen fühle ich mich auch bei geringeren Abständen zum Vordermann sicher und halte große Sicherheitsabstände oft für unnötig und übertrieben

9.9 Persönlichkeit

Mit dem Hamburger Persönlichkeitsinventar (HPI) wurde im Rahmen der probandenbezogenen Datenerhebung ein Persönlichkeitsfragebogen eingesetzt, der es ermöglicht, die Ausprägung von Persönlichkeitseigenschaften in sechs Basisdimensionen zu erfassen. Die Dimensionen des etablierten Fünf-Faktoren-Modells (*Big-Five*) wurden dabei um einen weiteren Basisfaktor ergänzt. Dieser als Risikobereitschaft bezeichnete Persönlichkeitsfaktor hat sich in einer Reihe von empirischen Studien als unverzichtbare Ergänzung auf der höchsten hierarchischen Stufe der dimensionalen Persönlichkeitsorganisation herausgestellt /Andr02/. Die Kurzbeschreibungen der den einzelnen Basisdimensionen zugeordneten Eigenschaften bei extremen Merkmalsausprägungen (> 90%-Perzentil, < 10%-Perzentil) sind in Tabelle 9.67 zusammengefasst. Die Eigenschaften stehen hierbei sozusagen für eine Klasse von Verhaltensweisen, die einen Mensch auszeichnen, da er diese über die Zeit (Stabilität) und über unterschiedliche Situationen hinweg (Konsistenz) weitgehend konstant an den Tag legt.

Um zu prüfen, ob ein Zusammenhang zwischen den ermittelten Persönlichkeitseigenschaften und der im Hauptversuch erbrachten Diskriminierungsleistung besteht, wurden zunächst die unter den verschiedenen Versuchsbedingungen erbrachten Wahrnehmungsleistungen zu einem Wahrnehmungsfaktor zusammengefasst. Hierzu wurde auf der Basis der sich aus dem 3x3-faktoriellen Versuchsplan ergebenden neun Variablen eine Faktorenanalyse durchgeführt.

Wie der in Tabelle 9.62 aufgeführten Korrelationsmatrix zu entnehmen ist, korrelieren die im Hauptversuch erbrachten Wahrnehmungsleistungen zwischen allen Faktorstufen des zweifaktoriellen Versuchsplans. Bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 2% sind alle Korrelationskoeffizienten (einseitig) signifikant. Die Anti-Image-Korrelationsmatrix weist in ihrer Hauptdiagonalen für alle Variablen hohe MSA-Werte aus. Die zusammenfassende Bewertung anhand des KMO-Maßes bestätigt, dass sich die Variablenauswahl für ein Faktorenmodell "fabelhaft" eignet (Tabelle 9.63). Die Faktorenextraktion ordnet den neun beobachteten Variablen unter Anwendung der KG-Regel einen einzigen Hintergrundfaktor zu, der, wie Tabelle 9.64 zeigt, 58% der Gesamtvarianz abdeckt.

Abgesehen davon, dass durch die Faktorenanalyse der im Hauptversuch erbrachten Diskriminierungsleistung eine adäquate Hintergrundvariable zugeordnet werden konnte, lässt sich anhand der signifikanten Korrelationen, die zwischen allen Faktorstufenpaarungen des 3x3-faktoriellen Versuchsplans auftreten, ableiten, dass die individuellen Leistungsunterschiede zwischen den Probanden im Allgemeinen bestehen bleiben und nicht von der Darbietungsform oder der Fahrzeuggeschwindigkeit abhängig sind.

Da zudem die Stärke des Zusammenhangs, der durch den Korrelationskoeffizienten zum Ausdruck kommt, unabhängig davon ist, ob eine Variablenpaarung aus zwei unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen oder Darbietungsstufen betrachtet wird, kann

außerdem festgehalten werden, dass die Wahrscheinlichkeit, dass eine Versuchsperson ihr Leistungsniveau beibehält, nicht davon abhängt, ob zwischen zwei Messreihen die Darbietungsform, die Geschwindigkeitsgrößenordnung oder beides gleichzeitig verändert wird. Obwohl die Leistungsgüte von der Darbietungsform abhängt, stellt die Geschwindigkeitsdiskriminierung demzufolge eine personenbezogene Fähigkeit dar, die unabhängig von den beiden Sinnesmodalitäten (Hören, Sehen) ist.

Wird nun der durch die Faktorenanalyse bestimmte Diskriminierungsfaktor daraufhin untersucht, ob ein Zusammenhang zu den Basisdimensionen der Persönlichkeit besteht, so zeigt sich an den in Tabelle 9.66 aufgelisteten Korrelationskoeffizienten, dass zwischen der im Hauptversuch erbrachten individuellen Wahrnehmungsleistung und den Persönlichkeitsausprägungen der Probanden keine signifikanten Korrelationen auftreten. Die Hypothese, die von einem entsprechenden Zusammenhang ausgeht, ist hiermit widerlegt. Die Unabhängigkeit der sechs Basisdimensionen des Inventars wird durch die Korrelationsmatrix insofern bestätigt, als die Persönlichkeitsfaktoren untereinander ebenfalls keine signifikanten Korrelationen aufweisen.

Um festzustellen, ob die im Fragebogen geäußerten Angaben zur Fahrpraxis und zum Fahrertyp mit den Persönlichkeitsfaktoren in Zusammenhang stehen, wurden die entsprechenden Hintergrundvariablen mit in die Korrelationsmatrix aufgenommen. Diese Hintergrundvariablen entsprechen den in den beiden vorherigen Kapiteln mittels zweier Faktorenanalysen bestimmten Fahrpraxis- und Fahrertypfaktoren. An den in der Tabelle 9.66 farblich hervorgehobenen Feldern lässt sich ablesen, dass einzig zwischen dem Fahrertypfaktor, der sich auf die Fahrweise bezieht, und der Basisdimension A (Altruismus, Fürsorglichkeit und Hilfsbereitschaft) der Persönlichkeit eine signifikante Korrelation vorhanden ist. Aus dem negativen Korrelationskoeffizienten lässt sich ableiten, dass hohe Werte für den Fahrertypfaktor, die eine sportlich aggressive Fahrweise widerspiegeln, mit niedrigen Skalenwerten für die Basisdimension A verbunden sind. Umgekehrt führen hohe Skalenwerte für die Basisdimension A in der Regel zu niedrigen Werten für den Fahrertypfaktor.

Wird unter Einbeziehung der übrigen Persönlichkeitsfaktoren der partielle Korrelationskoeffizient zwischen dem Fahrertypfaktor 1 und der Basisdimension A bestimmt, ergibt sich für dieses Zusammenhangsmaß ein Wert von $-0,541$. Dieser im Vergleich zu dem Produkt-Moment-Korrelationskoeffizienten von $-0,431$ noch niedrigere Zahlenwert bekräftigt den beobachteten linearen Zusammenhang und bestätigt, dass keine Scheinkorrelation vorliegt.

Tabelle 9.62: Korrelationsmatrix (Diskriminierungsleistung)

Korrelation	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9
DS1	1,000	,573	,405	,641	,540	,533	,562	,561	,351
DS2	,573	1,000	,402	,559	,550	,570	,456	,536	,436
DS3	,405	,402	1,000	,329	,497	,553	,412	,499	,603
DS4	,641	,559	,329	1,000	,600	,602	,655	,582	,418
DS5	,540	,550	,497	,600	1,000	,602	,496	,667	,554
DS6	,533	,570	,553	,602	,602	1,000	,575	,548	,561
DS7	,562	,456	,412	,655	,496	,575	1,000	,636	,462
DS8	,561	,536	,499	,582	,667	,548	,636	1,000	,459
DS9	,351	,436	,603	,418	,554	,561	,462	,459	1,000
Signifikanz (1-seitig)	DS1	DS2	DS3	DS4	DS5	DS6	DS7	DS8	DS9
DS1		,000	,005	,000	,000	,000	,000	,000	,013
DS2	,000		,005	,000	,000	,000	,002	,000	,002
DS3	,005	,005		,019	,001	,000	,004	,001	,000
DS4	,000	,000	,019		,000	,000	,000	,000	,004
DS5	,000	,000	,001	,000		,000	,001	,000	,000
DS6	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,000
DS7	,000	,002	,004	,000	,001	,000		,000	,001
DS8	,000	,000	,001	,000	,000	,000	,000		,001
DS9	,013	,002	,000	,004	,000	,000	,001	,001	

Tabelle 9.63: KMO- und Bartlett-Test (Diskriminierungsleistung)

Maß der Stichprobeneignung nach Kaiser-Meyer-Olkin.	,901
Bartlett-Test auf Sphärizität	Ungefähres Chi-Quadrat
	df
	Signifikanz nach Bartlett
	177,684
	36
	,000

Tabelle 9.64: Erklärte Gesamtvarianz (Diskriminierungsleistung)

Komponente	Anfängliche Eigenwerte			Summen von quadrierten Faktorladungen für Extraktion		
	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %	Gesamt	% der Varianz	Kumulierte %
1	5,236	58,17	58,17	5,236	58,17	58,17
2	,933	10,37	68,54			
3	,578	6,42	74,96			
4	,498	5,53	80,49			
5	,476	5,29	85,78			
6	,395	4,39	90,17			
7	,375	4,17	94,34			
8	,276	3,07	97,40			
9	,234	2,60	100,00			

Extraktionsmethode: Hauptkomponentenanalyse.

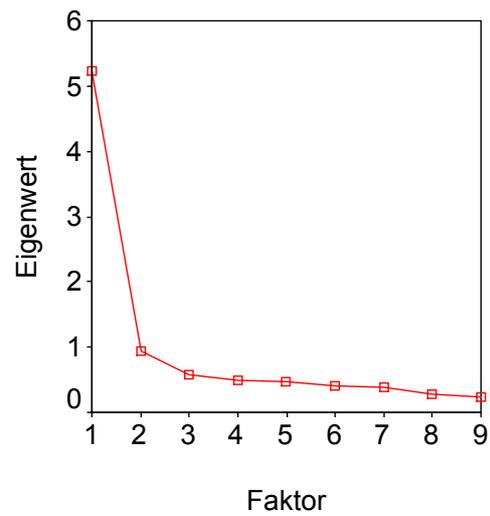


Bild 9.15: Screeplot (Diskriminierungsleistung)

Tabelle 9.65: Kommunalitäten und Faktorladungen (Diskriminierungsleistung)

Kommunalitäten			Faktorladungen	
	Anfänglich	Extraktion		Komponente 1
DS1	1,000	,571	DS1	,756
DS2	1,000	,549	DS2	,741
DS3	1,000	,454	DS3	,673
DS4	1,000	,628	DS4	,792
DS5	1,000	,651	DS5	,807
DS6	1,000	,657	DS6	,811
DS7	1,000	,592	DS7	,770
DS8	1,000	,648	DS8	,805
DS9	1,000	,486	DS9	,697

Tabelle 9.66: Korrelationsmatrix der übergeordneten Faktoren (Persönlichkeit, Fahrpraxis, Fahrertyp, Diskriminierungsleistung)

Variablen	Statistik	Variablen2									
		N	E	O	C	A	R	FP	FT1	FT2	DL
Nervosität	Korrelation	1	-,194	,146	-,020	,012	-,037	,075	,151	-,132	-,233
	Signifikanz (2-seitig)	.	,231	,368	,901	,939	,822	,645	,354	,416	,148
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Extraversion	Korrelation	-,194	1	,060	,072	,213	,131	-,226	,194	,000	,089
	Signifikanz (2-seitig)	,231	.	,713	,658	,188	,420	,161	,230	,998	,584
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Offenheit	Korrelation	,146	,060	1	-,021	-,006	-,037	-,263	-,056	,089	-,059
	Signifikanz (2-seitig)	,368	,713	.	,900	,973	,819	,101	,731	,585	,719
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Kontrolliertheit	Korrelation	-,020	,072	-,021	1	-,064	-,198	-,139	,047	,090	,106
	Signifikanz (2-seitig)	,901	,658	,900	.	,693	,221	,392	,772	,580	,514
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Altruismus	Korrelation	,012	,213	-,006	-,064	1	,133	-,027	-,431*	-,154	-,079
	Signifikanz (2-seitig)	,939	,188	,973	,693	.	,413	,868	,006	,344	,630
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Risikobereitschaft	Korrelation	-,037	,131	-,037	-,198	,133	1	-,037	,154	,022	-,146
	Signifikanz (2-seitig)	,822	,420	,819	,221	,413	.	,821	,342	,892	,369
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Fahrpraxisfaktor 1	Korrelation	,075	-,226	-,263	-,139	-,027	-,037	1	,209	,284	-,183
	Signifikanz (2-seitig)	,645	,161	,101	,392	,868	,821	.	,197	,076	,259
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Fahrertypfaktor 1	Korrelation	,151	,194	-,056	,047	-,431*	,154	,209	1	,000	-,039
	Signifikanz (2-seitig)	,354	,230	,731	,772	,006	,342	,197	.	1,00	,813
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Fahrertypfaktor 2	Korrelation	-,132	,000	,089	,090	-,154	,022	,284	,000	1	-,296
	Signifikanz (2-seitig)	,416	,998	,585	,580	,344	,892	,076	1,00	.	,064
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
Diskriminierungs-faktor	Korrelation	-,233	,089	-,059	,106	-,079	-,146	-,183	-,039	-,296	1
	Signifikanz (2-seitig)	,148	,584	,719	,514	,630	,369	,259	,813	,164	.
	N	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40

** . Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Tabelle 9.67: HPI Kurzbeschreibungen von starken Skalenausprägungen

N	Nervosität, Sensibilität und emotionale Labilität	Ein hoher Skalenwert von 10 oder mehr bedeutet: Erhöhte Stressreagibilität; Sensibilität gegenüber Kritik und Zurückweisung; Neigung zu unangenehmen Affekten und Empfindungen wie Schreck, Angst, Wut oder Schmerz; Neigungen zu Kummer, Ärger oder Traurigkeit; emotionale Instabilität und Erschöpfbarkeit.
		Ein niedriger Skalenwert von 4 oder weniger bedeutet: Gelassenheit bei alltäglichen Belastungen und Störungen; Robustheit gegenüber Stress; emotionale Stabilität und positives Selbstwertgefühl; Ausgeglichenheit und Zufriedenheit.
E	Extraversion, Lebhaftigkeit und Kontaktfreude	Ein hoher Skalenwert von 10 oder mehr bedeutet: Geselligkeit und Mitteilbarkeit; Unternehmungslust und Abwechslungsbedürfnis; positives Gemeinschaftsgefühl, Kameradschaftserleben; Suche nach Spaß und Vergnügungen aller Art; Fröhlichkeit und gehobene Stimmung; Charme und Ausstrahlung; lebhaftes Temperament.
		Ein niedriger Skalenwert von 4 oder weniger bedeutet: Neigungen zum sozialen Rückzug; einzelgängerisches Verhalten; Zurückhaltung und Kontaktscheu; nur wenige Freunde; meidet Menschenmassen und Trubel; kühle Reserviertheit.
O	Offenheit für Erfahrungen	Ein hoher Skalenwert von 10 oder mehr bedeutet: Rege Fantasie und kreative Neigungen; breites kulturelles Interesse; philosophische und spirituelle Sinnsuche; ausgeprägte ästhetische Sensibilität; Offenheit für neue Erlebnisse und Erfahrungen; unkonventioneller Lebensstil; Diskussionsfreude, alternative und radikale Ideen.
		Ein niedriger Skalenwert von 4 oder weniger bedeutet: Konventionalität im Denken; eingeschränktes Kulturinteresse, kein Interesse an Neuem und Ungewohntem; keine Neigung zu Abstraktion und Komplexität; enger weltanschaulicher Horizont.
C	Kontrolliertheit und Normorientierung	Ein hoher Skalenwert von 10 oder mehr bedeutet: Gewissenhaftigkeit und strenge Moral; pedantische und bürokratische Neigungen; Pflege konservativer Werte; Pflichtgefühl und Arbeitsamkeit; Ordnungsliebe und Regelbeachtung; Sachlichkeit, Neigung zum Planen und methodisches Vorgehen; nüchterne Detailorientierung.
		Ein niedriger Skalenwert von 4 oder weniger bedeutet: Tendenz zu Planlosigkeit und Impulsivität; wenig Sinn für Ordnung und Zuverlässigkeit; wenig Pünktlichkeit, schwache Zeiteinteilung; keine konservativen Moralvorstellungen; Haltlosigkeit.
A	Altruismus, Fürsorglichkeit und Hilfsbereitschaft	Ein hoher Skalenwert von 10 oder mehr bedeutet: Bedürfnis nach Zärtlichkeit und Geborgenheit, Sanftmut und Harmoniestreben; Liebe zu Kindern, Familiensinn; Gutmütigkeit und Anpassungsfähigkeit; Kooperationsbereitschaft und Förderung anderer; Selbstlosigkeit und Hilfsbereitschaft; Fürsorge für Schwächere; Mitgefühl.
		Ein niedriger Skalenwert von 4 oder weniger bedeutet: Wenig Rücksicht auf andere, Egoismus; wenig Hilfsbereitschaft; kaum soziale Empathie; Ablehnung von Weichheit und mitmenschlicher Warmherzigkeit; starke Bindungsabneigungen.
R	Risiko- und Kampfbereitschaft, Suche nach Wettbewerb	Ein hoher Skalenwert von 10 oder mehr bedeutet: Wettkampforientierung und kämpferische Lebenseinstellung; sportive Neigungen; Abenteuerlust und Wagemut, Kaltblütigkeit; Härte und Durchsetzungsfähigkeit; Erfolgsorientierung und Ehrgeiz; Dominanz; Tatkraft, Einsatz und zupackendes Verhalten; Verantwortungsbereitschaft.
		Ein niedriger Skalenwert von 4 oder weniger bedeutet: Wenig Tapferkeit und Mut, geringe Risikoneigung; schwache Willensausprägung; Unentschlossenheit und Furchtsamkeit; wenig Unabhängigkeit, Durchsetzungsschwäche; mangelnde Härte

10 Zusammenfassung und Ausblick

Der Mensch hat insbesondere im Straßenverkehr ständig die Aufgabe, Bewegungsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen einzuschätzen und sein Verhalten situationsbedingt darauf abzustimmen. In der vorliegenden Arbeit wurde zum einen untersucht, wie gut der Mensch anhand des Seh- und Hörsinns die Bewegungsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen unterscheiden kann, und ob sich diese Fähigkeit durch die Kombination beider Sinne verbessert. Zum anderen wurde der Frage nachgegangen, welchen Einfluss die Bewegungsgeschwindigkeit von Fahrzeugen auf die Diskriminierungsleistung des Menschen hat.

Bei der vorliegenden Studie handelt es sich um eine wahrnehmungspsychologische Untersuchung, bei der die individuelle Diskriminierungsleistung von insgesamt 45 Versuchspersonen bestimmt wurde. Die eigens hierfür entwickelte, virtuelle Simulationsumgebung, die es ermöglicht, Verkehrsszenen sowohl visuell als auch akustisch dreidimensional darzustellen, zeigt eine Landstraße, die von zwei aufeinander folgenden Fahrzeugen unterschiedlich schnell befahren wird. Die Aufgabe der Probanden bestand darin, zu entscheiden, welches der beiden Fahrzeuge schneller gefahren ist. Die realitätsnahen über ein HMD (*Head-Mounted-Display*) ausgegebenen Bild- und Toninhalte wurden hierbei auf der Grundlage einer Kopfpositionserfassung in "Echtzeit" an die Betrachterperspektive angepasst. Als Kenngröße für die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung wurde anhand der gewichteten Up-Down-Methode die Diskriminierungsschwelle ermittelt, bei der die Versuchsperson mit 75%iger Wahrscheinlichkeit die richtige Entscheidung darüber trifft, welches der beiden Fahrzeuge schneller gefahren ist. Der Versuch wurde auf der Basis eines 3x3-faktoriellen Versuchsplans durchgeführt, bei dem die beiden unabhängigen Variablen Geschwindigkeitsgrößenordnung und Darbietungsform zwei Messwiederholungsfaktoren darstellen. Die Geschwindigkeitsgrößenordnung variiert dabei in den drei Stufen 120, 60 und 30 km/h. Bei der Darbietungsform wird zwischen *visuell*, *visuell-akustisch* und *akustisch* unterschieden.

Neben der Diskriminierungsschwelle wurden bei den Messungen auch die abhängigen Variablen mittlere Reaktions- und Antwortzeit sowie mittlerer Notenwert bestimmt. Die Reaktionszeit entspricht dabei der Zeitdifferenz zwischen dem Erscheinen des zweiten Fahrzeugs (Vergleichsreiz) und dem Auslösen der Antworttaste, d.h. dem Moment, wo der Proband sich in seiner Geschwindigkeitseinschätzung festlegt und damit gleichzeitig die Versuchsszene beendet. Die Zeit, die der Proband benötigt, um eine anschließende Selbsteinschätzung abzugeben, gilt als Antwortzeit. Der Notenwert spiegelt auf einer Notenskala von 1-6 (Schulnotensystem) wider, wie sicher sich der Proband bei der jeweils getroffenen Entscheidung war.

Vortests zu dieser Untersuchung ergaben, dass die Diskriminierungsleistung von Testperson zu Testperson stark variiert. Um zu verhindern, dass eine zu große Anfangsdifferenz der Geschwindigkeiten einerseits zu überlangen Messreihen führt und andererseits der Anfangsschwierigkeitsgrad den Probanden überfordert, wurde dem Hauptversuch ein Vorversuch vorangestellt. Dieser hatte primär die Aufgabe, das Leistungsniveau des Probanden zu bestimmen und daraus eine geeignete Startvorgabe für den Hauptversuch abzuleiten.

Die Versuchsdaten wurden mit unterschiedlichen Verfahren der deskriptiven Statistik und der Inferenzstatistik ausgewertet. Die wichtigsten Versuchsergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Erwartungsgemäß können Bewegungsgeschwindigkeiten von Fahrzeugen bei *visueller* Darbietung wesentlich genauer unterschieden werden, als bei *akustischer* Darbietung. Die im Hauptversuch für alle drei Geschwindigkeitsstufen gemittelten Diskriminierungsschwellen liegen bei der *visuellen* Darbietungsform bei 18,2% und bei der *akustischen* Darbietung bei 26%, wobei sich die Prozentangaben auf die relative Geschwindigkeitsdifferenz zum erst gezeigten Fahrzeug (Standardreiz) beziehen.

Aus den Messreihen geht ferner hervor, dass bei der kombinierten Darbietungsform *visuell-akustisch* die Diskriminierungsleistung zwar leicht abfällt, der Mittelwertsunterschied jedoch so gering ausfällt, dass er als nicht signifikant einzustufen ist. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die visuelle Geschwindigkeitswahrnehmung bei gleichzeitiger Beteiligung des Seh- und Hörsinns eindeutig dominiert. Die Hypothese, dass es bei gleichzeitiger Verarbeitung von visuellen und auditiven Sinnesreizen zu einer Steigerung der Diskriminierungsleistung kommt, ist entsprechend zu verwerfen.

Um den Einfluss der Bewegungsgeschwindigkeit von Fahrzeugen auf die Güte der visuellen und auditiven Geschwindigkeitsdiskriminierung zu untersuchen, wurde geprüft, ob die Messergebnisse das Webersche-Gesetz bestätigen, nach dem die Unterschiedschwelle linear mit dem Reizzuwachs ansteigt. Wird, wie in der vorliegenden Studie, eine Kenngröße gewählt, die die Differenz zwischen zwei Fahrzeuggeschwindigkeiten in Prozent angibt, dürfte die Geschwindigkeit keinen Einfluss auf den Schwellenwert ausüben. Die Analyse der Messdaten ergab, dass das Webersche-Gesetz für die beiden Darbietungsformen *visuell* und *visuell-akustisch* zutrifft. Wird dagegen nur anhand des Hörsinns entschieden, welches Fahrzeug schneller gefahren ist, so ergibt sich für die Basisgeschwindigkeit von 30 km/h eine deutlich schlechtere Diskriminierungsleistung als bei den beiden anderen Geschwindigkeitsstufen. Je nach statistischem Prüfverfahren ergibt sich ein als signifikant einzustufender Leistungsabfall dabei entweder im Vergleich zur mittleren und höchsten oder nur im Vergleich zur höchsten Geschwindigkeitsstufe.

Es liegt daher nahe, in einer weiterführenden Studie die auditive Diskriminierungsleistung für langsame bis mittlere Geschwindigkeiten (z.B. 6-60 km/h) genauer zu untersuchen, um den möglichen Ursachen für die experimentell gefundene Abweichung von der Weber-Regel nachzugehen.

Eine denkbare Ursache wäre, dass die Messungen für die unterste Geschwindigkeitsstufe bereits in einem so schwachen Reizstärkebereich liegen, dass sich die Werte für die Unterschiedsschwellen nicht proportional zum relativen Reizzuwachs verändern.

Aufgrund der Snapshot-Theorie (vgl. Kapitel 4) kann von einem Zusammenhang zwischen der Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung und der Auflösung des Richtungs- und Entfernungshörens ausgegangen werden kann. Daher liegt die Vermutung nahe, dass die Ursachen für die Abweichung von der Weber-Regel in der Geräuschsimulation zu suchen sind, in der Geräuschquellen mit einer geringeren räumlichen Auflösung abgebildet werden als in der Wirklichkeit. Ferner werden die in der virtuellen Simulationsumgebung verwendeten Fahrzeuggeräusche zwar mit einer hohen Updaterate (50Hz) räumlich platziert, die in der Realität auftretenden Schallreflexionen fließen jedoch nicht mit in die Simulation ein. Auf die Wichtigkeit der vom Boden reflektierten Schallwellen für die Richtungs- und Entfernungslokalisierung wurde bereits in Kapitel 3 hingewiesen. Ein weiterer möglicher Erklärungsansatz für den Leistungsabfall bei niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeiten ergibt sich aus der bei der Geräuschsimulation verwendeten Kopfübertragungsfunktion (vgl. Kapitel 3). Da keine individuelle Anpassung erfolgte, wurden die Geräuschquellen nicht für jede Versuchsperson räumlich optimal abgebildet.

Die beiden genannten Erklärungsansätze für die Abweichung von der Weber-Regel sind jedoch als Hypothesen anzusehen, deren Verifizierung den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen würde. Da es inzwischen möglich ist, Kopfübertragungsfunktionen anhand von biometrischen Daten des Kopfes und Außenohrs oder anhand vereinfachter Einzelmessungen individuell zu berechnen bzw. anzupassen, wäre es sogar denkbar, diese Untersuchung in einer virtuellen Simulationsumgebung durchzuführen. Auch würde es bei der vorliegenden Verkehrsszenarie keine technischen Schwierigkeiten bereiten, Schallreflexionen mit in die Geräuschsimulationen einzubeziehen.

Die Untersuchung hat ferner ergeben, dass die Güte der visuellen und auditiven Geschwindigkeitsdiskriminierung im Hauptversuch deutlich höher ist als im Vorversuch. Ob diese Leistungssteigerung ausschließlich auf einen Lerneffekt seitens der Probanden zurückzuführen ist oder ob die im Hauptversuch modifizierte Schwellenwertmessung (Schrittweitenänderung bei der gewichteten Up-Down-Methode) hierfür verantwortlich ist, kann aufgrund der vorliegenden Messdaten nicht eindeutig geklärt werden. Für die Annahme eines Lerneffekts seitens der Probanden spricht, dass in der Fachliteratur im Zusammenhang mit mentalen Tätigkeiten mehrfach berichtet wird, dass sich insbesondere in den ersten Minuten der Testung erhebliche Leistungssteigerungen einstellen.

Auch für die übrigen abhängigen Variablen zeigen sich signifikante Mittelwertsdifferenzen zwischen den Stichproben des Vor- und Hauptversuchs. Die Antwortzeiten verkürzen sich und die Notenwerte steigen an. Das Ausmaß der Veränderung zwischen Haupt- und Vorversuch ist verglichen mit den Veränderungen der Messwerte während des Hauptversuchs beträchtlich. Eine Ausnahme stellt in diesem Zusammenhang die

Reaktionszeit dar. Hier ist nur bei der *visuellen* Darbietungsform festzustellen, dass sich die Reaktionszeiten im Vergleich zum Vorversuch signifikant verkürzen. Dieses Phänomen lässt sich auch für den Zeitraum des Hauptversuchs beobachten, wo es bei der *akustischen* Darbietungsform ebenfalls nicht zu signifikanten Änderungen für die mittleren Reaktionszeiten kommt. In Bezug auf das Verhalten der Probanden bedeutet dies, dass immer erst der Moment des Vorbeifahrens abgewartet wird, bevor der Proband entscheidet, welches Fahrzeug seiner Meinung nach schneller gefahren ist. Daraus lässt sich folgern, dass es offenbar schwieriger für den Menschen ist, Geschwindigkeiten nur aufgrund eines sich nähernden Geräusches zu bestimmen.

Ferner wurde analysiert, ob sich die Dauer des Hauptversuchs auf die Messdaten auswirkt, d.h. ob Indizien für eventuelle Ermüdungserscheinungen vorhanden sind. Die Untersuchung hat ergeben, dass sich im Hinblick auf die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung und die Länge der mittleren Reaktionszeiten keine Ermüdungserscheinungen nachweisen lassen. Bei den während des Hauptversuchs durchgeführten Messungen ergaben sich ausschließlich Veränderungen in Bezug auf die abhängigen Variablen Antwortzeit und Note, d.h. die mittleren Antwortzeiten wurden im Verlauf der Messreihen kürzer, während die mittleren Notenwerte anstiegen. Der als signifikant zu bewertende Notenanstieg lässt dabei auf ein sinkendes Vertrauen des Probanden in die eigene Diskriminierungsleistung schließen. Hieraus lässt sich u.a. die Hypothese aufstellen, dass die Versuchspersonen sich der Begrenztheit ihrer Fähigkeit, Geschwindigkeiten zu diskriminieren, zunehmend bewusst werden. Die aufkommenden Zweifel an der eigenen Diskriminierungsleistung lassen sich ferner darauf zurückführen, dass bei der gewählten Schwellenwertmessmethode von dem Probanden eine Entscheidung quasi erzwungen wird (*Forced-Choice*), d.h. er hat keine Möglichkeit etwa durch Betätigen einer dritten Taste anzuzeigen, dass er sich im betreffenden Fall nicht entscheiden kann oder will. Alternative Messmethoden, die diese Entscheidungsmöglichkeit zulassen, wurden zwischenzeitlich entwickelt, waren jedoch zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung noch nicht ausreichend evaluiert. Für die Auswertung des Hauptversuchs besteht jedoch keine zwingende Notwendigkeit für die Anwendung solcher Verfahren, da es keine Hinweise dafür gibt, dass sich das sinkende Vertrauen in die erbrachte Leistung negativ auf die Geschwindigkeitsdiskriminierung auswirkt.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden ferner die verschiedenen abhängigen Variablen auf ihre Alters- und Geschlechtsabhängigkeit hin untersucht. Eine Geschlechtsabhängigkeit der Messwerte konnte nicht nachgewiesen werden. Bei Einteilung der Probanden in die beiden Altersklassen *jünger* und *älter* zeigte sich jedoch, dass die Antwortzeiten der älteren Versuchspersonen (26-37 Jahre) signifikant länger waren als die der jüngeren, was als eindeutiges Indiz dafür gewertet werden kann, dass die Spontaneität, mit der die Selbsteinschätzung erfolgt, mit dem Alter abnimmt. Für die übrigen abhängigen Variablen existieren keine altersbedingten Unterschiede.

Eine frühere Untersuchung ergab bereits, dass die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung individuell sehr unterschiedlich ist. Durch das in der vorliegenden Untersuchung verwendete Schwellenmessverfahren war es möglich, diese Leistungsunterschiede genauer zu analysieren. Von Interesse war in diesem Zusammenhang ferner die Frage, ob es einen Zusammenhang zwischen der erbrachten Diskriminierungsleistung und den individuellen Merkmalen der Probanden gibt. Zur Auswertung des Hauptversuchs wurden daher neben dem Alter und dem Geschlecht noch weitere personenbezogene Daten herangezogen, die mittels eines Internet-Fragebogens erfasst wurden. Bei diesen Daten handelt es sich um Angaben zur Fahrpraxis sowie um die Beurteilung der eigenen Fahrweise und der eigenen Fahrfertigkeiten (Fahrertyp). Darüber hinaus wurden mit Hilfe des Hamburger Persönlichkeitsinventars (HPI) sechs Basisdimensionen der Persönlichkeit ermittelt. Im Unterschied zum etablierten Fünf-Faktoren-Modell (*Big-Five*) beinhaltet der HPI auch den Basisfaktor Risikobereitschaft, der für die vorliegende Studie von besonderem Interesse ist.

Auf der Grundlage dieser personenbezogenen Daten wurde der Frage nachgegangen, ob ein Zusammenhang zwischen der erbrachten Diskriminierungsleistung, der Fahrpraxis, dem Fahrertyp und den Persönlichkeitsausprägungen des Probanden besteht. Anhand der täglichen Fahrpraxis, die in eine als *gewichtete jährliche Fahrleistung* bezeichnete Kenngröße überführt wurde, wurde beispielsweise untersucht, ob Probanden, die häufig aktiv am Straßenverkehr teilnehmen und weite Strecken zurücklegen, und aufgrund dessen über eine größere Routine in der Einschätzung von Fahrzeuggeschwindigkeiten verfügen, im Hauptversuch eine bessere Diskriminierungsleistung erbringen als Versuchspersonen mit geringerer Fahrpraxis. Da PKW-Insassen in der Fahrgastzelle jedoch akustisch von der Umwelt abgeschirmt sind, wurde die Frage nur in Bezug auf die visuelle Geschwindigkeitswahrnehmung untersucht.

Ein Einfluss der Fahrpraxis auf die im Hauptversuch erbrachte visuelle Diskriminierungsleistung konnte statistisch nicht nachgewiesen werden, obwohl die über die verschiedenen Geschwindigkeitsstufen gemittelten Schwellenwerte tendenziell bestätigen, dass die Güte der Geschwindigkeitsdiskriminierung mit steigender Fahrpraxis zunimmt. Die Frage, ob ein Zusammenhang zwischen Fahrertyp und Diskriminierungsleistung besteht, konnte ebenfalls verneint werden. Ferner konnte festgestellt werden, dass auch die anhand des HPI ermittelten Ausprägungen der Persönlichkeit keinen Einfluss auf die Güte der visuellen und auditiven Geschwindigkeitsdiskriminierung haben. Um dies zu prüfen, wurden zunächst die unter den verschiedenen Versuchsbedingungen erbrachten Diskriminierungsleistungen mittels einer Faktorenanalyse zu einem sog. Diskriminierungsfaktor zusammengefasst und die Korrelationen zwischen dem Diskriminierungsfaktor und den sechs Persönlichkeitsfaktoren auf Signifikanz geprüft.

Um festzustellen, ob die im Fragebogen geäußerten Angaben zur Fahrpraxis und zum Fahrertyp mit den Persönlichkeitsfaktoren in Zusammenhang stehen, wurden den beiden Angaben anhand von zwei Faktoranalysen zunächst entsprechende Hintergrund-

variablen zugeordnet. Diese als Fahrpraxis- und Fahrertypfaktoren bezeichneten Hintergrundvariablen wurden anschließend auf signifikante Korrelationen mit den Persönlichkeitsfaktoren hin getestet. Es zeigte sich, dass einzig zwischen dem Fahrertypfaktor, der sich auf die Fahrweise bezieht, und der Basisdimension A (Altruismus, Fürsorglichkeit und Hilfsbereitschaft) der Persönlichkeit eine signifikante Korrelation vorhanden ist. Aus dem negativen Korrelationskoeffizienten lässt sich ableiten, dass hohe Werte für den Fahrertypfaktor, die eine sportlich aggressive Fahrweise widerspiegeln, mit niedrigen Skalenwerten für Altruismus verbunden sind. Umgekehrt führen hohe Skalenwerte für Altruismus in der Regel zu niedrigen Werten für den Fahrertypfaktor.

Außerdem wurde untersucht, ob die individuellen Leistungsunterschiede zwischen den Probanden an die unterschiedlichen Geschwindigkeitsstufen bzw. an die jeweilige Darbietungsform *visuell*, *visuell-akustisch* und *akustisch* gebunden sind. Zur Beantwortung dieser Frage wurde auf der Grundlage des 3x3-faktoriellen Versuchsplans eine entsprechende Korrelationsmatrix erstellt. Es zeigte sich, dass zwischen allen Faktorstufenpaarungen signifikante Korrelationen bestehen, wobei die Stärke der Korrelation unabhängig von der Geschwindigkeitsgrößenordnung und der Darbietungsform ist. Obwohl sich die visuelle und die auditive Geschwindigkeitsdiskriminierung, wie bereits an anderer Stelle gezeigt wurde, in ihrer Güte unterscheiden, stellt die Geschwindigkeitsdiskriminierung als solche eine von der Geschwindigkeitsgrößenordnung und der Darbietungsform unabhängige, personenbezogene Fähigkeit dar.

11 Literaturverzeichnis

- /Alga02/ Algazi, V.: *Structural Composition and Decomposition of HRTF*. Maryland: CIPIC, 2002
- /Ande01/ Anderson, J.: *Kognitive Psychologie*. Spektrum Akademischer Verlag, 2001
- /Andr02/ Andresen, B.: *HPI Hamburger Persönlichkeitsinventar*. Göttingen: Hogrefe, 2002
- /Arno98/ Arnold-Schulz-Gahmen, B.E: "Laterality of eye, ear, hand and foot: Distribution and implications for sensory-motor performance". In: *European Journal of Physiology* 435, suppl., R 228, 1998
- /Arno99/ Arnold-Schulz-Gahmen: "An analysis of laterality interrelations". In: *European Journal of Physiology* 437, suppl. R, 192, 1999
- /Asen99/ Asendorpf, J.B.: *Psychologie der Persönlichkeit*. Berlin: Springer, 1999
- /Assm00/ Assmann, E.: *Fragebogen zur Verwendung in Fahrsimulator-experimenten*. München: BMW-Internet-Fragebogen, 2000
- /Atkin01/ Atkinson, R.: *Hilgrads Einführung in die Psychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2001
- /Back00/ Backhaus, E.: *Multivariate Analysemethoden*. Berlin: Springer, 2000
- /BAST98/ Schulze, H.: *Lebensstil und Verkehrsverhalten junger Fahrer und Fahrerinnen*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft M 56, Bergisch-Gladbach, 1998
- /Beer72/ Beers, J.: *Judgement of vehicle speeds and traffic patterns*. UCLA-Eng-7281. Final Report, 1972
- /Bega00/ Begault, D.R.: *3D Sound*. Boston: AP Professional, 2000
- /Bega94/ Begault, D.R.: *3D Sound*. Boston: AP Professional, 1994
- /Beic95/ Beichelt, F: *Stochastik für Ingenieure*. Stuttgart: Teubner, 1995
- /Birb98/ Birbaumer, W.: "Hirnhemisphären und Verhalten". In: *Deutsches Ärzteblatt* 95 H. 4, S. 31 – 34, 1998
- /Birb99/ Birbaumer, W.: *Biologische Psychologie*. Berlin: Springer, 1999
- /Blau74/ Blauert, J.: *Räumliches Hören*. Stuttgart: Hirzel, 1974
- /Blau80/ Blauert, J.: *Neuere Ergebnisse zum räumlichen Hören*. Opladen: Rheinisch-Westfälische Akademie der Wissenschaften, Vorträge N 292 Westdeutscher Verlag, 1980
- /Blau85/ Blauert, J.: *Räumliches Hören – Nachschrift Neue Ergebnisse und Trends seit 1972*. Stuttgart: Hirzel, 1985

- /Blau96/ Blauert, J.: "An Introduction to Binaural Technology". In: Gilkey, R. H.: *Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments*. Mahwah, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates, 1996
- /Blau97/ Blauert, J.: *Räumliches Hören. 2. Nachschrift. Neue Ergebnisse und Trends seit 1982*. Stuttgart: Hirzel, 1997
- /Blau97b/ Blauert, J.: *Spatial hearing - the psychophysics of human sound localization*. Cambridge: MIT Press, 1997.
- /Bodd92/ Bodden, M.: *Binaurale Signalverarbeitung. Modellierung der Richtungserkennung und des Cocktail-Effektes*. Düsseldorf: VDI, 1992
- /Boen86/ Boenninghaus, H.-G.: *Hals-Nasen-Ohrenheilkunde*. Berlin: Springer, 1986.
- /Bölk97/ L. Bölke: *Ein akustischer Interaktionsraum für blinde Rechnerbenutzer*. Dissertation, Universität Oldenburg, 1997
- /Bort93/ Bortz, J.: *Statistik für Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer, 1993
- /Bort99/ Bortz, J.: *Statistik für Sozialwissenschaftler*. Berlin: Springer, 1999
- /Bros02/ Brosius, G.; Brosius, F.: *SPSS Base System und Professional Statistics*. New York: Thomson Publishing, 2002
- /Bros02/ Brosius, F.: *SPSS 11*. Bonn: mitp, 2002
- /Bubb77/ Bubb, H.: "Analyse der Geschwindigkeitswahrnehmung im Kraftfahrzeug". In: *Zeitschrift für Arbeitswissenschaft* 31, 103-112, 1977
- /Bühl02/ Bühl, A.: *SPSS für Windows Version 11*. New York: Addison-Wesley, 2002
- /Bühl96/ Bühl, A.; Zöfel, P.: *Professionelle Datenanalyse mit SPSS für Windows*. Bonn, New York: Addison-Wesley, 1996
- /Buns99/ Bunse, A.: *Die Bedeutung des binauralen Hörens für die Empfindung von Lautheit und Rauigkeit*. Düsseldorf: VDI, 1999
- /Camp93/ Campenhausen, C.: *Die Sinne des Menschen*. Stuttgart: Thieme, 1993
- /Carr95/ Carr, K.: *Simulated and Virtual Realities*. London: Taylor&Francis, 1995
- /Clau95/ Clauß: *Statistik II - Grundlagen*. Frankfurt am Main: Deutsch, 1995
- /Core93/ Coren, S.: *The Left-Hander-Syndrome*. New York: Vintage Books, 1993
- /Core94/ Coren, S.: *Sensation and perception*. Fort Worth: Harcourt Brace, 1994
- /CRE94/ Crystal River Engineering, Inc.: *Cretron - library reference manual*, 1994

- /Crem90/ Cremer, L.: *Vorlesungen über Technische Akustik*. Berlin: Springer, 1990
- /Deus96/ Deusinger, M.: *Persönlichkeit und Kognition*. Göttingen: Hogrefe, 1996
- /Dick97/ Dickreiter: *Handbuch der Tonstudioteknik*. München: Saur, 1997.
- /Dick99/ Dickreiter, M.: *20. Tonmeistertagung*. München: Saur, 1999
- /Dieh01/ Diehl, J.M.: *Statistik mit SPSS*. Eschborn bei Frankfurt/Main: Klotz, 2001
- /Dieh77/ Diehl, J.M.: *Durchführungsanleitungen für statistische Tests*. Weinheim: Beltz, 1977
- /Dieh92/ Diehl, J.M.: *Einführung in die Inferenzstatistik*. Eschborn bei Frankfurt/Main: Klotz, 1992
- /Dieh93/ Diehl, J.M.: *Deskriptive Statistik*. Eschborn bei Frankfurt/Main: Klotz, 1997
- /Dier94/ Dierhoff, H.-G.: *Lärmschwerhörigkeit*. Jena: Fischer, 1994
- /Din177/ Din-Taschenbuch 177: *Augenoptik*. Berlin: Beuth 1999
- /DIN58220/ DIN 58220 "Sehschärfebestimmung" Teil 3, 5 u. 6. Berlin: Beuth. 1997
- /DIN8596/ DIN-EN ISO 8596 und 8597 "Sehschärfeprüfung, ". Berlin: Beuth, 1996
- /Dops00/ Dopsch, U. K.: *Alternative Methoden zur Überprüfung des Farbsehens*. Dissertation Universität Innsbruck, 2000.
- /Dors98/ Dorsch, F.: *Psychologisches Wörterbuch*. Bern: Huber Verlag, 1998
- /Dors98/ Häcker, H.: *Dorsch Psychologisches Wörterbuch*. Bern: Huber, 1998
- /Duda02/ Duda, R.: *Approximating the head-related transfer function using simple geometric models of the head and torso*. Maryland: CIPIC, 2002
- /Duda93/ Duda, R. O.: "Modeling head related transfer functions", *Proc. 27th Ann. Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers*, Asilomar, CA, Nov. 1993
- /Duda97/ Duda, R.: "Elevation dependence of the interaural transfer function". In *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. Mahwah, N.J. : Erlbaum, 1997, pp. 49-75
- /Duda98/ Duda, R.: *A Structural Model for Binaural Sound Synthesis*. Maryland: CIPIC, 1998
- /Dude01/ Dudel J.: *Neurowissenschaft – vom Molekül zur Kognition*. Berlin: Springer, 2001

- /Dude01/ Dudel, J.: *Neurowissenschaft*. Spektrum Akademischer Verlag, 2001
- /Evan70/ Evans, L.: "Automobile speed estimation using movie-film simulation". In: *Ergonomics* 13,231-237, 1970
- /Fehr98/ Fehr, T.: *Bioenergetische Prozess-Analyse BPA*. Swets Test Service, 1998
- /Fink99/ Fink, G.R.: "*Bottom-up*"- und "*Top-down*" - Einflüsse auf visuelle Wahrnehmung. Jülich: Forschungszentrum, 1999
- /Gall02/ Gall, S.: *Handbuch Biopsychologie und Neurowissenschaften*. Bern: Huber, 2002
- /Gard73/ Gardner, M.B.: "Some monaural and binaural facets of median plane localization". In: *Journal of the Acoustical Society of America* 54, 1489-1495, 1973
- /Gard94/ Gardner, M.B.: "HRTF Measurements of a KEMAR Dummy-Head Microphone". In: *Journal of the Acoustical Society of America*, 1994
- /Garn95/ Grantham, D. W.: "Spatial hearing and related phenomena". In Moore, B.C.J.: *Handbook of Perception and Cognition*. San Diego: Hearing (Academic), 1995
- /Garn97/ Grantham, D. W.: "Auditory motion perception: Snapshots revisited". In: Gilkey R. H.: *Binaural and Spatial Hearing in Real and Virtual Environments*. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum, 1997
- /Genu84/ Genuit, K.: *Ein Modell zu Beschreibung von Außenrohrübertragungseigenschaften*. Dissertation Technische Hochschule Aachen, 1984
- /Gern95/ Gernemann, A.: *Messtechnische Untersuchung der akustischen Vorgänge beim natürlichen Hören im Vergleich zu den Vorgängen bei der Laufzeit- und "Intensitäts"- Stereophonie*. Aachen: Shaker, 1995
- /Gibs73/ Gibson, J.: *Die Wahrnehmung der visuellen Welt*. Weinheim: Beltz, 1973
- /Gibs82/ Gibson, J.: *Wahrnehmung und Umwelt*. München: Urban & Schwarzenberg, 1982
- /Gibs82/ Gibson, J.: *Die Sinne und der Prozess der Wahrnehmung*. Bern: Huber, 1982
- /Gilk93/ Gilkey, R.H.: *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. [Conference on Binaural and Spatial Hearing.... held at Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, from September 9 - 12, 1993] Mahwah, N.J.: Erlbaum, 1997.
- /Gilk97/ Gilkey, R.H.: *Binaural and spatial hearing in real and virtual environments*. Mahwah, N.J. : Erlbaum, 1997

- /Goer96/ Goersch, H.: *Wörterbuch der Optometrie*. Stuttgart: Enke, 1996
- /Gold02/ Goldstein, E.B.: *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2002
- /Gold97/ Goldstein, E.B.: *Wahrnehmungspsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1997
- /Gord89/ Gordon, I.: *Theories of Visual Perception*. New York: John Wiley & Sons, 1989
- /Gram99/ Gramberg-Danielsen, B.: *Richtlinien und Untersuchungsanleitungen*. Berufsverband der Augenärzte Deutschlands e.V., 1999
- /Gran97/ Grantham, D.: *Auditory Motion Perception*. Mahwah, N.J. : Erlbaum, 1997
- /Guli89/ Gulick: *Hearing*. New York: Oxford University Press, 1989
- /Günt89/ Günther, B.C.: *Technische Akustik - ausgewählte Kapitel*. Ehningen bei Böblingen: Expert, 1989
- /Gusk00/ Guski, R.: *Wahrnehmung – Eine Einführung in die Psychologie der menschlichen Informationsaufnahme*. Stuttgart: Kohlhammer, 2000
- /Gusk96/ Guski, R.: *Wahrnehmen. Ein Lehrbuch*. Stuttgart: Kohlhammer, 1996
- /Hajo80/ Hajos, A.: *Einführung in die Wahrnehmungspsychologie*. Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft, 1980
- /Haus70/ Haustein, B.G.: „Messeinrichtung zur Untersuchung des Richtungslokalisationsvermögens“. In: *Hochfrequenztechnik und Elektroakustik* 79,96-101, 1970
- /Hech01/ Hecht, E.: *Optik*. München: Oldenburg Verlag, 2001
- /Hell93/ Hellbrück, J.: *Hören - Physiologie, Psychologie und Pathologie*. Göttingen: Hogrefe, 1993
- /Henn97/ Henning, A.: *Die andere Wirklichkeit*. Bonn: Addison Wesley, 1997
- /Henn99/ Henn, H.: *Ingenieurakustik*. Wiesbaden: Vieweg, 1999
- /Herd99/ Jens H.: *A sound spatialization resource management framework*. Dissertation University of Tsukuba, 1999.
- /Hers01/ Herschkowitz, N.: *Das vernetzte Gehirn - seine lebenslange Entwicklung*. Bern: Huber, 2001
- /Hill80/ Hills, B. L.: "Vision, visibility, and perception in driving". In: *Perception* 9,183-216, 1980
- /Hoff02/ Hoffmann, A.: *Das Stereoskop*. München: Deutsches Museum, 2002
- /Hoff80/ Hoffmann: "Children's estimate of vehicle approach". In: *Human Factors* 22, 235-240, 1980

- /Howe74/ Howes W.L.: "Loudness function derived from data on electrical discharge rates in auditory nerve fibers". In: *Acustica Vol. 30*, No.5, 1974.
- /Hüls00/ Hülshoff, T.: *Das Gehirn - Funktionen und Funktionseinbußen*. Bern: Huber, 2000
- /Kaer91/ Kaernbach, C., "Percept.". In: *Psychophys. 49*, 227-229, 1991
- /Käh102/ Kähler, W.: *Statistische Datenanalyse*. Braunschweig: Vieweg, 2002
- /Kand96/ Kandel, E.: *Neurowissenschaften*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1996
- /Kell95/ Kelle, O.: *Dynamische Tiefenwahrnehmungskriterien in computergenerierten interaktiven Szenen und virtuellen Simulationsumgebungen*. Düsseldorf: VDI, 1995
- /Kist89/ Kistler, D.J.: *A model of head-related transfer functions based on principal component analysis an minimum-phase reconstruction*. J.Acoust.Soc.Am., Vol.91 (3), March 1989
- /Klep01/ Kleppmann, W.: *Taschenbuch Versuchsplanung*. München: Hanser, 2001
- /Klin01/ Klinke, R.: *Lehrbuch der Physiologie*. Stuttgart: Thieme, 2001
- /Klin99/ Klinke, R.: *Lehrbuch der Physiologie*. Stuttgart: Thieme, 1999
- /Klos98/ Kloss: *VRML 97*. New York: Addison Wesley, 1998
- /Köhl01/ Köhler, T.: *Biopsychologie*. Berlin: Kohlhammer, 2001
- /Koll86/ Kollmeier, B. : *Entwicklung zeitoptimierter psychoakustischer Messverfahren und ihre Anwendung*, Dissertation, Universität Göttingen, 1986
- /Krec85/ Krech; Crutchfield: *Grundlagen der Psychologie II – Wahrnehmungspsychologie*. Weinheim: Beltz, 1985
- /Kuhn99/ Kuhn, G.: *Stereo-Fotografie und Raumbild-Projektionen*. Gilching: vfv Verlag, 1999
- /Lamb74/ Lambert, R.M: "Dynamic theory of sound-source localization". In: *Journal of the Acoustical Society of America 56*, 165-171, 1974
- /Last88/ Lastovicka, J.L.: *Speculations on the Social Psychology of Young Male Drinking-Driving. Alcohol, Drugs and Driving*, Vol. 4, No. 3-4, 1988
- /Lawr00/ Lawrence, A.: *Persönlichkeitstheorien*. München: Reinhardt, 2000
- /Lee76/ Lee, D. N.: "A theory of visual control of braking based on information about time-to-collision". In: *Perception 5*, 437-459, 1976

- /Leit00/ Leitner, S.: „Kompositionsbezogene Wiedergabe für Binauralsignale mit Ambisonic“, Graz: Institut für Elektronische Musik und Akustik Universität für Musik und darstellende Kunst Graz, 2000
- /Lema98/ Lemay, L.: *HTML 4 in 14 Tagen*. München: Markt & Technik, 1998
- /Levi01/ Levine, M. W.: *Fundamentals of Sensation and Perception*. Oxford: University Press, 2001
- /Liph97/ Liphardt, M.: *Methodensammlung zur Untersuchung der morphologischen und funktionellen Lateralität des Menschen*. Dresden: Technische Universität, 1997
- /Loen01/ Loenhoff, J.: *Die kommunikative Funktion der Sinne*. Konstanz: UVK, 2001
- /Luka96/ Lukas, J.: *Psychophysik der Raumwahrnehmung*. Weinheim: Beltz, 1996
- /Lüsc31/ Lüscher: *Stereophotographie*. Berlin: Union Deutsche Verlagsgesellschaft, 1931
- /Mack98/ Mackensen, P.: *Einfluss von spontanen Kopfdrehungen auf die Lokalisation beim binauralen Hören*. München: K. G. Sazer, 1998
- /Mako90/ Makous J.: "Two-dimensional sound localization by human listeners". In: *JASA* 87, no. 5, 2188-2200, 1990
- /Mang78/ Mangel-Conrad, B.: *Richtungshören in der Horizontalebene*. Frankfurt am Main: Dissertation Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, 1978
- /Mate85/ Mateeff: "Dynamic visual capture - apparent auditory motion induced by a moving visual target". In: *Perception* 14, 721-727, 1985
- /Matl97/ Matlin, M.W., Foley, H.J.: *Sensation and Perception*. Needham Heights: A and B, 1997
- /Meth96/ Methling, D.: *Bestimmung von Sehhilfen*. Stuttgart: Enke 1996
- /Mich63/ Michaeis, R. M.: *Perceptual factors in car following*. Proc. 2nd Internat. Symposium Theory Traffic Flow, London, 1963
- /Moll92/ Moller, H.: "Fundamentals of Binaural Technology". In: *Applied Acoustics*, Vol. 36, Elsevier Science Pub., England, 1992, S. 171-218
- /Moll95/ Moller, H.: "Head-Related Transfer Functions of Human Subjects". In: *J.Audio Eng. Soc.*, vol. 43, no. 5, pp. 300-321, May 1995
- /Moll95/ Moller, H.: "Transfer Characteristics of headphones measured on human ears", *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 43, pp.203-217, Apr. 1995
- /Moor95/ Moore B.: *Hearing*. New York: Academic Press, 1995

- /Mort72/ Mortimer, R.G.: "Weber's law and rear-end collision". In: *The Michigan Academician* 5, 99-105, 1972
- /Müll01/ Müller, S.: *Psychophysik willkürlicher Bewegungen - Kinästhesie der Geschwindigkeit*. Düsseldorf: Heinrich-Heine-Universität, Dissertation, 2001
- /Müll99/ Müller, S.: *Swens kleine Messkunde*. Aachen: Audio & Acoustics Consulting, 1996
- /Müll99/ *Transfer-Function Measurements with Sweeps*. Aachen: Institut für technische Akustik RWTH, 1999
- /Nich02/ Nicholls, J.: *Vom Neuron zum Gehirn*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2002
- /Nied95/ Niedeggen, M.: *Das bewegungsrichtungsevozierte Potential (BRP) und die Perzeption komplexer dynamischer Muster*, Marburg: Görich & Weiershäuser, 1995
- /Opht99/ Empfehlung der Deutschen Ophthalmologischen Gesellschaft zur *Fahreignungsbegutachtung für den Straßenverkehr*, 1999
- /Pede82/ Pedersen; Poulsen: *Binaural effects in normal and impaired hearing*. Copenhagen: Danavox Jubilee Foundation, 1982.
- /Perr89/ Perrot, D. R.: "Are there motion detectors in the auditory system? Sound localization by human observers". In: *Symposium proceedings*, National Academy of Science, p. 36, 1989
- /Perr97/ Perrot, D.: *Auditory Some Observations Regarding Motion Without Direction*. Mahwah, N.J. : Erlbaum, 1997
- /Perv00/ Pervin, L.A.: *Personality Persönlichkeitstheorien*. München: Reinhardt, 2000
- /Pete93/ Petersen, J.: *Die Zuverlässigkeit der Sehschärfenbestimmung mit Landoltringen*. Stuttgart: Copythek Enke, 1993
- /Pine97/ Pinel, J.P.: *Biopsychologie*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1997
- /Platt79/ Platte, H.J.: *Zur Bedeutung der Außenohrübertragungseigenschaften für den Nachrichtenempfänger "Menschliches Gehör"*. Aachen: Dissertation Technische Hochschule, 1979
- /RAS96/ *Richtlinie für die Anlage von Straßen, Querschnitte, RAS-Q*. Köln: Forschungsgesellschaft für das Straßen- und Verkehrswesen, 1996,
- /Rass90/ Rassow, B.: "Normgerechte Sehschärfenbestimmung mit Buchstaben". In: *Augenärztl. Fortb.* 13:105-114, 1990
- /Rass99/ Rassow, B.: "Anschluß von Buchstaben - Optotypen für verschiedene Bereiche der Sehschärfe". In: *Augenheilkd.* 215, 119-126, 1999

- /Ritt73/ Ritter: "Selektive Analyse von Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit in der visuellen Wahrnehmung des Menschen". In: *Psychologische Forschung* 36, 267-296, 1973
- /Rock98/ Rock, I.: *Wahrnehmung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1998
- /Röhl95/ Röhler, R.: *Sehen und Erkennen*. Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1995
- /Röhl95/ Röhler, R.: *Sehen und Erkennen*. Berlin: Springer, 1995
- /Röhr83/ Röhr: *Statistik I - Statistische Verfahren*. Thun, Frankfurt am Main: Harri Deutsch, 1983
- /Röme94/ Römer, K.: *Schall und Raum*. Berlin: VDE-Verlag, 1994
- /Rowl67/ Rowland, R.: "Interaural intensity difference limen". In: *Journal of Speech and Hearing Research* 10, 745-756., 1967
- /Sach02/ Sachs, L.: *Angewandte Statistik*. Berlin: Springer, 2002
- /Sade00/ Sader, M: *Psychologie der Persönlichkeit*. Weinheim: Juventa, 2000
- /Scha98/ Schandry, R.: *Lehrbuch Psychophysikologie*. Weinheim: Psychologie Verlags Union, 1998
- /Schi90/ Schiff, W.: "Accuracy of judging time of arrival - Effects of modality, trajectory, and gender". In: *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 16, 303-316, 1990
- /Schm01/ Schmidt; Schaible: *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Berlin: Springer, 2001
- /Schm87/ Schmidt, R.F.; Thews, G.: *Physiologie des Menschen*. Berlin: Springer, 1987
- /Schmi00/ Schmidt, R. F.: *Physiologie des Menschen*. Berlin: Springer, 2000
- /Schu96/ Schulze, H.: *Lebensstil und Verkehrsverhalten junger Fahrer und Fahrerinnen. Bremerhafen*. Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft, 1996
- /Scia91/ Scialfa: "Age differences in estimating vehicle velocity". In: *Psychology & Aging* 6, 60-66, 1991
- /Sear76/ Searle: "Model of auditory localization". In: *Journal of the Acoustical Society of America* 60, 1164-1175, 1976
- /Sedg86/ Sedgwick, H.A.: "Space and motion Perception". In: *Handbook of Perception and Human Performance*, New York: J.Wiley&Dons, Vol.1, 1986

- /Shin00/ Shinn-Cunningham, B.G.: "Distance perception of nearby sources in reverberant and anechoic listening conditions". Presented at the Mid Winter meeting of the Association for Research in Otolaryngology, St. Petersburg, 2000
- /Sing94/ Singer, W: *Gehirn und Bewusstsein*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 1994
- /Sirk69/ Sirk, H.S.: *Einführung in die Vektorrechnung für Naturwissenschaftler, Chemiker und Ingenieure*. Darmstadt: Steinkopff, 1969
- /Slat94/ Slatky, H.: *Algorithmen zur richtungsselektiven Verarbeitung von Schallsignalen*, Düsseldorf: VDI, 1994
- /Sott93/ Sottek, R.: *Modelle zur Signalverarbeitung im menschlichem Gehör*. Witterschlick/Bonn: M. Wehle Verlag Dissertation, 1993
- /Thei02/ Theis, I.: *Das Steer-by-Wire System im Kraftfahrzeug*. München: Dissertation, Technische Universität, 2002
- /Thom01/ Thompson, R.F.: *Das Gehirn - von der Nervenzelle zur Verhaltenssteuerung*. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2001
- /Thom01/ Thompson, D.: *The CIPIC HRTF Database*. Maryland: CIPIC, 2001
- /Thur67/ Thurlow, W. R.: "Effects on induced head movements on localization of direct sound". In: *Journal of Acoustical Society of America* 42, 480-487, 1347
- /Tuts98/ Rutschman, R. M.: *Physiologische Unterschiede efferenter und afferenter Bewegungsinformationsverarbeitung und deren Beziehung zur dynamischen Sehschärfe*, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Dissertation, 1998
- /Veit74/ Veit, I.: *Technische Akustik, kurz und bündig*. Würzburg: Vogel, 1974
- /Vorl01/ Vorländer, M.: *Maximalfolgen-Reziprozitätskalibrierung von Mikrofonen im Halbraum*. PTB-Bericht MA-45, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 2001
- /Wen92/ Wenzel, E. M.: „Localization in virtual acoustic displays“, In: *Presence*, vol. 1, pp. 80-107, Winter 1992
- /Wen93/ Wenzel, E. M.: „Localization using nonindividualized head-related transfer functions“, In: *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol. 94, pp 111-123, July 1993
- /Wern00/ Wernecke J.: *The Inventor Mentor*. New York: Addison Wesley, 2000 (Nachdruck)
- /Wern94a/ Wernecke J.: *The Inventor Mentor*. New York: Addison Wesley, 1994

- /Wern94b/ Wernecke J.: *The Inventor Toolmaker*. New York: Addison Wesley, 1994
- /Wess94/ Wessells, M.: *Kognitive Psychologie*. München: Reinhardt, 1994
- /Wetz71/ Wetzel, W.: *Statistische Grundausbildung für Wirtschaftswissenschaftler I – Beschreibende Statistik*. Berlin: de Gruyter, 1971
- /Wetz73/ Wetzel, W.: *Statistische Grundausbildung für Wirtschaftswissenschaftler II – Schließende Statistik*. Berlin: de Gruyter, 1973
- /Wied79/ Wiedemann, P.: *Versuche zum Richtungshören bei gleichzeitiger optischer Reizung*. Erlangen, Nürnberg: Dissertation Friedrich-Alexander-Universität, 1979
- /Wind99/ Windhorst, U.: *Modern techniques in neuroscience research*. Berlin: Springer, 1999
- /Woda95/ Wodaski, R.: *Virtual Reality für Insider*. Haar bei München: Sams, 1995
- /Xian91/ Xiang, N.: *A mobile universal measuring system for the binaural room acoustic modelling technique*. Bremerhafen: Wirtschaftsverlag NW, 1991
- /Zimb78/ Zimbardo, P. G.: *Lehrbuch der Psychologie*. Berlin: Springer, 1978
- /Zimb95/ Zimbardo, P. G.: *Psychologie*. Berlin: Springer, 1995
- /Zimb99/ Zimbardo, P. G.: *Psychologie*. Berlin: Springer, 1999
- /Zoll93/ Zollner, M.: *Elektroakustik*. Berlin: Springer, 1993
- /Zwic67/ Zwicker, E.: *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. Stuttgart: Hirzel, 1967
- /Zwic82/ Zwicker, E.: *Psychoakustik*. Berlin: Springer, 1982