

Farbmetrisch basierte Modellentwicklung zur Farbbildoptimierung mittels genetischer Programmierung

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktoringenieur (Dr.-Ing.)
vorgelegt
im Fachbereich E - Elektrotechnik, Informationstechnik, Medientechnik
an der
Bergischen Universität Wuppertal

von
Andreas Blei

Wuppertal
Januar 2004

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand in den Jahren 1998 bis 2001 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Studiengang Kommunikationstechnologie - Druck an der Bergischen Universität Wuppertal.

Mein Dank gilt allen Mitarbeitern dieses Fachbereichs, die mir stets hilfsbereit zur Seite standen und zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. rer. nat. Stefan Brües danke ich besonders für sein in meine Person gesetztes Vertrauen und den zur Durchführung dieser Arbeit gewährten Freiraum, die diese Arbeit erst ermöglicht haben.

Für viele ergiebige Diskussionen danke ich Herrn Prof. Dr. W. Kühn, Herrn Prof. Dr. Jorge M. Rodriguez-Giles, Herrn Prof. Dr. P. Urban, Herrn Dipl.-Ing. R. Kerzmann sowie Herrn Dipl.-Ing. H. Mantler.

Nicht zuletzt möchte ich Frau Christel Blei, Frau Andrea Rey und Herrn Sven Rey für ihre grammatikalische und orthographische Unterstützung danken.

Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit liegt in der Entwicklung einer langfristig einsetzbaren und künftigen Aufgabenstellungen gerecht werdenden Lösung des Problems der von unabhängigen Bewertungs- und Manipulationsmodulen getragenen, autonomen Farbbildoptimierung. Die Schwerpunkte der Arbeit liegen in der Entwicklung einer modularen Bewertungsstruktur und dem Nachweis eines effizienten Optimierungsverfahrens.

Im Rahmen der Entwicklung der Bewertungsstruktur wird das Optimierungsziel anhand der Analyse der natürlichen Farbbilder der Reihe *ISO 12640-3 L* a* b* standard colour image data WD1* festgelegt. Hieraus resultiert ein auf der Bewertungsstruktur basierendes Optimierungsverfahren, das ein quasi optimales Farbbild hinsichtlich der Reihe ISO 12640-3 liefert. Die Anpassung der Bewertungsstruktur an andere Bezugsreihen ist durch ihre Modularität auf einfache Weise durchführbar.

Die Verwendung unabhängiger Bewertungsmodule verlangt nach einer normierten Betrachtung der einzelnen Module zur Gewährleistung ihrer Gleichwertigkeit, da jedes Modul seine eigenen Wertebereiche und Optimalwerte besitzt. Um dies zu gewährleisten werden die Ergebniswerte der einzelnen Bewertungsmodule mittels einer mehrwertigen Logik in das Intervall $[0,1]$ überführt. Ferner werden hierdurch linguistische Variablen zur Bewertung eines Farbbildes in das Optimierungsverfahren integriert, um eine problemlose Erweiterung oder Veränderung der Module zu ermöglichen.

In dieser Arbeit wird der Entwicklung einer Gesamtbewertungsfunktion zur Bestimmung der Güte eines Farbbildes besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Es wird nachgewiesen, dass eine Funktion aus unabhängigen Teilbewertungen erstellt werden kann. Die ausgewählten Bewertungsmodule dienen dem Nachweis der Existenz einer auf linguistischen Variablen basierenden Gesamtbewertungsfunktion. Zur Gewährleistung einer autonomen Farbbildoptimierung wird der CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) Bezugsfarbraum mit der CIE 1994 ΔE_{94}^* Farbabstandsformel verwendet, da dieser Bezugsfarbraum mit der Farbabstandsformel, die hinsichtlich der menschlichen Farbwahrnehmung nahezu gleichabständig ist. Diese Fest-

legung gewährleistet bei der Anwendung analytischer oder statistischer Verfahren aussagekräftige Ergebnisse.

Auf Grund der Tatsache, dass eine auf mehrwertiger Logik basierende Bewertungsfunktion i. Allg. nicht stetig differenzierbar ist, wird die Auswahl eines numerischen Optimierungsverfahrens beschränkt. Ein geeignetes Verfahren ist die genetische Programmierung, da diese die erstellte Gesamtbewertung als zu optimierende Funktion akzeptiert. Das resultierende Optimierungsverfahren liefert eine Basisvariante, die den effektiven Einsatz der genetischen Programmierung nachweist. Insbesondere wird gezeigt, dass die Anwendung zweier Voroptimierungsphasen selbst bei einer kleinen Populationsgröße die Optimierung eines Farbbildes gewährleistet.

Somit stellt das in dieser Arbeit entwickelte genetische Programm einen umfassenden Modellansatz zur Lösung des Problems der modularen autonomen Farbbildoptimierung dar. Es bietet im Gegensatz zu bisherigen Verfahren auf Grund der Unabhängigkeit der einzelnen Bewertungsmodule eine einfache Möglichkeit, Bewertungsaspekte hinzuzufügen und bestehende Aspekte an die Bedürfnisse spezieller Anwendungsgebiete anzupassen. Ferner erlaubt die verwendete geringe Populationsgröße des genetischen Programms die Durchführung des Verfahrens auf herkömmlichen Einprozessor-Computersystemen.

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation und Einleitung	15
2	Farbmetrische Grundlagen	19
2.1	System der visuellen Wahrnehmung	19
2.1.1	Farbreiz	20
2.1.2	Farbvalenz	21
2.1.3	Farbempfindung	21
2.2	Das Normvalenzsystem	23
2.2.1	Primärvalenzen	23
2.2.2	CIE-Normvalenzen	23
2.3	Berechnung von Farbabständen	24
2.3.1	Der CIE L*a*b* Bezugsfarbraum	25
2.3.2	Die Farbabstandsformel ΔE_{94}^*	26
3	Bewertung der Güte von Farbbildern	28
3.1	Festlegung des Bezugsfarbraumes	28
3.1.1	RGB-Bezugsfarbraum	29
3.1.2	Standardisierter RGB-Bezugsfarbraum	29
3.1.3	Auf sRGB basierter HSI-Bezugsfarbraum	31
3.1.4	CIELAB Farbraum mit CIE94	31
3.2	Aspekte der Güte eines Farbbildes	31
3.2.1	Bildschärfe	33
3.2.2	Farbenvielfalt	37

3.2.3	Farbverschiebung	39
3.2.4	Helligkeitsverteilung	41
3.2.5	Rauschen	44
3.2.6	Sättigungsverteilung	45
3.3	modulare Gesamtbewertung	48
3.3.1	Mehrwertige Logik	50
3.3.2	Einzelbewertungsfunktion EB_{BS}	53
3.3.3	Einzelbewertungsfunktion EB_{VF}	54
3.3.4	Einzelbewertungsfunktion EB_{FV}	55
3.3.5	Einzelbewertungsfunktion EB_{HV}	56
3.3.6	Einzelbewertungsfunktion EB_{RA}	58
3.3.7	Einzelbewertungsfunktion EB_{SV}	58
3.3.8	Festlegung der Gesamtbewertung	60
4	Manipulation von Farbbildern	62
4.1	Bildschärfe	62
4.2	Farbverschiebung	64
4.3	Helligkeit und Sättigung	65
4.3.1	allgemeine Lineartransformation	66
4.3.2	S-Transformation	67
4.3.3	Bildmanipulation	68
4.4	Rauschunterdrückung	69
5	Entwicklung eines genetischen Programms	71
5.1	Grundlagen genetischer Programmierung	71
5.1.1	Biologischer Hintergrund	72
5.1.2	Algorithmische Umsetzung	73
5.2	Umsetzung der Farbbildoptimierung	73
5.2.1	Genetische Codierung	75
5.2.2	Auswahlverfahren	77
5.2.3	Genetische Operatoren	78

5.2.4	Effektivität der GFO	79
5.3	Sicherung der Effizienz	83
5.3.1	Voroptimierungsphase 1	84
5.3.2	Voroptimierungsphase 2	87
6	Ergebnisdiskussion	89
6.1	Konvergenz der GFO	90
6.2	Effizienz der GFO	92
6.2.1	GFO ohne Voroptimierung	92
6.2.2	GFO mit Voroptimierung	93
6.3	Bewertung der GFO	96
7	Schlussbemerkung und Ausblick	98
A	Kenngrößen der GFO	100
B	sRGB Transformation	102
B.1	RGB → CIEXYZ	102
B.2	RGB ← CIEXYZ	103
C	Testbilder	104
C.1	Numerische Größen der Testbilder	104
C.2	ISO SCID LAB Bilder	105
C.3	Nicht optimierte Bilder	106
D	Testreihe "People"	108
E	Numerische Ergebnisse der ISO SCID LAB Bilder	113
F	Ergebnisse Bildbewertungen	128
G	Numerische Ergebnisse der Testbilder	135
H	Graphische Darstellung der Ergebnisse	151

Abbildungsverzeichnis

2.1	Aspekte der Farbwahrnehmung	19
2.2	Farbton und Sättigung	22
2.3	Der CIELAB Farbraum	26
3.1	Zadeh-S Funktionen	36
3.2	Verlauf des Wertes μ_{\max}^{A1}	37
3.3	Verlauf des Wertes bs	37
3.4	Verlauf des Wertes vf	38
3.5	Verlauf des Wertes fv	40
3.6	Verlauf des Wertes $\frac{ G }{nm}$	40
3.7	Verlauf des Wertes mh_2	42
3.8	Verlauf des Wertes $\frac{ah_1}{nm}$	43
3.9	Verlauf des Wertes $\frac{ah_3}{nm}$	43
3.10	Verlauf des Wertes ra	45
3.11	Verlauf des Wertes $\frac{as_1}{nm}$	47
3.12	Verlauf des Wertes $\frac{as_4}{nm}$	47
3.13	Verlauf des Wertes s_{\max}	47
3.14	Verlauf des Wertes $gs_{1_{kor}}$	48
3.15	beidseitige Zadeh S-Funktion	51
3.16	Verallgemeinerte Trapezfunktion	52
4.1	Ausgleichsfaktor $lw_{i,j}$	64
4.2	allgemeine Lineartransformation	66
4.3	S-Transformation	67

4.4	$T_L(L_{i,j}, 0.6, 0.7)$	68
4.5	$T_S(L_{i,j}, 0.2, 2.4)$	68
4.6	$T_S(L_{i,j}, 0.8, 2.7)$	69
4.7	$M_L(P)$	69
5.1	Genetisches Programm	74
5.2	Verläufe der GFO bzgl. Konzept [15 + 105]	80
5.3	Verläufe der GFO bzgl. Konzept [75 + 525]	81
5.4	Verläufe der GFO bzgl. Konzept [150 + 1050]	82
5.5	Verläufe der GFO bzgl. Variation Kontrast	84
5.6	Durchschnittliche Verläufe der GFO mit VO	88
6.1	GFO ohne Vorooptimierung, "Berge"	91
6.2	GFO ohne Vorooptimierung, [15 + 105]-Konzept	92
6.3	GFO ohne Vorooptimierung, [150 + 1050]-Konzept	93
6.4	GFO mit Vorooptimierung, [15 + 105]-Konzept	94
6.5	GFO mit Vorooptimierung, [75 + 525]-Konzept	95
6.6	GFO mit Vorooptimierung, [150 + 1050]-Konzept	95
C.1	Bride & groom	105
C.2	People	105
C.3	Cashew nuts	105
C.4	Meal	105
C.5	Mandolin	106
C.6	Tailor	106
C.7	Berge	106
C.8	Frau	106
C.9	Haus	107
C.10	Kind	107
C.11	Stadt	107
D.1	People	108

D.2	People_Scharf1	108
D.3	People_Scharf3	108
D.4	People_Unscharf1	108
D.5	People_Unscharf5	109
D.6	People_Rot10	109
D.7	People_Rot40	109
D.8	People_Cyan10	109
D.9	People_Cyan40	109
D.10	People_Rausch15	109
D.11	People_Rausch60	110
D.12	People_Kontr+15	110
D.13	People_Kontr+60	110
D.14	People_Kontr-15	110
D.15	People_Kontr-60	110
D.16	People_Hell+15	110
D.17	People_Hell+60	111
D.18	People_Hell-15	111
D.19	People_Hell-60	111
D.20	People_Sätt+15	111
D.21	People_Sätt+60	111
D.22	People_Sätt-15	111
D.23	People_Sätt-60	112
H.1	Variationen der Helligkeit	151
H.2	Variationen des Kontrastes	152
H.3	Variationen der Farbbalance	152
H.4	Variationen der Bildschärfe	153
H.5	GFO ohne Vorooptimierung, "Berge"	153
H.6	GFO ohne Vorooptimierung, "Frau"	154
H.7	GFO ohne Vorooptimierung, "Haus"	154
H.8	GFO ohne Vorooptimierung, "Kind"	155

H.9	GFO ohne Voroptimierung, "Stadt"	155
I.1	VOP1 "Berge"	156
I.2	GFO "Berge"	156
I.3	VOP1 "Frau"	156
I.4	GFO "Frau"	156
I.5	VOP1 "Haus"	157
I.6	GFO "Haus"	157
I.7	VOP1 "Kind"	157
I.8	GFO "Kind"	157
I.9	VOP1 "Stadt"	158
I.10	GFO "Stadt"	158

Tabellenverzeichnis

2.1	Normfarbwerte der CIE Normlichtarten	24
3.1	Rechenaufwand einer DFT	32
5.1	Verhalten der GFO bzgl. erzieltm Ergebnis	80
5.2	Verhalten der GFO bzgl. Anzahl der Iterationen	80
5.3	Verhalten der GFO bzgl. variiertes Ausgangsbilder	83
5.4	Voroptimierungsphase 1	86
5.5	Verhalten VOP2, Testbild "Berge"	87
5.6	Ergebnisse der GFO mit VO	87
5.7	Anzahl der Iterationen der GFO mit VO	88
6.1	Steigerung der Bewertung durch die GFO	91
6.2	Ergebnisse der VOP1 und VOP2	93
6.3	Vergleich der Anzahl der Iterationen	94
6.4	GFO im Vergleich zur VOP1	97
C.1	ISO SCID LAB Testbilder	104
C.2	Nicht optimierte Testbilder	104
E.1	Farbvielfalt	113
E.2	Bildschärfe I	114
E.3	Bildschärfe II	115
E.4	Farbverschiebung	116
E.5	Helligkeitsverteilung	117
E.6	Rauschen	118

E.7	Sättigungsverteilung I	119
E.8	Sättigungsverteilung II	120
E.9	Zugehörigkeitsfunktionen der Bildschärfe	121
E.10	Zugehörigkeitsfunktionen der Farbenvielfalt	122
E.11	Zugehörigkeitsfunktion der Farbverschiebung	123
E.12	Zugehörigkeitsfunktionen der Helligkeitsverteilung	124
E.13	Zugehörigkeitsfunktionen der Sättigungsverteilung	125
E.14	"People" Gesamtbewertungen I	126
E.15	"People" Gesamtbewertungen II	127
F.1	Ergebnisse II der Formeln 3.1 und 3.2	128
F.2	Ergebnisse II der Formeln 3.3	129
F.3	Ergebnisse II der Formeln 3.5	129
F.4	Ergebnisse II der Formeln 3.7	130
F.5	Ergebnisse II der Formeln 3.9	130
F.6	Ergebnisse II der Formeln 3.11	131
F.7	Ergebnisse II der Formeln 3.13	131
F.8	Ergebnisse II der Formeln 3.14	132
F.9	Chromosomen GFO ohne VO	133
F.10	Chromosomen GFO mit VO	134
G.1	durch. Verläufe, Berge ohne VO	135
G.2	extreme Verläufe, Berge ohne VO	136
G.3	durch. Verläufe, Frau ohne VO	137
G.4	extreme Verläufe, Frau ohne VO	138
G.5	durch. Verläufe, Haus ohne VO	139
G.6	extreme Verläufe, Haus ohne VO	140
G.7	durch. Verläufe, Kind ohne VO	141
G.8	extreme Verläufe, Kind ohne VO	142
G.9	durch. Verläufe, Stadt ohne VO	143
G.10	extreme Verläufe, Stadt ohne VO	144

G.11 durch. Verläufe, Berge mit VO	145
G.12 extreme Verläufe, Berge mit VO	145
G.13 durch. Verläufe, Frau mit VO	146
G.14 extreme Verläufe, Frau mit VO	146
G.15 durch. Verläufe, Haus mit VO	147
G.16 extreme Verläufe, Haus mit VO	147
G.17 durch. Verläufe, Kind mit VO	148
G.18 extreme Verläufe, Kind mit VO	148
G.19 durch. Verläufe, Stadt mit VO	149
G.20 extreme Verläufe, Stadt mit VO	149
G.21 Voroptimierungsphase 1	150

Kapitel 1

Motivation und Einleitung

Die Entwicklung eines Verfahrens zur modularen und autonomen Verbesserung von Farbbildern stellt eine Forschungsrichtung mit Anwendungsfeldern in der Medienindustrie sowie im Bereich der digitalen Bildverarbeitung dar. In beiden Gebieten ist ein Farbbild, das von einem Normalbeobachter als optimal empfunden wird, für eine weitere Bearbeitung von sehr großer Bedeutung. Insbesondere muss ein Verbesserungsverfahren neben einem quasi optimal empfundenen auch ein reproduzierbares Ergebnis liefern.

In der Medienindustrie ermöglicht das Verfahren eine effektivere Nutzung der Produktionsressourcen auf Grund der Tatsache, dass der Reproduktionstechniker von Routineaufgaben entlastet wird und sich auf die Korrektur von lokalen Farbbildfehlern konzentrieren kann. Ein weiterer Vorteil liegt in der Modularität, die wegen ihrer Ergänzungsfähigkeit und Erweiterbarkeit eine einfache Anpassung an die Erfordernisse eines beliebigen Projektes erlaubt. Auf dem Gebiet der digitalen Bildverarbeitung dient das Verfahren der Gewährleistung der Güte eines Farbbildes, so dass nachfolgende Programme ohne Analyse der Bildqualität genutzt werden können. Insbesondere im Bereich der Segmentierung, Texturerkennung und Objektklassifikation erhöht ein optimal empfundenes Ausgangsbild die Effektivität vorhandener Algorithmen, da ein solches Ausgangsbild nicht mehr hinsichtlich globaler Gütekriterien wie z.B. Schärfe, Kontrast und Farbverschiebung analysiert werden muss.

Die Entwicklung eines genetischen Verfahrens zur Farbbildoptimierung scheitert in der bisher einzigen Arbeit (siehe [Shyu98]) an zwei grundsätzlichen Problemen. Erstens wird zur Bewertung der Güte eines Farbbildes eine komplexe Funktion der Form

$$b_g(p) = a_1 \frac{b_1(p)^{a_2}}{a_3 b_2(p)^{b_3(p)}} - \frac{b_4(p)^2}{a_4}$$

mit Teilbewertungsfunktionen $b_1(p), \dots, b_4(p)$ und feststehenden reellen Werten a_1, \dots, a_4 herangezogen und anschließend numerisch optimiert. Dieser Ansatz

behindert sowohl die Erweiterung der Gesamtfunktion um eine zusätzliche Teilfunktion als auch den Austausch einer vorhandenen Teilfunktion immens, da in das Gefüge der vorhandenen Teilfunktionen mit ihren Wertebereichen und Optimalwerten eingegriffen werden muss. Offensichtlich kann i. Allg. in der Funktion $b_g(p)$ eine beliebige Teilfunktion $b_i(p)$, $i \in \{1, \dots, 4\}$ mit einem Wertebereich von $0 \leq b_i(p) \leq 100$ und einem Optimalwert von 50 nicht direkt durch eine neue Teilfunktion mit einem Wertebereich von $0 \leq b_i(p) \leq 1$ und einem Optimalwert von 0 ersetzt werden. Das Hindernis bei der Integration einer zusätzlichen Teilbewertungsfunktion $b_5(p)$ besteht in der einzigartigen Abstimmung der existierenden Teilfunktionen zueinander. Folglich muss i.a die Gesamtfunktion $b_g(p)$ komplett neu bestimmt werden, damit die Funktion $b_5(p)$ richtig integriert wird. Diese Neubestimmung ist sehr zeitintensiv, da hierbei alle Wertebereiche und Optimalwerte in ihrem Zusammenspiel zu berücksichtigen sind.

Das zweite Problem liegt in der Wahl eines Bezugsfarbraumes, der die Gleichabständigkeit hinsichtlich der menschlichen visuellen Wahrnehmung nicht gewährleistet. Offensichtlich kann dies bei der Bewertung der Güte eines Farbbildes, die auf analytischen oder statistischen Verfahren beruht, zu Fehlbewertungen führen, die eine Optimierung des Farbbildes erschweren oder verhindern.

Die folgende Arbeit verfolgt das Ziel, eine modulare Bewertungsstruktur zur Bestimmung der Güte eines Farbbildes unter Berücksichtigung der menschlichen visuellen Wahrnehmung aufzubauen und diese mit Hilfe eines geeigneten numerischen Optimierungsverfahrens softwaretechnisch umzusetzen. Bei der Umsetzung wird darauf geachtet, dass der entwickelte Algorithmus einerseits vollkommen autonom arbeitet andererseits durch elementare Eingriffe an spezielle Aufgabenstellungen angepasst werden kann.

Den thematischen Zugang zu dieser Arbeit bildet eine Aufarbeitung farbmetrischer Grundlagen in Kapitel 2. Es werden das Schema der Farbempfindung sowie drei der existierenden Farbkennzeichnungssysteme vorgestellt. Die dargelegten Fakten stellen den Ausgangspunkt in der Modellierung einer Farbbildbewertungsstruktur dar. Sie begründen die Auswahl des Bezugsfarbraumes CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) mit der CIE 1994 ΔE_{94}^* Farbabstandsformel für die Festlegung der Güte eines Farbbildes innerhalb eines autonomen, numerischen Verfahrens.

Auf die Wahl des Bezugsfarbraumes folgt die Entwicklung einer modularen Bewertungsfunktion $b_g(p)$ zur Bestimmung der Güte eines Farbbildes im Kapitel 3. Zum Nachweis der Modularität wird gezeigt, dass eine Funktion der Form

$$b_g(p) = b_1(p)^{w_1} \cdot \dots \cdot b_r(p)^{w_r}$$

mit

$$0 \leq b_i(p) \leq 1 \quad : \quad i \in \{1, \dots, r\}$$
$$\sum_{i=1}^r w_i = 1$$

wohldefiniert gebildet werden kann. Die Existenz einer solchen Funktion $b_g(p)$ erlaubt es auf einfache Weise, beliebige Teilbewertungen zu einer Gesamtbewertung zusammenzufügen. Diese Integration erfolgt durch auf mehrwertiger Logik basierenden Funktionen μ_i mit $i \in \{1, \dots, 4\}$, die ihren zugehörigen Bewertungsfunktionen b_i hinsichtlich linguistischer Variablen einen Wert im Intervall $[0, 1]$ zuordnen. Im Rahmen dieser Arbeit werden sechs Teilbewertungen für die Güte der Bildschärfe, Farbverschiebung, Farbvielfalt, Rauschfreiheit, Helligkeits- und Farbsättigungsverteilung eines Bildes eingeführt mit deren Hilfe i. Allg. die Qualität eines Farbbildes hinsichtlich der Betrachtung durch einen Normalbeobachter hinreichend erfasst wird (siehe [Jaco00]). Die Einordnung der jeweiligen linguistischen Variablen orientiert sich am Optimierungsziel, das anhand der Reihe *ISO 12640-3 L* a* b* standard colour image data WD1* festgelegt ist. Folglich sind die Ergebnisse der Teilbewertungen immer in Bezug auf diese Reihe zu interpretieren.

Zur Entwicklung eines numerischen Verfahrens ist es notwendig ein Farbbild zu manipulieren. Ein Betrachtung von Manipulationsfunktionen erfolgt in Kapitel 4. Hierbei werden elementare Verfahren ausgewählt, die eine Verbesserung in den bewerteten Bereichen gewährleisten (siehe [Klet92]). Zum Nachweis der allgemeinen Anwendbarkeit und Erweiterbarkeit des Verfahrens werden sowohl globale als auch lokale Manipulationsfunktionen M_i der Form

$$p_{neu} = M_i(p_{alt}, a_1, \dots, a_s) \quad : \quad i \in \{1, \dots, t\}$$

mit Veränderungsparametern a_1, \dots, a_s verwendet.

Die Umsetzung der im 3. und 4. Kapitel erarbeiteten Sachverhalte erfolgt durch die Auswahl eines geeigneten numerischen Verfahrens und seiner softwaretechnische Umsetzung in Kapitel 5. Es wird gezeigt, dass ein genetisches Programm geeignet ist, die vorhandenen Bewertungs- und Manipulationsfunktionen in einem Algorithmus zu vereinigen. Die Umsetzung beruht auf der Gleichsetzung der Veränderungsparameter mit den Chromosomen und der Gesamtbewertung mit der Fitness eines genetischen Programms. Hierbei wird aus der Menge der genetischen Programme die Evolutionsstrategie ausgewählt und in ein Computerprogramm umgesetzt. Abschließend wird nachgewiesen, dass der Basisalgorithmus durch zwei Voroptimierungsphasen erheblich verbessert wird.

Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6. Hierbei ergibt sich, dass das genetische Programm sowohl quasi optimale Farbbilder hinsichtlich der Bezugsreihe produziert als auch die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

Die entstandene Programmstruktur lässt sich mit herkömmlichen Einprozessor-Computersystemen umsetzen und bietet auf Grund ihrer Modularität und einfachen Zugängigkeit den Ausgangspunkt für weitere Forschungen in den Bereichen Farbbildbewertung, Farbbildmanipulation und genetische Programmierung.

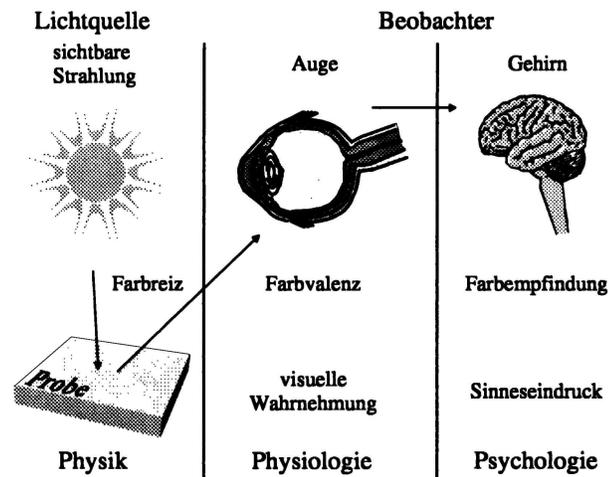
Kapitel 2

Farbmetrische Grundlagen

In diesem Kapitel werden grundlegende Begriffe und Sachverhalte zusammengefasst dargestellt. Hierbei liegt der Schwerpunkt auf dem Bezugsfarbraum, der dem autonomen Verfahren zur Farbbildoptimierung zu Grunde liegt. Für eine ausführliche Erörterung sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (siehe [Wysz82], [Levi85], [Fair98]).

2.1 System der visuellen Wahrnehmung

Die neuronale Verarbeitung von Lichtimpulsen, die auf die Retina treffen, bis zum



([Otto96], Seite 10)

Abbildung 2.1: Aspekte der Farbwahrnehmung

entstehenden Bild im Gehirn ist ein sehr komplexer Vorgang.

Hierbei spielen Aspekte aus den Bereichen Physik, Physiologie und Psychologie eine wichtige Rolle (siehe Abbildung 2.1). Im folgenden werden diese Aspekte hinsichtlich der für diese Arbeit notwendigen Grundbegriffe eingeführt. Eine detaillierte Betrachtung dieses komplexen Zusammenhangs ist in der weiterführenden Literatur zu finden (siehe [Fair98], [Irte91], [Rich81], [Schl93], [Wysz82]).

2.1.1 Farbreiz

Der Farbreiz stellt die physikalische Ursache von Farbvalenz und Farbempfindung dar. Er repräsentiert die von den lichtempfindlichen Sinneszellen des Auges (Zapfen) absorbierte Strahlungsleistung. Dieser Vorgang wird durch die Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$ dargestellt, wobei für

- Lichtarten
$$\varphi(\lambda) = S(\lambda)$$
- remittierende Stoffe
$$\varphi(\lambda) = S(\lambda) \cdot \beta(\lambda)$$

mit

- $\lambda \in [380, 780] \text{ nm}$
- $S(\lambda)$: relative spektrale Strahlungsverteilung der beleuchtenden Lichtart
- $\beta(\lambda)$: spektraler Remissionsgrad des bestrahlten Körpers

gilt. Der Farbreiz ist unmittelbar mit der beleuchtenden Lichtquelle verbunden. Zur Beschreibung einer Lichtquelle wird der Begriff der Farbtemperatur benutzt (siehe [Fair98], Seite 68f; [Fiel99], Seite 40f). Für die Farbtemperaturen der natürlichen Lichtquellen ist festzuhalten, dass ihre Farbtemperaturen nur einen Richtwert darstellen, da die relativen Strahlungsverteilungen nicht konstant sind.

Zur wohldefinierten Betrachtung von Objekten wurden von der *Commission Internationale de l'Eclairage* (Kurzform: CIE) mehrere Normlichtarten festgelegt:

- CIE Normlichtart A stellt einen Planckschen Strahler (i. Allg. eine Wolfram-Glühlampe) mit einer Farbtemperatur von 2856 K dar.
- CIE Normlichtart D65 und D50 basieren auf Messungen des realen Tageslichtes. Sie sind ohne Bezug auf einen Planckschen Strahler festgelegt und repräsentieren ein mittleres Tageslicht von 6504 K bzw. 5003 K.
- Lichtart E steht für das energiereiche Spektrum mit einer relativen Strahlungsenergie von 100 über alle Wellenlängen.

2.1.2 Farbvalenz

Der physiologische Aspekt der Farbwahrnehmung betrifft die neuronale Umsetzung des physikalischen Farbreizes im Auge. Diese Umsetzung der elektromagnetischen Strahlung in neuronale Signale findet in der Netzhaut statt. Die Netzhaut ist aus lichtempfindlichen Sinneszellen, den Stäbchen und Zapfen aufgebaut, wobei drei Arten von Zapfen und nur eine Art von Stäbchen existieren. Die höchste Anzahl (pro Quadratmillimeter) der Zapfen sind in der stäbchenfreien Fovea, der Stelle schärfsten Sehens, zu finden (siehe [Prat91], Seite 26). Für eine eingehende detaillierte Schilderung sei an dieser Stelle auf die Fachliteratur verwiesen (siehe [Hend97], [Levi85], [Sitt93]).

Die Stäbchen sind für das Sehen bei geringen Leuchtdichten ($< 0.1 \text{ cd/m}^2$) allein zuständig, während die Zapfen bei hohen Leuchtdichten ($> 30 \text{ cd/m}^2$) allein wirksam sind. Diese beiden Zustände werden als skotopisches (Nacht-) und photopisches (Tages-) Sehen bezeichnet. Zur Veranschaulichung des Tages- und Nachtsehens dienen die spektralen Helligkeitskurven des fotometrischen Normalbeobachters, die von der CIE im Jahre 1924 für das Tagessehen und 1951 für das Nachtsehen standardisiert wurden. Beide Kurven wurden auf ein relatives Maximum von 1 normiert, daher bleibt zu beachten, dass die Stäbchen ca. 100-200 mal empfindlicher als die Zapfen reagieren.

Die farbliche Unterscheidung der wahrgenommenen Strahlung wird durch das Zusammenwirken der drei Zapfenarten ermöglicht. Wobei unterschiedliche Strahlungsverteilungen zu verschiedenen Erregungszuständen der Zapfenarten führen. Im Falle des Tagessehens liefern die drei Einzelerregungen eine Gesamtwirkung, die als *Farbvalenz* bezeichnet wird. Den Einzelerregungen der Zapfenarten werden in diesen Fällen die jeweiligen spektralen Empfindlichkeitskurven $\bar{p}(\lambda)$, $\bar{d}(\lambda)$ und $\bar{t}(\lambda)$ zugeordnet.

2.1.3 Farbempfindung

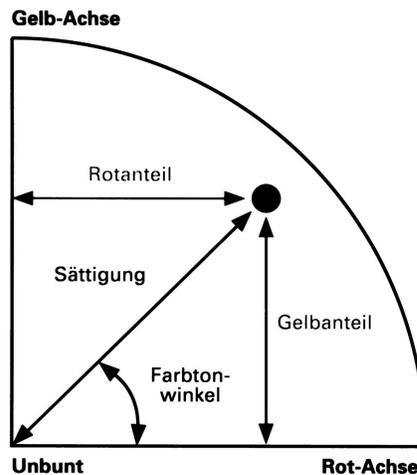
Die Verarbeitung der Farbvalenz im Gehirn führt zur Farbempfindung. Die Farbempfindung beruht nicht nur auf der Farbvalenz, sondern auch auf den Umfeldbedingungen.

Ein Aspekt der Farbempfindung liegt in der Tatsache, dass die Farbenpaare Rot-Grün und Blau-Gelb als gegensätzlich wahrgenommen werden. Beispiele hierfür sind (siehe [Schl93], Seite 36):

- Eine graue Fläche erscheint auf einem grünen Hintergrund rötlich, während sie auf einem gelben Hintergrund bläulich erscheint.

- Fixiert man das Auge eine gewisse Zeit auf einen roten Kreis und blickt nachher auf eine weisse Fläche, so erscheint ein grüner Kreis als Nachbild. Im Falle eines gelben Kreises ist es ein blaues Nachbild.

Die Gegensätzlichkeit der Farbenpaare Rot-Grün und Blau-Gelb führt zu einem Farbordnungssystem in dem eine Farbvalenz anhand ihres jeweiligen Rot-Grün- und Blau-Gelb-, sowie eines Schwarz-Weiss-Anteils klassifiziert wird. Auf Grund der Tatsache, dass der Rot-Grün- und Blau-Gelb-Anteil einen Punkt in einem kartesischen Koordinatensystem repräsentieren, lassen sich durch eine Transformation in ein Polarkoordinatensystem die für den Normalbeobachter gebräuchlichere Klassifizierung in *Farbton* und *Sättigung* herleiten (siehe [Irte91], Seite 36f und Abbildung 2.2). Der Weg von der Farbvalenz zur Farbempfindung verläuft



([Schl93], Seite 40)

Abbildung 2.2: Farbton und Sättigung

vereinfacht in drei Schritten (siehe [Pomi96], Seite 30ff):

1. Aufteilung der Farbvalenz in einen Rot-Grün-, Blau-Gelb- und Schwarz-Weiss-Anteil.
2. Bestimmung des Farbtons und der Sättigung aus dem Rot-Grün- und Blau-Gelb-Anteil, sowie der Helligkeit aus dem Schwarz-Weiss-Anteil.
3. Kombination von Farbton, Sättigung und Helligkeit zur Farbempfindung

2.2 Das Normvalenzsystem

Um eine einheitliche und wohldefinierte Farbbeschreibung mittels Farbwerten zu ermöglichen, ist eine Festlegung von Primärvalenzen notwendig.

2.2.1 Primärvalenzen

Die CIE legte im Jahre 1931 die Primärvalenzen auf

$$\begin{aligned} R &: \lambda = 700.0 \text{ nm mit } S(\lambda) = 72.096 \\ G &: \lambda = 546.1 \text{ nm mit } S(\lambda) = 1.379 \\ B &: \lambda = 435.8 \text{ nm mit } S(\lambda) = 1.000 \end{aligned}$$

und die zugehörigen Spektralwertkurven $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ des farbmetrischen 2°-Normalbeobachters fest. Mit Hilfe dieser Spektralwertkurven kann der Zusammenhang zwischen einem physikalischen Farbreiz $\varphi(\lambda)$ und der resultierenden Farbvalenz F durch

$$F = RR + GG + BB$$

mit den Farbwerten

$$\begin{aligned} R &= \int \varphi(\lambda) \bar{r}(\lambda) \, d\lambda \\ G &= \int \varphi(\lambda) \bar{g}(\lambda) \, d\lambda \\ B &= \int \varphi(\lambda) \bar{b}(\lambda) \, d\lambda \end{aligned}$$

beschrieben werden. Der entscheidende Nachteil dieser Darstellung für die Festlegung von Farbwerten liegt in den möglichen negativen Spektralwerten, die eine uneigentliche additive Farbmischung erzwingen.

2.2.2 CIE-Normvalenzen

Zur Lösung des Problems der negativen Spektralwerte wurden von der CIE im Jahre 1931 drei virtuelle Primärvalenzen (X, Y, Z) so festgelegt, dass jede existierende Farbvalenz durch nicht negative Farbwerte beschrieben wird. Diese virtuellen Primärvalenzen werden als *Normvalenzen* bezeichnet (siehe DIN 5033). Die lineare Abhängigkeit der reellen und virtuellen Primärvalenzen wird durch

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.41845 & -0.09116 & 0.00092 \\ -0.15865 & 0.25242 & -0.00255 \\ -0.08283 & 0.01571 & 0.17859 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}$$

verdeutlicht. Dem Normvalenzsystem liegen die Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ zu Grunde. Somit kann eine Farbvalenz F basierend auf ihrem Farbreiz $\varphi(\lambda)$ durch

$$F = XX + YY + ZZ$$

mit den Normfarbwerten

$$X = k \int \varphi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int \varphi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = k \int \varphi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

und dem Maßstabsfaktor

$$k = \frac{100}{\int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

unter Berücksichtigung der spektralen Strahlungsverteilungskurve $S(\lambda)$ beschrieben werden. Offensichtlich lassen sich alle Farbvalenzen durch positive Normfarbwerte beschreiben. Dies ist ein entscheidender Vorteil gegenüber dem System der Primärvalenzen. Ferner ergibt sich auf Grund der Wahl des Maßstabsfaktors k für eine ideal weiße Fläche ($\beta(\lambda) \equiv 1$) ein Normfarbwert Y von stets 100. Unter der Lichtart E nehmen ebenfalls die Normfarbwerte X , Z den Wert 100 an. Für andere Lichtquellen ergeben sich unterschiedliche Farbvalenzen der ideal weißen Fläche wie Tabelle 2.1 verdeutlicht.

CIE Normlichtart				
	A	D65	D50	E
X	109.85	95.05	96.42	100
Y	100	100	100	100
Z	35.58	108.88	82.49	100

Tabelle 2.1: Normfarbwerte der CIE Normlichtarten

2.3 Berechnung von Farbabständen

Mit Hilfe der CIE-Normfarbwerte (bzw. Normfarbwertanteile) ist es möglich zu entscheiden ob zwei Farbvalenzen gleich oder verschieden sind. Im Folgenden ist von Bedeutung wie groß der Unterschied zweier Farbvalenzen ist. Die naheliegende Lösung einer Beschreibung des Farbabstandes zweier Farbvalenzen F_1 , F_2 durch

$$\Delta F = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2 + (Z_1 - Z_2)^2}$$

scheitert an der Tatsache, dass das CIE Farbdreieck visuell nicht gleichabständig ist. Dies wurde im Jahre 1942 durch D.L. MacAdam nachgewiesen und durch die nach ihm benannten Ellipsen zum Ausdruck gebracht. Ein Ansatz zur Entwicklung eines visuell gleichabständigen Bezugsfarbraumes beruht auf der in Unterabschnitt 2.1.3 eingeführten Gegenfarbtheorie und wird im Folgenden betrachtet.

2.3.1 Der CIE L*a*b* Bezugsfarbraum

Die CIE legte im Jahre 1976 den L*a*b* Bezugsfarbraum (kurz: CIELAB Farbraum) durch

$$L^* = \begin{cases} 116\sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16 & : \frac{Y}{Y_n} > 0.008856 \\ 903.3\frac{Y}{Y_n} & : \frac{Y}{Y_n} \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

mit

$$f(Q) = \begin{cases} \sqrt[3]{Q} & : Q > 0.008856 \\ 7.787Q + \frac{16}{116} & : Q \leq 0.008856 \end{cases}$$

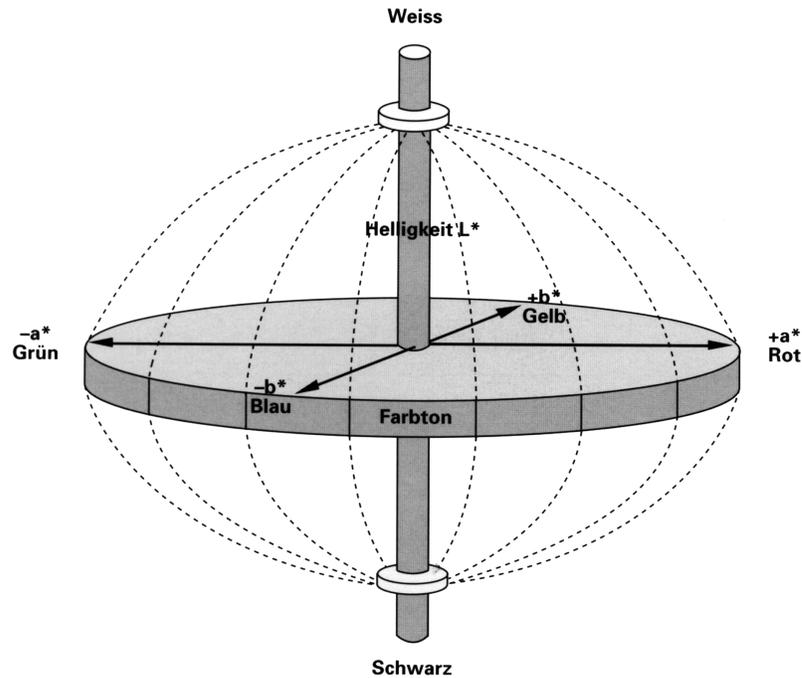
$X_n, Y_n, Z_n \hat{=}$ Normfarbwerte des Referenzweiß

fest. Die Normfarbwerte X_n, Y_n, Z_n entsprechen normalerweise den Normfarbwerten der zu Grunde liegenden CIE Normlichtart. Die Abbildung 2.3 diene der Veranschaulichung des CIELAB Farbraums. Die Beschreibung des Farbtons h_{ab} und der Sättigung C_{ab}^* einer Farbvalenz wird durch

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h_{ab} = \begin{cases} 0^\circ & : a^* > 0 \wedge b^* = 0 \\ 90^\circ & : a^* = 0 \wedge b^* > 0 \\ 180^\circ & : a^* < 0 \wedge b^* = 0 \\ 270^\circ & : a^* = 0 \wedge b^* < 0 \\ \left[\frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \right]^\circ & : a^* > 0 \wedge b^* > 0 \\ \left[180 + \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \right]^\circ & : a^* < 0 \wedge b^* \neq 0 \\ \left[360 + \frac{180}{\pi} \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) \right]^\circ & : a^* > 0 \wedge b^* < 0 \end{cases}$$

erzielt. Abschließend muss erwähnt werden, dass der CIELAB Farbraum einen Kompromiss hinsichtlich der visuellen Gleichabständigkeit und der einfachen Umrechnung der Normfarbwerte X , Y , Z darstellt.



([Schl93], Seite 78)

Abbildung 2.3: Der CIELAB Farbraum

2.3.2 Die Farbabstandsformel ΔE_{94}^*

Zur Bewertung zweier Farbvalenzen F_1 , F_2 innerhalb des CIELAB Farbraumes diente zwischen 1976 und 1994 der euklidische Abstand

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

mit

$$\begin{aligned} \Delta L^* &= |L_1^* - L_2^*| \\ \Delta a^* &= |a_1^* - a_2^*| \\ \Delta b^* &= |b_1^* - b_2^*|. \end{aligned}$$

Unter Bezug auf Farbton und Sättigung lässt sich der euklidische Farbabstand durch

$$\Delta E_{ab}^* = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta C_{ab}^{*2} + \Delta H_{ab}^{*2}}$$

mit

$$\Delta H_{ab}^* = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2}}$$

beschreiben. Es zeigte sich, dass die mit der Farbabstandsformel ΔE_{ab}^* gewonnenen Ergebnisse abhängig von der Position der verglichenen Farbvalenzen im CIELAB Farbraum waren. Um dieses Problem zu beheben wurde von der CIE im Jahre 1994 das Farbabstandsmodell CIE 1994 ($\Delta L^* \Delta C_{ab}^* \Delta H_{ab}^*$) (kurz: CIE94) unter Verwendung der Farbabstandsformel

$$\Delta E_{94}^* = \sqrt{\frac{\Delta L^{*2}}{k_L S_L} + \frac{\Delta C^{*2}}{k_C S_C} + \frac{\Delta H^{*2}}{k_H S_H}}$$

mit

$$\begin{aligned} S_L &= 1 \\ S_C &= 1 + 0.045 C_{ab}^* \\ S_H &= 1 + 0.015 C_{ab}^* \\ C_{ab}^* &= \begin{cases} C_{ab,Bezug}^* & : \text{ feste Bezugsfarbvalenz} \\ \sqrt{C_{ab,Bezug}^* C_{ab,Probe}^*} & : \text{ Bezugs- und Probenfarbvalenz gleichwertig} \end{cases} \end{aligned}$$

festgelegt ([Witt95]). Die k-Parameter dienen dazu, die Farbabstandsformel an verschiedene Betrachtungsbedingungen anzupassen. Bei einer Festlegung von $k_L = k_C = k_H = 1$ gelten die folgenden von der CIE im Jahre 1995 festgelegten Betrachtungsbedingungen ([Schl97]):

CIE Normlichtart:	D65
Beleuchtungsstärke:	1000 lux
Umfeld:	mittleres Grau ($L^*=50$)
Probengröße:	$>4^\circ$ (bezogen auf das Gesichtsfeld)
Probenanordnung:	Kante an Kante
Farbabstand der Proben:	0 bis 5 CIELAB Standardeinheiten

Ein wichtiger Aspekt des CIE94 liegt in der empfindlicheren Bewertung von Farbvalenzen mit geringer Sättigung gegenüber Farbvalenzen mit hoher Sättigung. Ein Umstand der mit der visuellen Wahrnehmung übereinstimmt.

Kapitel 3

Bewertung der Güte von Farbbildern

Die Bewertung der Güte von Farbbildern unterliegt einer komplexeren Vorgehensweise als die Gütebewertung von schwarz-weiß Bildern. Dieser Umstand beruht primär auf der Tatsache, dass Farbbilder mehrkanalig kodiert sind. Folglich ist eine direkte Übernahme der Bewertungskriterien aus dem Bereich der einkanaligen Bilder nicht möglich. Zur Entwicklung einer autonomen und modularen Gütebewertungsfunktion von Farbbildern müssen ein Bezugsfarbraum und die einzelnen Gütefaktoren ausgewählt werden.

3.1 Festlegung des Bezugsfarbraumes

Die Hauptforderung an den benutzten Bezugsfarbraum ergibt sich zwangsläufig aus der Notwendigkeit Farbunterschiede mathematisch zu erfassen, um sie anschließend analytisch oder statistisch auswerten zu können. Damit diese Auswertung eine stichhaltige, allgemeingültige Aussage über die Güte eines beliebigen Farbbildes erlaubt, muss der zu Grunde liegende Bezugsfarbraum visuelle Gleichabständigkeit gewährleisten, da ansonsten das Ergebnis einer analytischen oder statistischen Auswertung abhängig von der Lage der Bildpunkte im Bezugsfarbraum ist und folglich die Allgemeingültigkeit der Güteaussage nicht gegeben wäre.

Die zweite Forderung ergibt sich aus der menschlichen Farbempfindung, die auf den Attributen *Helligkeit*, *Sättigung* und *Farbton* basiert. Folglich muss zur Gewährleistung einer einfachen modularen Struktur der Gütebewertung ein wahrnehmungsorientierter Bezugsfarbraum verwendet werden. Im Falle der Auswahl eines physikalisch-technischen Bezugsfarbraumes ist zwar eine modulare Gütebe-

wertung möglich, jedoch erhöht sich die Komplexität der Einzelmodule durch die notwendige gleichzeitige Betrachtung des gesamten Farbwertes deutlich.

Unter Berücksichtigung der obigen beiden Forderungen werden die folgenden Bezugsfarbräume hinsichtlich ihrer Eignung zur Festlegung einer autonomen, modularen Gütebewertungsfunktion betrachtet. Die Auswahl beruht zum einen auf den geläufigen Bezugsfarbräumen im Bereich der Farbbildverbesserung und zum anderen auf der Tatsache, dass ein beliebiges Farbbild vollkommen autonom verbessert werden soll. Ein Hinweis auf weitere mögliche Bezugsfarbräume erfolgt in Kapitel 7.

3.1.1 RGB-Bezugsfarbraum

Der RGB-Bezugsfarbraum bildet in vielen Veröffentlichungen (siehe beispielsweise [Mogh97], [Reit98], [Voic97]) die Basis der Betrachtung, obwohl er die aufgestellten Forderungen nach visueller Gleichabständigkeit und Wahrnehmungsorientierung nicht erfüllt (siehe 3.1.2). Ein weiteres Problem stellt die Existenz verschiedener Basen des RGB-Bezugsfarbraumes wie beispielsweise die *EBU Tech. 3213* und die *Recommendation ITU-R BT.709* (siehe [Poyn96], Seite 134ff) dar. Dieser Umstand beruht auf der geräteabhängigen Wahl der Linearfaktoren R , G , B . Folglich verhindert der hieraus resultierende undefinierte Zustand die Bestimmung einer vollkommen autonomen Gütebewertung beliebiger Farbbilder.

3.1.2 Standardisierter RGB-Bezugsfarbraum

Der standardisierte RGB-Bezugsfarbraum (kurz: sRGB Farbraum) dient der eindeutigen Definition eines RGB-Bezugsfarbraumes, so dass Farbbilddaten geräteunabhängig analysiert werden können (siehe Anhang B.1 und [Stok96]). Allerdings erfüllt der sRGB-Farbraum weder die Forderungen nach der visuellen Gleichabständigkeit noch der Wahrnehmungsorientierung.

Die Forderung nach Wahrnehmungsorientierung ist offensichtlich nicht erfüllt, da der sRGB-Farbraum physikalisch-technisch festgelegt ist. Gleichfalls wird die Forderung nach Gleichabständigkeit verletzt, wie die folgenden Beispiele zeigen:

1. Seien zwei Farbwerte f_1^{sRGB} , f_2^{sRGB} im sRGB Farbraum mit

$$\begin{aligned} f_1^{sRGB} &= (1, 0, 0) \cong \text{”Rot”} \\ f_2^{sRGB} &= (0, 1, 0) \cong \text{”Grün”} \end{aligned}$$

gegeben. Dann besitzen beide Farbwerte den gleichen euklidischen Abstand zum Farbwert $S = (0, 0, 0)$. Offensichtlich gilt:

$$dE(f_1^{sRGB}, S) = dE(f_2^{sRGB}, S) = 1.0$$

Dies bedeutet, dass die zwei Farbwerte f_1^{sRGB} , f_2^{sRGB} im Rahmen einer analytischen oder statistischen Betrachtung als gleichwertig anzusehen sind. Diese Feststellung steht im Gegensatz zur menschlichen visuellen Wahrnehmung, wie eine Transformation in den CIELAB Farbraum zeigt. Dies geht aus der Umrechnung (siehe Anhang B.1) der Farbwerte f_1^{sRGB} , f_2^{sRGB} in die Farbwerte

$$\begin{aligned} f_1^{CIELAB} &= (53.23, 80.11, 67.22) \\ f_2^{CIELAB} &= (87.73, -86.19, 83.19) \end{aligned}$$

mit den Farbabständen

$$\begin{aligned} \Delta E(f_1^{CIELAB}, S) &= 117.34 \\ \Delta E(f_2^{CIELAB}, S) &= 148.48 \end{aligned}$$

deutlich hervor. Der Normalbeobachter empfindet den Farbwert "Grün" heller und gestättigter als den Farbwert "Rot".

2. Sei der Farbwert f_1^{sRGB} im sRGB Farbraum mit

$$f_1^{sRGB} = (0.0, 1.0, 0.0) \cong \text{"Grün"}$$

gegeben. Dann ist jede Veränderung innerhalb einer ϵ -Umgebung als gleichwertig hinsichtlich einer analytischen oder statistischen Betrachtung anzusehen. Für die Farbwerte

$$\begin{aligned} f_2^{sRGB} &= (0.0, 0.95, 0.05) \\ f_3^{sRGB} &= (0.05, 0.95, 0.0) \end{aligned}$$

mit den euklidischen Abständen

$$dE(f_2^{sRGB}, f_1^{sRGB}) = dE(f_3^{sRGB}, f_1^{sRGB}) = 0.071$$

gilt die obige Aussage. In Bezug auf die menschliche visuelle Wahrnehmung ist diese Aussage aber falsch, wie eine Transformation in den CIELAB Farbraum

$$\begin{aligned} f_1^{CIELAB} &= (87.73, -86.19, 83.19) \\ f_2^{CIELAB} &= (86.16, -82.39, 70.43) \\ f_3^{CIELAB} &= (86.51, -79.97, 82.42) \end{aligned}$$

mit den Farbabständen

$$\begin{aligned} \Delta E(f_2^{CIELAB}, f_1^{CIELAB}) &= 13.40 \\ \Delta E(f_3^{CIELAB}, f_1^{CIELAB}) &= 6.39 \end{aligned}$$

deutlich zeigt. Der Normalbeobachter nimmt die kleinen Veränderungen des Farbwertes "Grün" im sRGB Farbraum unterschiedlich wahr.

3.1.3 Auf sRGB basierter HSI-Bezugsfarbraum

Obwohl der sRGB Farbraum nicht visuell gleichabständig ist, sei der auf sRGB basierte HSI-Bezugsfarbraum (kurz: HSI Farbraum) wegen seiner Verbreitung in Veröffentlichungen (beispielsweise [Pita96], [Shyu98]) erwähnt. Der HSI Farbraum stellt eine Transformation des sRGB Farbraumes dar, wobei die Hauptdiagonale des sRGB in die Helligkeitsachse des HSI Farbraumes übergeht (siehe [Habe95], Seite 55f). Hiermit wird die Wahrnehmungsorientierung gewährleistet.

3.1.4 CIELAB Farbraum mit CIE94

Der in Abschnitt 2.3 dargelegte CIELAB Farbraum erfüllt die beiden zu Beginn des Kapitels aufgestellten Forderungen nach visueller Gleichabständigkeit und Wahrnehmungsorientierung. Insbesondere wird die visuelle Gleichabständigkeit durch die Verwendung der Farbstandsformel CIE94 deutlich verbessert. Obwohl Untersuchungen gezeigt haben, dass der CIELAB Farbraum hinsichtlich mehrerer Aspekte der Farbempfindung (beispielsweise helligkeits- und umgebungsabhängige Effekte) beschränkt ist (siehe [Fair98], Seite 228f), stellt er einen etablierten, international anerkannten Bezugsfarbraum dar. Insbesondere ermöglicht der CIELAB Farbraum eine konkrete Analyse der wahrnehmungsorientierten Aspekte *Helligkeit*, *Sättigung* und *Farbton* sowie des Farbabstandes (siehe [Fair98], Seite 306f). Daher wird im Rahmen dieser Arbeit der CIELAB Farbraum bei der Gütebewertung von Farbbildern zu Grunde gelegt.

3.2 Aspekte der Güte eines Farbbildes

Ein Ziel dieser Arbeit liegt in der Entwicklung einer autonomen, modularen Bewertungsfunktion zur Festlegung der Güte eines Farbbildes. Hierbei repräsentiert jedes Modul einen einzelnen Bewertungsaspekt. Die Auswahl der betrachteten Aspekte beruht im Wesentlichen auf dem Ansatz zur metrischen Erfassung der Bildqualität von R. Jacobson und S. Triantaphilidou (siehe [Jaco00]). Diese werden durch die in dieser Arbeit entwickelten Aspekte der *Farbverschiebung* sowie *Helligkeits-* und *Sättigungsverteilung* ergänzt. Ferner werden die Aspekte *Bildschärfe* und *Rauschen* so angepasst, dass die Berechnung der Ortsfrequenzen des Farbbildes nicht durchgeführt werden muss. Diese Anpassung ist notwendig, obwohl der Gebrauch der Ortsfrequenz zur Bestimmung der Bildschärfe eines Farbbildes ein effektives Analyseverfahren darstellt (siehe [Abma94], Seite 74ff; [Hall79], Seite 200ff; [Pita00], Seite 125ff; [Wahl84], Seite 72ff). Jedoch beruht das Verfahren auf einer Fouriertransformation F der Form

$$\widehat{P}_{f_x, f_y} = F[P_{x,y}] = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} P_{x,y} e^{-j2\pi(f_x x + f_y y)} dx dy$$

n	m	nm	$O(DFT)$	Rechenzeit
100	50	5000	$2.5 \cdot 10^7$	0.25 sek.
200	100	20000	$4.0 \cdot 10^8$	4 sek.
400	300	120000	$1.44 \cdot 10^{10}$	2 min. 24 sek.
600	450	270000	$7.29 \cdot 10^{10}$	12 min. 9 sek.
1200	800	960000	$9.216 \cdot 10^{11}$	2 std. 33 min. 36 sek.

Zur Approximierung der Rechenzeit diene die Annahme einer Rechenkapazität von 100 MFlops.

Tabelle 3.1: Rechenaufwand einer DFT

mit den Spektren f_x, f_y des Farbbildes P (siehe [Haus94], Seiten 25-35). Im allgemeinen Fall wird \widehat{P}_{f_x, f_y} mittels einer 2-dimensionalen diskreten Fouriertransformation (kurz: DFT) berechnet (siehe [Rami85], Seite 72f und [Brig92], Seiten 113-123). Da ein Algorithmus zur Berechnung einer 2-dimensionalen DFT eine Komplexität von $O(DFT) = (nm)^2$ besitzt, ist eine Integration in ein iteratives Verfahren wie es die genetische Programmierung darstellt auf Grund der langen Rechenzeit nicht möglich (siehe Tabelle 3.1). Die Anwendung einer schnellen Fouriertransformation (kurz: FFT) scheitert i. Allg. an ihren Voraussetzungen:

- $n = m$
- $n = 2^i$ mit $i \in \{1, 2, 3, \dots\}$

Folglich müssen im Rahmen dieser Arbeit die Güte der Bildschärfe und des Rauschens eines Farbbildes alternativ bestimmt werden (siehe Unterabschnitte 3.2.1 und 3.2.5).

Zusammenfassend liegen in dieser Arbeit die sechs Aspekte

- Bildschärfe
- Farbvielfalt
- Farbverschiebung
- Helligkeitsverteilung
- Rauschen
- Sättigungsverteilung

der Bewertung der Güte eines Farbbildes zu Grunde. Die getroffene Auswahl der Aspekte erlaubt die Aufstellung einer Basisfunktion zur Bewertung der Güte

eines Farbbildes, die wegen ihrer Modularität auf elementare Weise um weitere Aspekte ergänzt werden kann.

Zur Festlegung der Parameter der einzelnen Module der Gütebewertungsfunktion dienen in dieser Arbeit die natürlichen Farbbilder der Reihe *ISO 12640-3 L* a* b* standard colour image data WD1* (kurz: ISO SCID LAB). Durch den Gebrauch dieser Farbbilder werden ein hoher Qualitätsstandard und die Motivvielfalt gewährleistet. Die ISO SCID LAB Bilder werden zur Veranschaulichung des Entwicklungsprozesses um drei nicht optimierte Farbbilder ("Berge", "Frau", "Haus") ergänzt. Die genauen Daten der einzelnen Farbbilder sind im Anhang C dargelegt. Zusätzlich werden im Anhang D die zur Festlegung des jeweiligen Güteaspektes notwendigen Bildveränderungen anhand des Farbbildes "People" exemplarisch aufgezeigt.

Ferner muss im Rahmen der Entwicklung der Gütebewertungsfunktion der Begriff des Farbbildes formal erfasst werden.

Definition 3.1 (Farbbild) *Ein Farbbild wird durch eine Matrix P mit der Dimension $n \times m$ dargestellt, deren Einträge aus einem Wertetripel $P_{i,j} = (L, a, b)_{i,j}$ mit $i \in \{1, \dots, n\}$, $j \in \{1, \dots, m\}$ bestehen. Durch dieses Wertetripel wird der Farbwert des Bildpunktes (i, j) im CIELAB Farbraum festgelegt. Der Zugriff auf die Einzelwerte eines Tripels erfolgt durch $L_{i,j}$, $a_{i,j}$, $b_{i,j}$. Ferner werden mit $h_{i,j}$ der Farbton und $C_{i,j}$ die Sättigung bezeichnet, die sich aus dem Tripel $P_{i,j}$ ergeben.*

3.2.1 Bildschärfe

Eine effektive Methode zur numerischen Erfassung der Bildschärfe liegt in der Auswertung der Ortsfrequenzen des Farbbildes (siehe [Hend97], Seiten 254-276; [Haus94], Seiten 156-166). Da diese Methode auf Grund ihrer algorithmischen Komplexität (wie zu Beginn des Abschnittes dargelegt) nicht sinnvoll in ein iteratives Verfahren integrierbar ist, wird in dieser Arbeit die folgende Analyse der Bildschärfe entwickelt. Diese beruht auf der statistischen Auswertung benachbarter Bildpunkte. Es werden die folgenden Aussagen zur Erstellung einer statistischen Analyse herangezogen:

1. Je deutlicher der Unterschied zweier horizontal (bzw. vertikal) aufeinander folgender Bildpunkte wahrnehmbar ist, desto schärfer ist ein Farbbild.
2. Ist der Unterschied zweier horizontal (bzw. vertikal) aufeinander folgender Bildpunkte überhaupt nicht wahrnehmbar, dann werden die beiden Bildpunkte als einheitlich betrachtet.

Um diese Aussagen in einer Bewertungsfunktion zu integrieren, wird eine Funktion benötigt mittels derer der sprachliche Begriff "deutlich" numerisch erfasst wird. Hierzu dient eine Funktion, die auf der Anwendung einer mehrwertigen Logik beruht (siehe [Yage87] und Unterabschnitt 3.3.1). Im Rahmen dieser Arbeit wird zur numerischen Erfassung der linguistischen Variable "deutlich wahrnehmbar" die Zadeh-S Funktion (siehe [Zade75], Seite 29), die wie folgt definiert ist

$$S(x, \alpha, \gamma) = \begin{cases} 0 & : & x \leq \alpha \\ 2 \left(\frac{x - \alpha}{\gamma - \alpha} \right)^2 & : & \alpha \leq x \leq \beta \\ 1 - 2 \left(\frac{x - \gamma}{\gamma - \alpha} \right)^2 & : & \beta \leq x \leq \gamma \\ 1 & : & x \geq \gamma \end{cases}$$

mit

$$\beta = \frac{\alpha + \gamma}{2}$$

benutzt. Die numerische Erfassung der ersten Aussage erfolgt anhand der Mittelwerte:

$$\begin{aligned} \mu_r^{A1} &= \frac{1}{n(m-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} S(dE(P_{i,j}, P_{i,j+abs}), \alpha_{A1}, \gamma_{A1}) \\ \mu_u^{A1} &= \frac{1}{(n-1)m} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^m S(dE(P_{i,j}, P_{i+abs,j}), \alpha_{A1}, \gamma_{A1}) \end{aligned} \quad (3.1)$$

mit

$$\begin{aligned} dE(P_{i,j}, P_M) &= \begin{cases} \Delta E(P_{i,j}, P_M) & : & \Delta E(P_{i,j}, P_M) > 5 \\ \Delta E_{94}(P_{i,j}, P_M) & : & \Delta E(P_{i,j}, P_M) \leq 5 \end{cases} \\ \alpha_{A1}, \gamma_{A1}, abs &\in [0, \infty[\end{aligned}$$

Die Festlegung der Parameter α_{A1} , γ_{A1} erfolgt anhand der Beschreibung der Wahrnehmung eines Farbabstandes ΔE wie sie in [Trit93] auf Seite 35 dargestellt ist. Demnach nimmt der Normalbeobachter ab einem Wert $\Delta E = 2$ einen Unterschied des Farbabstandes wahr. Dieser Eindruck verstärkt sich bis zu einer signifikanten Wahrnehmung des Farbabstandes. Diese Signifikanz wird bei einem Wert von $\Delta E > 8$ erreicht. Der Parameter *abs* dient der Integration der Bildauflösung *res*, gemessen in der Anzahl der Bildpunkte pro Inch (kurz: dpi), in die Analyse. Dieser Korrekturwert ist notwendig, da bei der statistischen Berechnung (im Gegensatz zur Berechnung der Ortsfrequenzen) die Bildauflösung i. Allg. nicht berücksichtigt wird.

Ausgehend von einer in der Medienindustrie kleinst gebräuchlichen Bildauflösung von 72 dpi im Bereich Multimedia (siehe [Krau96], Seite 210), ergeben sich die

Zuweisungen:

$$\begin{aligned}\alpha_{A1} &= 2.0 \\ \gamma_{A1} &= 8.0 \\ abs &= \begin{cases} \frac{res}{72} & : \quad res > 72 \\ 1 & : \quad \text{sonst} \end{cases}\end{aligned}$$

Die numerische Auswertung der Formeln 3.1 zeigt die Tabelle E.2 anhand der Testbilder.

Analog werden zur Erfassung der zweiten Aussage die Mittelwerte

$$\begin{aligned}\mu_r^{A2} &= \frac{1}{n(m-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} (1 - S(dE(P_{i,j}, P_{i,j+abs}), \alpha_{A2}, \gamma_{A2})) \\ \mu_u^{A2} &= \frac{1}{(n-1)m} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^m (1 - S(dE(P_{i,j}, P_{i+abs,j}), \alpha_{A2}, \gamma_{A2}))\end{aligned}\quad (3.2)$$

gebildet. Die Parameter α_{A2} , γ_{A2} ergeben sich ebenfalls nach [Trit93], da der Normalbeobachter einen Farbabstand bis zu einem Wert $\Delta E = 0.5$ nicht wahrnimmt. Folglich ergeben sich die Zuweisungen:

$$\begin{aligned}\alpha_{A2} &= 0.0 \\ \gamma_{A2} &= 0.5 \\ abs &= \begin{cases} \frac{res}{72} & : \quad res > 72 \\ 1 & : \quad \text{sonst} \end{cases}\end{aligned}$$

Die Darstellung der beiden Zadeh-S Funktionen ist in der Abbildung 3.1 gegeben. Zum Erhalt von Vergleichswerten dienen Veränderungen der ausgewählten Testbilder, die unter Zuhilfenahme eines Bildbearbeitungsprogramms erzeugt wurden. Hierbei handelt es sich um die folgenden Bildmanipulationen:

1. Einmalige Anwendung eines starken Weichzeichnungsfilter auf das Testbild X. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet $X_unscharf1$.
2. Fünfmalige Anwendung eines starken Weichzeichnungsfilter auf das Testbild X. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet $X_unscharf5$.
3. Einmalige Anwendung eines starken Scharfzeichnungsfilter auf das Testbild X. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet $X_scharf1$.
4. dreimalige Anwendung eines starken Scharfzeichnungsfilter auf das Testbild X. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet $X_scharf3$.

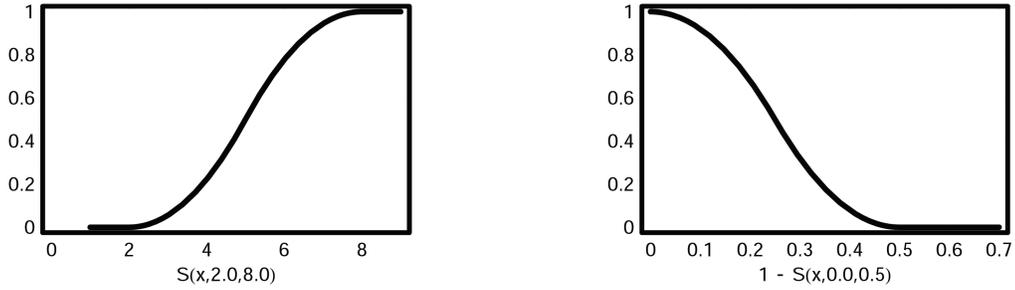


Abbildung 3.1: Zadeh-S Funktionen

Die numerischen Ergebnisse der ISO SCID LAB Testbilder (siehe Tabelle E.2) verdeutlichen vier Fakten:

- Mit zunehmendem Scharfzeichnen der Testbilder steigen die Werte μ_r^{A1} , μ_u^{A1} deutlich an.
- Mit zunehmendem Scharfzeichnen der Testbilder ist für die Werte μ_r^{A2} , μ_u^{A2} kein eindeutiges Verhalten erkennbar.
- Mit zunehmendem Weichzeichnen der Testbilder sinken die Werte μ_r^{A1} , μ_u^{A1} deutlich ab.
- Mit zunehmendem Weichzeichnen der Testbilder steigen die Werte μ_r^{A2} , μ_u^{A2} deutlich an.

Die Berücksichtigung dieser Fakten ermöglicht die Einordnung der Güte der Bildschärfe mittels der Werte

$$\begin{aligned}
 \mu_{\max}^{A1} &= \max\{\mu_r^{A1}, \mu_u^{A1}\} \\
 \mu_{\max}^{A2} &= \max\{\mu_r^{A2}, \mu_u^{A2}\} \\
 bs &= \mu_{\max}^{A1} \cdot \mu_{\max}^{A2}
 \end{aligned} \tag{3.3}$$

wie die Abbildungen 3.2 und 3.3 mit ausgewählten Verläufen verdeutlichen. Ferner sind die numerischen Auswertungen in den Tabellen E.3 und F.2 dargelegt.

Offensichtlich erlaubt die kombinierte Betrachtung der Werte bs und μ_{\max}^{A1} eine Festlegung von Grenzparametern, mittels derer (bzgl. der ISO SCID LAB Bilder) eine quasi optimale Bildschärfe numerisch erfassbar ist. Hieraus ergibt sich die Einordnung eines Farbbildes als quasi optimal hinsichtlich der Bildschärfe, falls die beiden Aussagen

$$\begin{aligned}
 0.2475 &\leq \mu_{\max}^{A1} \leq 0.6724 \\
 0.003766 &\leq bs \leq 0.006452
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

gelten.

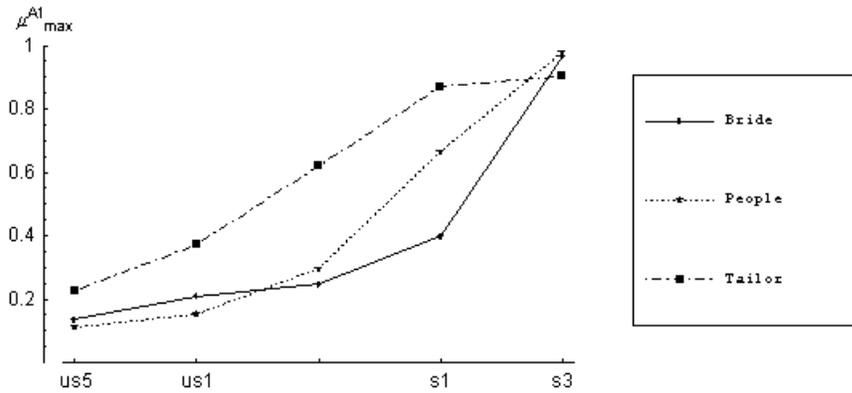


Abbildung 3.2: Verlauf des Wertes μ_{\max}^{A1}

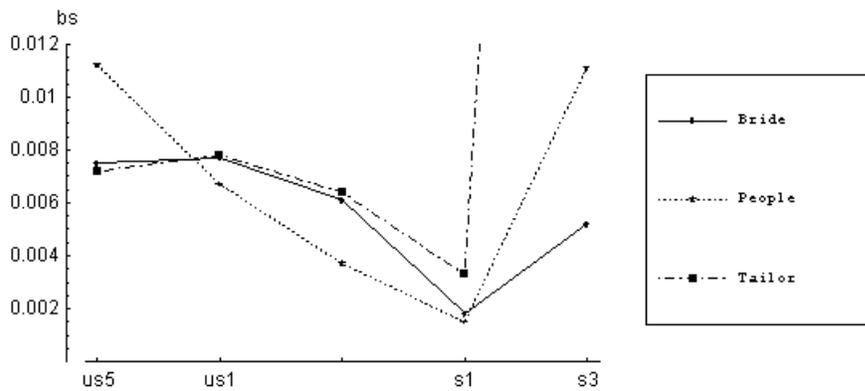


Abbildung 3.3: Verlauf des Wertes bs

3.2.2 Farbvielfalt

Mit der Farbvielfalt wird beschrieben in welchem Umfang ein Farbbild den CIELAB Farbraum ausfüllt. Die Maßzahl vf der Farbvielfalt eines Farbbildes P wird durch die Bildung der empirischen Varianz (siehe [Shli96], Seite 137ff) der Farbabstände der Bildpunkte $P_{i,j}$ vom mittleren Bildpunkt P_M bestimmt. Es gilt:

$$vf = \frac{1}{nm - 1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m dE (P_{i,j} - P_M)^2 \quad (3.5)$$

mit

$$P_M = \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{i,j}$$

$$dE(P_{i,j} - P_M) = \begin{cases} \Delta E(P_{i,j} - P_M) & : \Delta E(P_{i,j}, P_M) > 5.0 \\ \Delta E_{94}(P_{i,j} - P_M) & : \Delta E(P_{i,j}, P_M) \leq 5.0 \end{cases}$$

Der Wert vf stellt eine einfache statistische Maßzahl für die Verteilung der Bildpunkte des Farbbildes P im CIELAB Farbraum dar (siehe [Habe95], Seite 8ff). Zum Erhalt von vergleichbaren Ergebnissen dienen Veränderungen der ausgewählten Testbilder. Hierbei handelt es sich um die folgenden Bildmanipulationen:

1. Erhöhung des Kontrastes des Testbildes X um 15 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{+15} .
2. Erhöhung des Kontrastes des Testbildes X um 60 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{+60} .
3. Verringerung des Kontrastes des Testbildes X um 15 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{-15} .
4. Verringerung des Kontrastes des Testbildes X um 60 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{-60} .

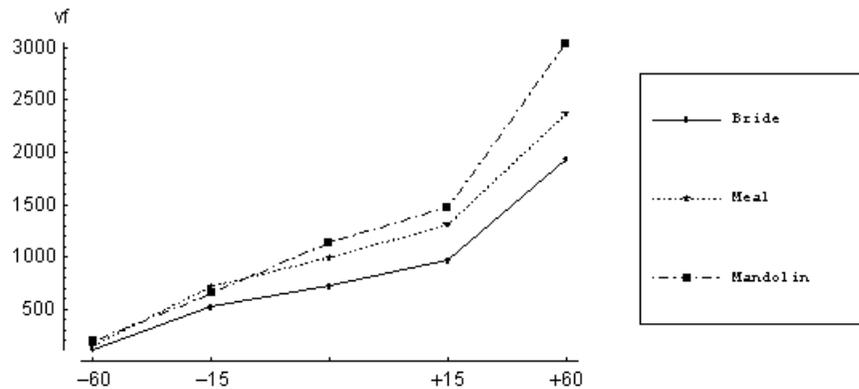


Abbildung 3.4: Verlauf des Wertes vf

Die Betrachtung der ausgewählten Verläufe (siehe Abbildung 3.4) und der numerischen Ergebnisse (siehe Tabelle E.1) des Wertes vf erlauben eine Festlegung von Grenzparametern, mittels derer (bzgl. der ISO SCID LAB Bilder) eine quasi optimale Farbvielfalt numerisch erfassbar ist. Es ergibt sich die Einordnung eines Farbbildes als quasi optimal hinsichtlich der Farbvielfalt, falls die Aussage

$$719.90 \leq vf \leq 1138.41 \quad (3.6)$$

gilt.

3.2.3 Farbverschiebung

Der Effekt, dass genau ein Farbton den Gesamteindruck eines Farbbildes global verfälscht, wird als eine globale Farbverschiebung bezeichnet. Das nicht optimierte Farbbild "Frau" (siehe Anhang C) verdeutlicht diese Beschreibung. Unter der Voraussetzung, dass die zu optimierenden Farbbilder aus einer natürlichen Umgebung entstanden sind, beschreiben nach [Poet75] die beiden folgenden Aussagen eine globale Farbverschiebung:

- Eine globale Farbverschiebung erstreckt sich über das gesamte Farbbild, während farbige Details lokal begrenzt sind.
- Eine globale Farbverschiebung wird an Hand der Grautöne eines Farbbildes besonders deutlich, da Grautöne eine geringe Grundsättigung besitzen.

Somit ist eine statistische Erfassung des Begriffs möglich.

Zur Bewertung der globalen Farbverschiebung werden die Mittelwerte a_M^G , b_M^G aller Grautöne eines Farbbildes bestimmt. Hierzu ist eine Festlegung des Begriffs Grauton notwendig. Diese Festlegung beruht auf der Aussage, dass ein Farbabstand ΔE mit $2.0 \leq \Delta E \leq 4.0$ als deutlicher Unterschied wahrgenommen wird (siehe [Trit93], Seite 35).

Definition 3.2 (Grauton) Ein im CIELAB Farbraum festgelegter Farbwert $P_{i,j}$ mit einer Sättigung von maximal 3 ($C_{i,j} \leq 3$) wird als Grauton bezeichnet.

Hieraus ergibt sich die Berechnung der Maßzahl fv

$$fv = \sqrt{a_M^G{}^2 + b_M^G{}^2} \quad (3.7)$$

mit

$$\begin{aligned} a_M^G &= \frac{1}{|G|} \sum_G a_{i,j} \quad : P_{i,j} \in G \\ b_M^G &= \frac{1}{|G|} \sum_G b_{i,j} \quad : P_{i,j} \in G \\ G &= \{P_{i,j} \mid C_{i,j} \leq 3.0\}. \end{aligned}$$

Zum Erhalt von vergleichbaren Maßzahlen dienen Veränderungen der Farbbalance der ausgewählten Testbilder. Hierbei handelt es sich um die folgenden Bildmanipulationen:

1. Verschiebung der Farbbalance des Testbildes X in Richtung des Farbwertes "Rot" um 10 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_R10 .

2. Verschiebung der Farbbalance des Testbildes X in Richtung des Farbwertes "Rot" um 40 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_R40 .
3. Verschiebung der Farbbalance des Testbildes X in Richtung des Farbwertes "Cyan" um 10 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_C10 .
4. Verschiebung der Farbbalance des Testbildes X in Richtung des Farbwertes "Cyan" um 40 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_C40 .

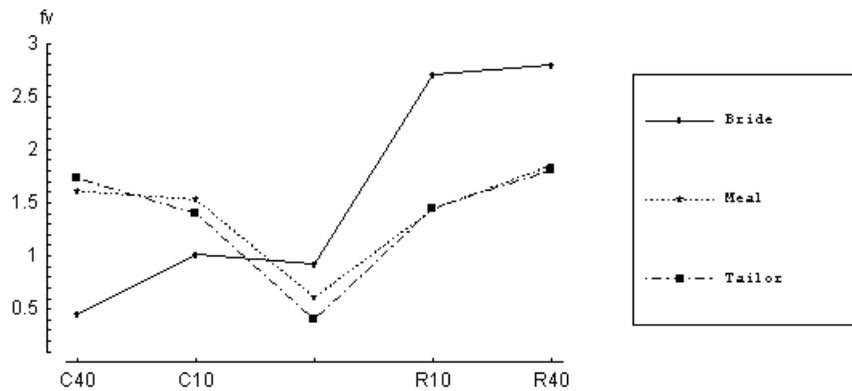


Abbildung 3.5: Verlauf des Wertes f_v

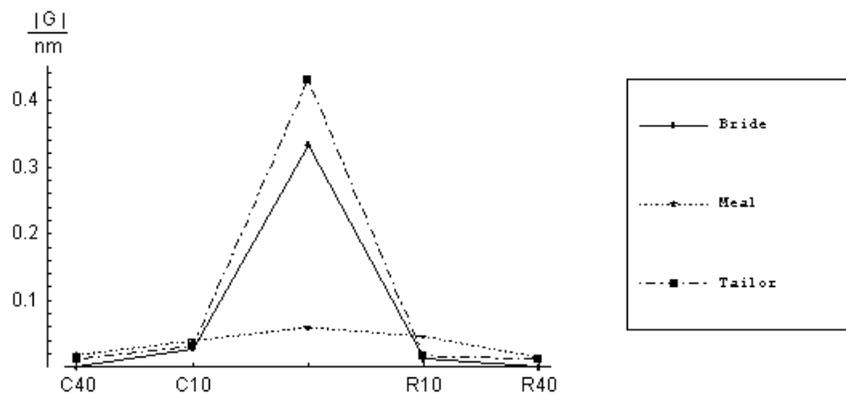


Abbildung 3.6: Verlauf des Wertes $\frac{|G|}{nm}$

Die numerischen Ergebnisse der Festlegung 3.7 sind in den Tabellen E.4 und F.4 dargelegt. Aus diesen Ergebnissen sowie den ausgewählten Verläufen (siehe

Abbildungen 3.5 und 3.6) geht offensichtlich hervor, dass die Maßzahl fv nur dann eine Aussage über die Farbverschiebung zulässt, falls mindestens ein Prozent der Bildpunkte des Farbbildes Grauwerte repräsentieren. Somit ergibt sich die Einordnung eines Farbbildes als quasi optimal (bzgl. der ISO SCID LAB Bilder) hinsichtlich der Farbverschiebung, falls die beiden Aussagen

$$\begin{aligned} \frac{|G|}{nm} &\geq 0.01 \\ fv &\leq 0.92 \end{aligned} \tag{3.8}$$

gelten.

3.2.4 Helligkeitsverteilung

Die Helligkeitsverteilung eines Farbbildes gibt Auskunft über die mittlere Gesamthelligkeit sowie die mittlere Helligkeit dreier diskreter Teilbereiche. Hierdurch ist es möglich, den Eindruck der Helligkeit auf den Normalbeobachter numerisch zu erfassen.

Zur Bestimmung der Güte der Helligkeitsverteilung eines Farbbildes werden die Werte

- Anzahl der Bildpunkte in den Helligkeitsbereichen H_1, H_2, H_3
- mittlere Gesamthelligkeit mh_0 ,
- mittlere Helligkeit in den Helligkeitsbereichen H_1, H_2, H_3 ,

durch

$$\begin{aligned} ah_1 &= |H_1| \quad , \quad H_1 = \{B_{i,j} \mid 0.0 \leq L_{i,j} \leq 40.0\} \\ ah_2 &= |H_2| \quad , \quad H_2 = \{B_{i,j} \mid 40.0 < L_{i,j} \leq 70.0\} \\ ah_3 &= |H_3| \quad , \quad H_3 = \{B_{i,j} \mid 70.0 < L_{i,j} \leq 100.0\} \\ mh_0 &= \frac{1}{nm} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m L_{i,j} \\ mh_1 &= \frac{1}{ah_1} \sum_{B_{i,j} \in H_1} L_{i,j} \\ mh_2 &= \frac{1}{ah_2} \sum_{B_{i,j} \in H_2} L_{i,j} \\ mh_3 &= \frac{1}{ah_3} \sum_{B_{i,j} \in H_3} L_{i,j} \end{aligned} \tag{3.9}$$

bestimmt. Mittels der Werte mh_0 , mh_1 , mh_2 , mh_3 wird die Intensität des Helligkeitseindrucks des Farbbildes auf den Normalbeobachter dargestellt, während die Werte ah_1 , ah_2 , ah_3 eine Aussage über die Ausgewogenheit der Helligkeitsverteilung erlauben. Auf Grund der Tatsache, dass in der Gesamtbewertung die Farbvielfalt betrachtet wird, ist eine Analyse der Varianz der Helligkeitswerte nicht notwendig. Zum Erhalt von vergleichbaren Ergebnissen dienen Veränderungen der Helligkeit der ausgewählten Testbilder. Hierbei handelt es sich um die folgenden Bildmanipulationen:

1. Erhöhung der Helligkeit des Testbildes X um 15 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{+15} .
2. Erhöhung der Helligkeit des Testbildes X um 60 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{+60} .
3. Verringerung der Helligkeit des Testbildes X um 15 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{-15} .
4. Verringerung der Helligkeit des Testbildes X um 60 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{-60} .

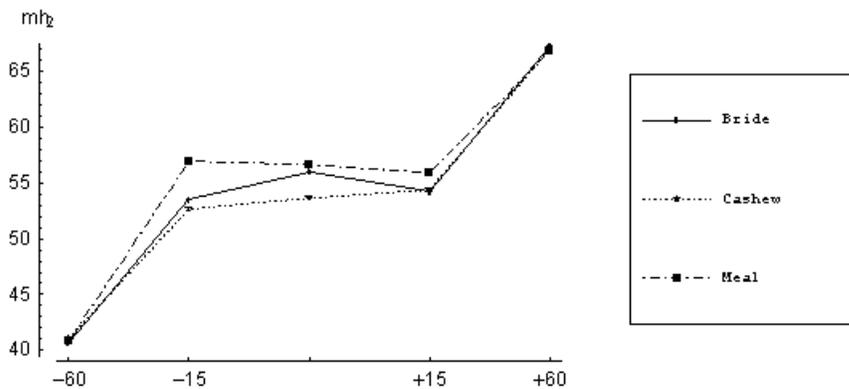


Abbildung 3.7: Verlauf des Wertes mh_2

Eine Betrachtung der numerischen Ergebnisse in Tabelle E.5 und der ausgewählten Verläufe in Abbildungen 3.7 bis 3.9 ermöglicht die Festlegung von Grenzparametern zur Beschreibung eines quasi optimalen Farbbildes hinsichtlich der Helligkeitsverteilung (bzgl. der ISO SCID LAB Bilder). Hierbei wird auf eine Darlegung der Verläufe der Maßzahlen mh_1 und mh_3 verzichtet, da beide im quasi optimalen Wertebereich eine relativ grosse Streuung besitzen. Ihre Bedeutung für die Güte der Helligkeitsverteilung liegt in dem Ausschluss von extremen Helligkeitswerten.

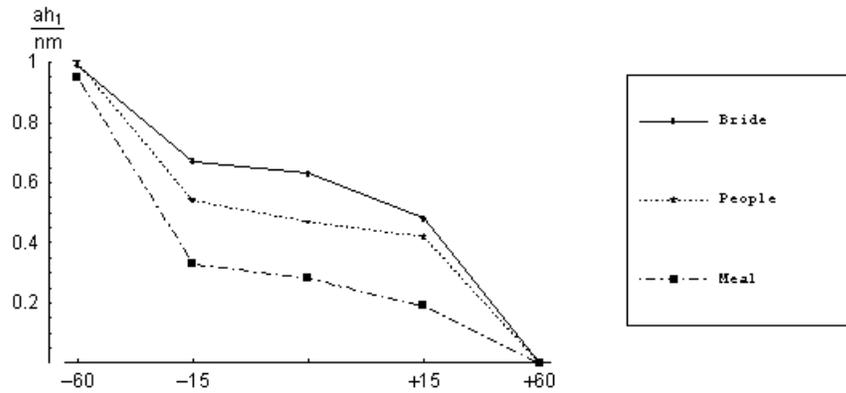


Abbildung 3.8: Verlauf des Wertes $\frac{ah_1}{nm}$

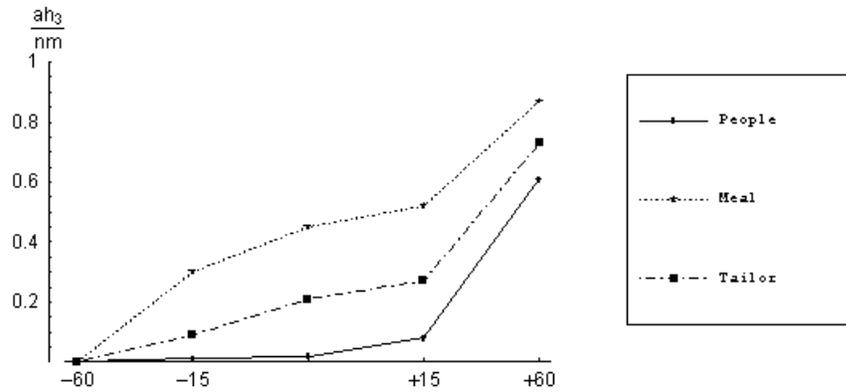


Abbildung 3.9: Verlauf des Wertes $\frac{ah_3}{nm}$

Insbesondere geht aus den Ergebnissen hervor, dass die mittlere Gesamthelligkeit auf Grund ihrer breiten Streuung keine Aussage über die Güte der Helligkeitsverteilung ermöglicht. Ferner ist offensichtlich, dass die prozentuale Anzahl $\frac{ah_2}{nm}$ auf Grund ihrer Bandbreite keine eindeutige Güteaussage zulässt. Der Zustand eines quasi optimalen Farbbildes ist gewährleistet, falls die Aussagen

$$\begin{aligned}
 13.46 &\leq mh_1 \leq 20.66 \\
 53.64 &\leq mh_2 \leq 56.64 \\
 78.12 &\leq mh_3 \leq 84.58 \\
 0.28 &\leq \frac{ah_1}{nm} \leq 0.63 \\
 0.02 &\leq \frac{ah_3}{nm} \leq 0.45
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

gelten.

3.2.5 Rauschen

Die Festlegung einer Maßzahl zur Beschreibung der Güte des Rauschens eines Farbbildes erfolgt ähnlich der Festlegung der Güte der Bildschärfe (siehe Unterabschnitt 3.2.1). Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass der Begriff des Rauschens als gleichmäßiges Auftreten von fehlerhaften Bildpunkten interpretierbar ist (siehe [Krau96], Seite 152; [Prat91], Seite 339f), ergibt sich analog zur Festlegung 3.1 die Maßzahl

$$ra = \frac{\mu_r^R + \mu_u^R}{2} \quad (3.11)$$

mit

$$\begin{aligned} \mu_r^R &= \frac{1}{n(m-1)} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m-1} S(dE(P_{i,j}, P_{i,j}), \alpha_R, \gamma_R) \\ \mu_u^R &= \frac{1}{(n-1)m} \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=1}^m S(dE(P_{i,j}, P_{i,j}), \alpha_R, \gamma_R) \\ \alpha_R &= 4.0 \\ \gamma_R &= 8.0 \end{aligned}$$

Die Festlegung 3.11 ist ohne Berücksichtigung der Bildauflösung wohldefiniert, da das gleichmäßige Auftreten der fehlerhaften Bildpunkte medium- und nicht wahrnehmungsbezogen ist. Zum Erhalt von vergleichbaren Maßzahlen wurden die ausgewählten Testbilder mit einem Störungsfilter verändert. Hierbei handelt es sich um die folgenden Bildmanipulationen:

1. Anwendung eines 15 prozentigen Störungsfilters mit gaußscher Normalverteilung auf das Testbild X. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{15} .
2. Anwendung eines 60 prozentigen Störungsfilters mit gaußscher Normalverteilung auf das Testbild X. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{60} .

Die Tabelle E.6 sowie der ausgewählte Verlauf (siehe Abbildung 3.10) ermöglichen die Festlegung von Grenzparametern zur Beschreibung eines quasi rauschfreien Farbbildes (bzgl. der ISO SCID LAB Bilder). Dieser Zustand ist gegeben, falls die Aussage

$$ra \leq 0.3697 \quad (3.12)$$

gilt.

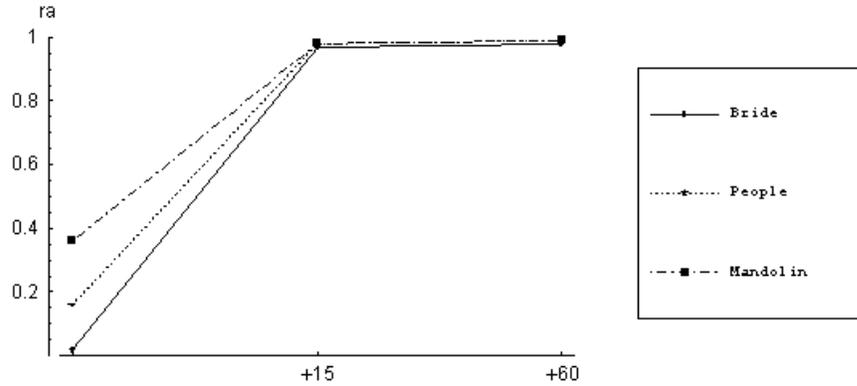


Abbildung 3.10: Verlauf des Wertes ra

3.2.6 Sättigungsverteilung

Grundsätzlich gelten dieselben Überlegungen, die zur Festlegung der Güte der Helligkeitsverteilung (siehe Unterabschnitt 3.2.4) führen, um die Güte der Sättigungsverteilung eines Farbbildes zu bestimmen. Es werden die Werte

- Anzahl der Bildpunkte in den Sättigungsbereichen S_1, S_2, S_3, S_4
- mittlere Sättigung in den Sättigungsbereichen S_1, S_2, S_3, S_4

durch

$$\begin{aligned}
 as_1 &= |S_1|, & S_1 &= \{B_{i,j} \mid 0.0 \leq C_{i,j} \leq 8.0\} \\
 as_2 &= |S_2|, & S_2 &= \{B_{i,j} \mid 8.0 < C_{i,j} \leq 16.0\} \\
 as_3 &= |S_3|, & S_3 &= \{B_{i,j} \mid 16.0 < C_{i,j} \leq 32.0\} \\
 as_4 &= |S_4|, & S_4 &= \{B_{i,j} \mid 32.0 < C_{i,j}\} \\
 ms_1 &= \frac{1}{as_1} \sum_{B_{i,j} \in S_1} C_{i,j} \\
 ms_2 &= \frac{1}{as_2} \sum_{B_{i,j} \in S_2} C_{i,j} \\
 ms_3 &= \frac{1}{as_3} \sum_{B_{i,j} \in S_3} C_{i,j} \\
 ms_4 &= \frac{1}{as_4} \sum_{B_{i,j} \in S_4} C_{i,j}
 \end{aligned} \tag{3.13}$$

festgelegt. Zum Erhalt von vergleichbaren Ergebnissen dienen Veränderungen der Farbsättigung der ausgewählten Testbilder. Hierbei handelt es sich um die folgenden Bildmanipulationen:

1. Erhöhung der Sättigung des Testbildes X um 15 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{+15} .
2. Erhöhung der Sättigung des Testbildes X um 60 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{+60} .
3. Verringerung der Sättigung des Testbildes X um 15 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{-15} .
4. Verringerung der Sättigung des Testbildes X um 60 Einheiten. Die Bezeichnung des veränderten Bildes lautet X_{-60} .

Aus der Tabelle E.7 geht eindeutig hervor, dass die Werte der prozentualen Anzahl der Bildpunkte keine Aussage über die Güte der Sättigung zulassen. Diese Tatsache ist durch die unterschiedlichen Bildmotive begründet. Das Testbild "Tailor" verfügt über einen hohen Anteil von Bildpunkten mit einer geringen Sättigung. Dies führt selbst bei einer Erhöhung der Sättigungswerte um 60 Einheiten zu prozentualen Anzahlwerten, die geringer liegen als die Anzahlwerte des Testbildes "Mandolin". Folglich ist die Berücksichtigung des Bildmotivs bei der Einordnung der prozentualen Anzahlwerte notwendig. Hierzu werden der maximale Sättigungswert des Testbildes und das Verhältnis der Anzahl der Bildpunkte im Grauwertbereich

$$S_G = \{B_{i,j} \mid 0.0 \leq C_{i,j} \leq 3.0\}$$

zur Anzahl der Bildpunkte im Sättigungsbereich S_1 bestimmt. Dies ergibt die Werte:

$$\begin{aligned} s_{\max} &= \max\{C_{i,j}\} \\ g_{S_1} &= \frac{aS_G}{aS_1} \\ g_{S_{1kor}} &= \frac{g_{S_1}}{s_{kor}} \end{aligned} \tag{3.14}$$

mit

$$\begin{aligned} aS_G &= |S_G| \\ s_{kor} &= \frac{s_{\max}}{100} \end{aligned}$$

Aus den Tabellen E.7 und E.8 sowie den in den Abbildungen 3.11 bis 3.14 dargelegten, ausgewählten Verläufen ist ersichtlich, dass eine Festlegung von Grenzparametern zur Beschreibung eines quasi optimalen Farbbildes hinsichtlich der Sättigungsverteilung (bzgl. der ISO SCID LAB Bilder) möglich ist. Hierbei wird auf die Wiedergabe der Verläufe der Maßzahlen ms_1 bis ms_4 verzichtet, da diese

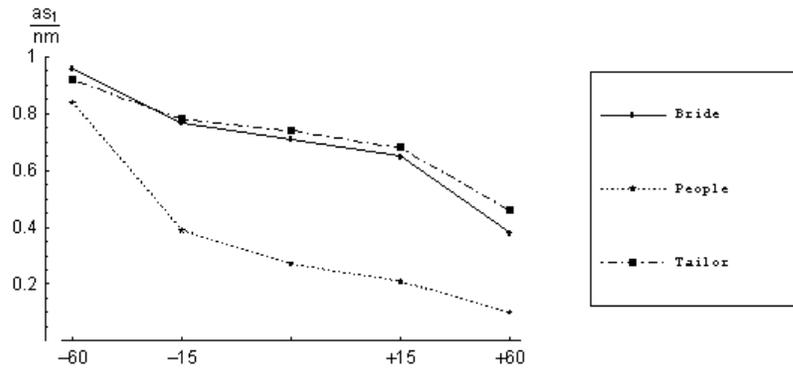


Abbildung 3.11: Verlauf des Wertes $\frac{aS_1}{nm}$

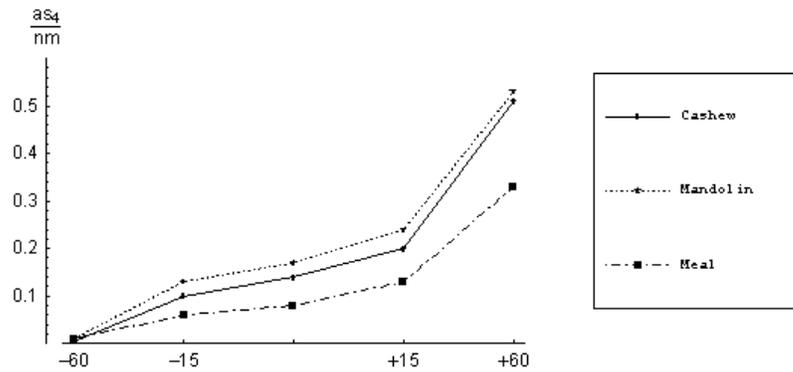


Abbildung 3.12: Verlauf des Wertes $\frac{aS_4}{nm}$

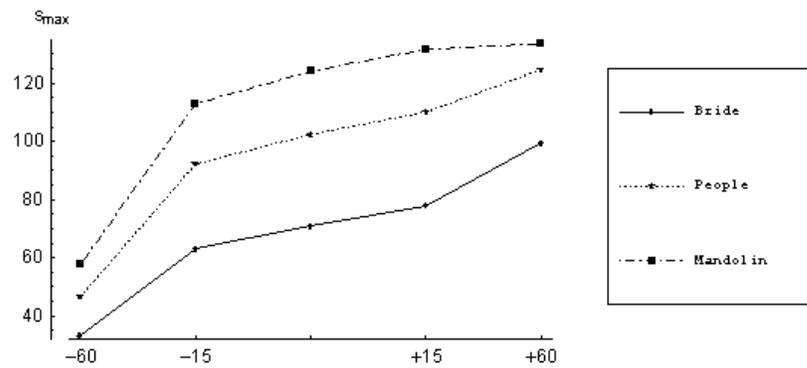


Abbildung 3.13: Verlauf des Wertes s_{max}

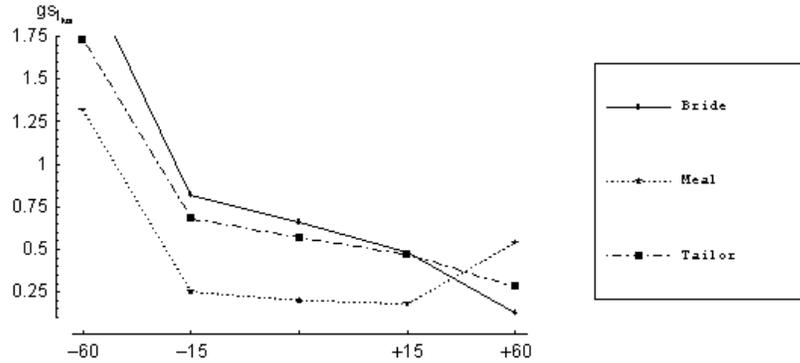


Abbildung 3.14: Verlauf des Wertes $gs_{1_{kor}}$

Maßzahlen im Wesentlichen dem Ausschluss von Extremwerten dienen. Insbesondere geht hervor, dass die Sättigungsverteilung stark durch das Bildmotiv beeinflusst wird. Folglich dient die Sättigungsverteilung primär dem Ausschluss von Extremzuständen. Der Zustand eines quasi optimalen Farbbildes ist gewährleistet, falls die Aussagen

$$\begin{aligned}
 2.95 &\leq ms_1 \leq 4.85 \\
 10.88 &\leq ms_2 \leq 11.97 \\
 20.27 &\leq ms_3 \leq 23.26 \\
 40.54 &\leq ms_4 \leq 52.83 \\
 0.27 &\leq \frac{as_1}{nm} \leq 0.74 \\
 0.01 &\leq \frac{as_4}{nm} \leq 0.17 \\
 0.20 &\leq gs_{1_{kor}} \leq 0.66 \\
 70.94 &\leq s_{max} \leq 124.11
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

gelten.

3.3 modulare Gesamtbewertung

Während bisherige Arbeiten (siehe [Mall96]; [Shyu98]; [Wolf98]) die Einzelbewertungen direkt miteinander kombinieren und somit eine Ergänzung der Gesamtbewertung nur unter erheblichem Entwicklungsaufwand ermöglichen, wird in dieser Arbeit ein indirekter Weg gewählt.

Der Nachteil der direkten Kombination liegt in der starren Struktur der Bewertungsfunktion. Diese Struktur entsteht auf Grund des Integrationszwangs deutlich verschiedener Wertebereiche hinsichtlich der Einzelbewertungen. Der beschriebene Nachteil kann zwar über eine erzwungene Normierung teilweise ausgeglichen

werden, jedoch erlaubt dieses Verfahren nicht die flexible Festlegung einer linguistischen Einordnung für jede Einzelbewertung. In Bezug auf die in dieser Arbeit verwendeten Einzelbewertungen Farbverschiebung fv und Farbvielfalt vf existiert eine mögliche direkte Kombination der Gesamtbewertung GB_{direkt} der Form

$$GB_{direkt} = \left(3041.25 - (917.181 - vf)^2 \right) (4 - fv)^3, \quad (3.16)$$

wobei ein hoher Funktionswert eine hohe Güte des Farbbildes bedeutet. Die Integration der Bildschärfe, des Rauschens, der Helligkeits- und Sättigungsverteilung in die Gleichung 3.16 ist nur unter erheblichem Aufwand durchführbar, daher werden diese Einzelbewertungen in der exemplarischen Erläuterung der Unterschiede zwischen direkter, normierter und modularer Gesamtbewertung nicht verwendet. Ferner zeigt gerade die Komplexität der Erweiterung der Gleichung 3.16 um weitere Einzelbewertungen auf, dass diese Form nicht für die Festlegung einer modularen Gesamtbewertung geeignet ist.

Eine normierte Gesamtbewertung GB_{norm} ist gegeben durch

$$GB_{norm} = \left(1 - \frac{\left(\left(30.285 - \sqrt{vf} \right)^2 \right)}{917.181} \right) \frac{(4 - fv)^3}{64} \quad (3.17)$$

mit $GB_{norm} \in [0, 1]$. Ein Nachteil der Gleichung 3.17 liegt in der Verfälschung der Aussagekraft des numerischen Wertes. Sei der Wert $fv_w = 1.17$ basierend auf der Aussage 3.7 sowie eines kaum wahrnehmbaren Farbabstandes $\Delta E \leq 0.5$ (siehe [Trit93], Seite 35) als gerade noch akzeptable Einordnung der Güte der Farbverschiebung gegeben. Dann liegt eine gewünschte Einordnung des Wertes fv_w hinsichtlich der Güte bei 0.5. Die Gegenüberstellung

	Einzelbewertung	normierte Einzelbewertung
fv_w	0.5	0.3541

zeigt, dass eine normierte Einzelbewertung diese Einordnung nicht ermöglicht.

Diese Einschränkung der Aussagekraft der numerischen Werte wird durch die Verwendung von einzelbewertungsabhängigen Funktionen

$$\begin{aligned} EB_{EB}(x) &\in [0, 1] \\ EB &\in \{FV, VF\} \end{aligned}$$

aufgehoben. Somit besitzt die Gesamtbewertung GB_{mod} eine einfache Struktur der Form

$$GB_{mod} = EB_{FV}(fv) \cdot EB_{VF}(vf) \quad (3.18)$$

Offensichtlich lässt sich die Gleichung 3.18 leicht um weitere Einzelbewertungen beispielsweise für die Güte der Sättigungsverteilung durch

$$GB_{mod} = EB_{FV}(fv) \cdot EB_{VF}(vf) \cdot EB_{SV}(sv) \quad (3.19)$$

erweitern. Eine leichte Einschränkung der Gleichung 3.19 liegt in dem gleichwertigen Einfluss der Einzelbewertungen. Da in diesem Fall nur eine geringe Einzelbewertung die Gesamtbewertung erheblich beeinflusst, wird eine Gewichtung der Einzelbewertungen benötigt, um die Gesamtbewertung nicht zu verfälschen. Es ergibt sich:

$$GB_{mod} = EB_{FV}(fv)^{w_{FV}} \cdot EB_{VF}(vf)^{w_{VF}} \cdot EB_{SV}(sv)^{w_{SV}} \quad (3.20)$$

mit

$$w_{FV} + w_{VF} + w_{SV} = 1$$

Ferner erlaubt die Gewichtung der Einzelbewertungen eine Gruppierung zusammengehöriger Aspekte mit dem Ziel einer ausgewogenen Gesamtbewertung.

Die Entwicklung einer modularen Gesamtbewertung schließt dieses Kapitel ab. Hierzu werden die in Abschnitt 3.2 dargestellten Aspekte der Güte eines Farbbildes hinsichtlich ihrer numerischen Maßzahlen eingeordnet. Diese Einordnung basiert auf der Umsetzung linguistischer Terme mittels einer mehrwertigen Logik (siehe [Yage87], Seiten 219-328; [Zade75], Seiten 4-12).

3.3.1 Mehrwertige Logik

Im Gegensatz zur klassischen zweiwertigen Logik mit ihren Wahrheitswerten "wahr= 1" und "falsch= 0" wird bei der mehrwertigen Logik (engl. "fuzzy logic") eine mathematische Funktion benutzt, um umgangssprachliche Zwischenzustände erfassen zu können. Während in der klassischen Mengenlehre für eine Zugehörigkeitsfunktion $\mu(x)$ die Definition

$$\mu(x) = \begin{cases} 1 & : x \in G \text{ (Grundmenge)} \\ 0 & : x \notin G \end{cases}$$

gilt, erlaubt die mehrwertige Logik die Modellierung unscharfer Mengen durch die Verwendung von Zugehörigkeitsgraden, die zwischen 0 und 1 liegen.

Definition 3.3 (Unscharfe Menge) *Eine unscharfe Menge X einer Grundmenge G ist gekennzeichnet durch ihre Zugehörigkeitsfunktion $\mu_X : G \rightarrow [0, 1]$ die jedem Element $x \in G$ einen Wert $\mu_X(x)$ zuordnet, der den Grad der Zugehörigkeit von x in G repräsentiert.*

Die linguistische Anwendung der unscharfen Mengen liegt in der interpretativen Umsetzung umgangssprachlicher Begriffe wie beispielsweise "niedrige Temperatur". Im Rahmen einer solchen Betrachtung fällt dem Wert $\mu_X(x) = 0.5$ die Bedeutung des Wechsellpunktes zu. Die Elemente $x \in X$, für die $\mu_X(x) \in [0.5, 1]$ gilt, besitzen eine eher niedrige Temperatur, während für die Elemente $x \in X$ mit $\mu_X(x) \in [0, 0.5]$ diese Aussage eher nicht zutrifft.

Zur Modellierung unscharfer Mengen werden in dieser Arbeit drei Zugehörigkeitsfunktionen verwendet.

Die Zadeh S-Funktion μ_X^S (siehe Abbildung 3.1):

$$\mu_X^S(x) = \begin{cases} 0 & : x < a_1 \\ 2 \left(\frac{x - a_1}{a_3 - a_1} \right)^2 & : a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1 - 2 \left(\frac{x - a_3}{a_3 - a_1} \right)^2 & : a_2 \leq x \leq a_3 \\ 1 & : a_3 < x \end{cases}$$

mit

$$a_2 = \frac{a_1 + a_3}{2}$$

Die beidseitige Zadeh S-Funktion μ_X^D (siehe Abbildung 3.15):

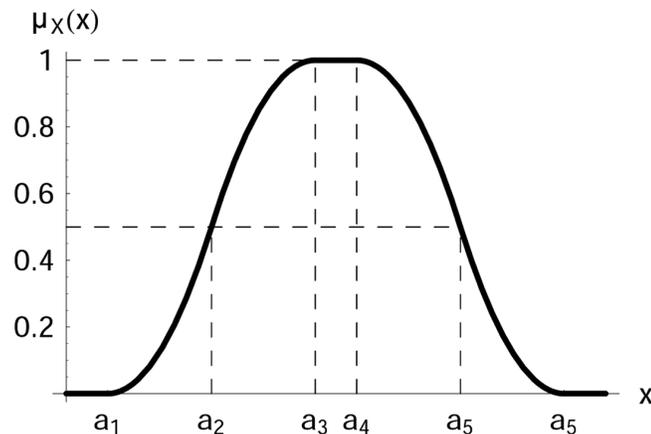


Abbildung 3.15: beidseitige Zadeh S-Funktion

$$\mu_X^D(x) = \begin{cases} 0 & : x < a_1 \\ 2 \left(\frac{x - a_1}{a_3 - a_1} \right)^2 & : a_1 \leq x \leq a_2 \\ 1 - 2 \left(\frac{x - a_3}{a_3 - a_1} \right)^2 & : a_2 \leq x \leq a_3 \\ 1 & : a_3 \leq x \leq a_4 \\ 1 - 2 \left(\frac{x - a_4}{a_6 - a_4} \right)^2 & : a_4 \leq x \leq a_5 \\ 2 \left(\frac{x - a_6}{a_6 - a_4} \right)^2 & : a_5 \leq x \leq a_6 \\ 0 & : a_6 < x \end{cases}$$

mit

$$a_2 = \frac{a_1 + a_3}{2}$$

$$a_5 = \frac{a_4 + a_6}{2}$$

Die verallgemeinerte Trapezfunktion μ_X^T (siehe Abbildung 3.16):

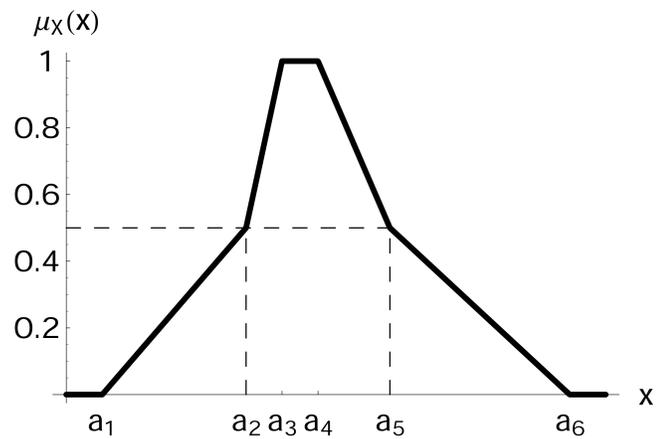


Abbildung 3.16: Verallgemeinerte Trapezfunktion

$$\mu_X^T(x) = \left\{ \begin{array}{ll} 0 & : x < a_1 \\ \frac{0.5(x - a_1)}{a_2 - a_1} & : a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{0.5(x - a_2)}{a_3 - a_2} + 0.5 & : a_2 \leq x \leq a_3 \\ 1 & : a_3 \leq x \leq a_4 \\ \frac{0.5(a_5 - x)}{a_5 - a_4} + 0.5 & : a_4 \leq x \leq a_5 \\ \frac{0.5(a_6 - x)}{a_6 - a_5} & : a_5 \leq x \leq a_6 \\ 0 & : a_6 < x \end{array} \right.$$

3.3.2 Einzelbewertungsfunktion EB_{BS}

Die Festlegung der Einzelbewertungsfunktion EB_{BS} basiert auf der Auswertung der in Tabelle E.3 zusammengefassten numerischen Ergebnisse der ISO SCID LAB Bilder. Hierzu werden die Extrema der Werte bs und μ_{\max}^{A1} bestimmt und als Grenzbereiche der Zugehörigkeitsfunktion festgesetzt. Ferner werden unter der Annahme, dass die schwachen Veränderungen der Bildschärfe gerade noch akzeptable Farbbilder ergeben, die Wechsellpunkte bestimmt. Es ergeben sich die folgenden Werte:

bs_{\min}	bs_{\max}	$\mu_{\max_{\min}}^{A1}$	$\mu_{\max_{\max}}^{A1}$
0.0	0.74899	0.1115	0.9790

$bs_{w_{\min}}$	$bs_{w_{\max}}$	$\mu_{\max_{w_{\min}}}^{A1}$	$\mu_{\max_{w_{\max}}}^{A1}$
0.001598	0.011243	0.1531	0.8707

Hieraus ergeben sich unter Berücksichtigung der quasi optimalen Bildschärfe (siehe Aussagen 3.4) vier mögliche Zugehörigkeitsfunktionen:

1. $\mu_{X_{bs}}^D(bs)$ mit $a_1 = 0$ $a_3 = 0.003766$ $a_4 = 0.006452$ $a_6 = 0.074899$
2. $\mu_{X_{\mu_{\max}^{A1}}}^D(\mu_{\max}^{A1})$ mit $a_1 = 0.1115$ $a_3 = 0.2475$ $a_4 = 0.6724$ $a_6 = 0.9790$
3. $\mu_{X_{bs}}^T(bs)$ mit $a_1 = 0$ $a_2 = 0.001598$ $a_3 = 0.003766$
 $a_4 = 0.006452$ $a_5 = 0.011243$ $a_6 = 0.074899$
4. $\mu_{X_{\mu_{\max}^{A1}}}^T(\mu_{\max}^{A1})$ mit $a_1 = 0.1115$ $a_2 = 0.1531$ $a_3 = 0.2475$
 $a_4 = 0.6724$ $a_5 = 0.8707$ $a_6 = 0.9790$

Auszugsweise seien hier die folgenden Werte dargelegt:

Bildname	$\mu_{X_{bs}}^D(bs)$	$\mu_{X_{bs}}^T(bs)$	$\mu_{X_{\mu_{\max}^{A1}}}^D(\mu_{\max}^{A1})$	$\mu_{X_{\mu_{\max}^{A1}}}^T(\mu_{\max}^{A1})$
Meal_scharf3	0.2756	0.1996	0.0477	0.2187
Tailor_scharf1	0.9651	0.8853	0.2495	0.4999
People_unscharf1	0.9999	0.9706	0.1868	0.4996
Meal_unscharf5	0.9929	0.5750	1	1

Auf Grund der numerischen Ergebnisse der Zugehörigkeitsfunktionen (siehe Tabelle E.9) und des optischen Eindrucks des Farbbildes wird die Einzelbewertungsfunktion EB_{BS} für die Güte der Bildschärfe durch

$$EB_{BS}(bs, \mu_{\max}^{A1}) = \mu_{X_{bs}}^T(bs) \cdot \mu_{X_{\mu_{\max}^{A1}}}^D(\mu_{\max}^{A1})$$

festgelegt.

3.3.3 Einzelbewertungsfunktion EB_{VF}

Die Festlegung der Einzelbewertungsfunktion EB_{VF} basiert auf der Auswertung der in Tabelle E.1 zusammengefassten numerischen Ergebnisse der ISO SCID LAB Bilder. Hierzu werden die Extrema der Maßzahl vf bestimmt und als Grenzbereich der Zugehörigkeitsfunktion festgesetzt. Ferner werden unter der Annahme, dass die schwachen Veränderungen des Kontrastes gerade noch akzeptable Farbbilder ergeben, die Wechsellpunkte bestimmt. Es ergeben sich die folgenden Werte:

vf_{\min}	vf_{\max}	$vf_{w_{\min}}$	$vf_{w_{\max}}$
116.61	523.54	1475.04	3041.25

Hieraus ergeben sich unter Berücksichtigung der quasi optimalen Farbenvielfalt (siehe Aussage 3.6) zwei mögliche Zugehörigkeitsfunktionen:

1. $\mu_{X_{vf}}^D(\sqrt{vf})$ mit $a_1 = 10.80$ $a_3 = 26.83$ $a_4 = 33.74$ $a_6 = 55.15$
2. $\mu_{X_{vf}}^T(\sqrt{vf})$ mit $a_1 = 10.80$ $a_2 = 22.88$ $a_3 = 26.83$
 $a_4 = 33.74$ $a_5 = 38.41$ $a_6 = 55.15$

Auszugsweise seien hier die folgenden Werte dargelegt:

Bildname	$\mu_{X_{vf}}^D(\sqrt{vf})$	$\mu_{X_{vf}}^T(\sqrt{vf})$
People_-60	0.0168	0.0608
Bride & groom_-15	0.8786	0.5001
Cashew nuts_+15	0.9050	0.5004
Bride & groom_+60	0.5433	0.3339

Auf Grund der numerischen Ergebnisse der Zugehörigkeitsfunktionen (siehe Tabelle E.10) und des optischen Eindrucks des Farbbildes wird die Einzelbewertungsfunktion EB_{VF} für die Güte der Farbenvielfalt durch

$$EB_{VF}(vf) = \mu_{X_{vf}}^T(\sqrt{vf})$$

festgelegt.

3.3.4 Einzelbewertungsfunktion EB_{FV}

Die Festlegung der Einzelbewertungsfunktion EB_{FV} basiert auf der Auswertung der in Tabelle E.4 zusammengefassten numerischen Ergebnisse der ISO SCID LAB Bilder. Unter Berücksichtigung der Aussage, dass für einen kaum wahrnehmbaren Farbabstand $\Delta E \leq 0.5$ gilt (siehe [Trit93], Seite 35), wird der Wechsellpunkt fv_w hinsichtlich der Aussage 3.8 mit $fv_w = 0.25$ festgelegt. Analog verläuft die Bestimmung der Extremwerte fv_{\min} und fv_{\max} auf Grund der Definition des Grauwertbereiches. Zusammenfassend gilt:

fv_{\min}	fv_{\max}	fv_w
0.0	2.5	1.17

Hieraus ergibt sich unter Berücksichtigung der quasi optimalen Farbverschiebung (siehe Aussagen 3.8) die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{X_{fv}}^T$, da der Wechsellpunkt fv_w mit einer Zadeh S-Funktion nicht an die vorgegebenen Extremwerte angepasst werden kann.

Es gilt:

- $\mu_{X_{fv}}^T(fv)$ mit $a_1 = -0.2$ $a_2 = -0.1$ $a_3 = 0.0$
 $a_4 = 0.92$ $a_5 = 1.17$ $a_6 = 2.5$

Auszugsweise seien hier die folgenden Werte dargelegt:

Bildname	$\mu_{X_{fv}}^T(fv)$	$\frac{ G }{nm}$
People_C40	1	0.0001
Cashew nuts_C10	0.4991	0.0775
Meal_R10	0.2452	0.0458
People_R40	0.2734	0.0002

Auf Grund der numerischen Ergebnisse der Zugehörigkeitsfunktion (siehe Tabelle E.11) und des optischen Eindrucks des Farbbildes wird die Einzelbewertungsfunktion EB_{FV} für die Güte der Farbverschiebung durch

$$EB_{FV}\left(fv, \frac{|G|}{nm}\right) = \mu_{X_{fv}}^T(fv) \cdot \delta\left(\frac{|G|}{nm}\right)$$

mit

$$\delta\left(\frac{|G|}{nm}\right) = \begin{cases} 1 & : \frac{|G|}{nm} \geq 0.01 \\ 0 & : \frac{|G|}{nm} < 0.01 \end{cases}$$

festgelegt.

3.3.5 Einzelbewertungsfunktion EB_{HV}

Die Festlegung der Einzelbewertungsfunktion EB_{HV} basiert auf der Auswertung der in Tabelle E.5 zusammengefassten numerischen Ergebnisse der ISO SCID LAB Bilder. Hierzu werden die Extrema der Werte mh_1 , mh_2 , mh_3 , $\frac{ah1}{nm}$ und $\frac{ah3}{nm}$ bestimmt und als Grenzbereiche der Zugehörigkeitsfunktionen festgesetzt. Es ergibt sich:

	mh_1	mh_2	mh_3	$\frac{ah1}{nm}$	$\frac{ah3}{nm}$
min	0	40	70	0	0
max	40	70	100	0.95	0.77

Ferner werden unter der Annahme, dass die schwachen Veränderungen der Helligkeit gerade noch akzeptable Farbbilder ergeben, die Wechsellpunkte bestimmt. Offensichtlich ist die Festlegung der Wechsellpunkte für die Wertem mh_1 , mh_2 , mh_3 auf Grund ihrer Abhängigkeit vom Bildmotiv nicht möglich.

Es ergeben sich die folgenden Werte:

$\left(\frac{ah_1}{nm}\right)_{w_{\min}}$	$\left(\frac{ah_1}{nm}\right)_{w_{\max}}$	$\left(\frac{ah_3}{nm}\right)_{w_{\min}}$	$\left(\frac{ah_3}{nm}\right)_{w_{\max}}$
0.19	0.67	0.01	0.52

Hieraus ergeben sich unter Berücksichtigung der quasi optimalen Helligkeitsverteilung (siehe Aussagen 3.10) und der Wechsellpunkte fünf Zugehörigkeitsfunktionen:

1. $\mu_{X_{mh_1}}^D(mh_1)$ mit $a_1 = 0$ $a_3 = 13.46$ $a_4 = 20.66$ $a_6 = 40.0$
2. $\mu_{X_{mh_2}}^D(mh_2)$ mit $a_1 = 40$ $a_3 = 53.64$ $a_4 = 56.64$ $a_6 = 70.0$
3. $\mu_{X_{mh_3}}^D(mh_3)$ mit $a_1 = 70$ $a_3 = 78.12$ $a_4 = 84.58$ $a_6 = 100.0$
4. $\mu_{X_{\frac{ah_1}{nm}}}^T\left(\frac{ah_1}{nm}\right)$ mit $a_1 = 0$ $a_2 = 0.19$ $a_3 = 0.28$
 $a_4 = 0.63$ $a_5 = 0.67$ $a_6 = 0.95$
5. $\mu_{X_{\frac{ah_3}{nm}}}^T\left(\frac{ah_3}{nm}\right)$ mit $a_1 = 0$ $a_2 = 0.01$ $a_3 = 0.02$
 $a_4 = 0.45$ $a_5 = 0.52$ $a_6 = 0.77$

Auszugsweise seien hier die folgenden Werte dargelegt:

Bildname	$\mu_{X_{mh_1}}^D$	$\mu_{X_{mh_2}}^D$	$\mu_{X_{mh_3}}^D$	$\mu_{X_{\frac{ah_1}{nm}}}^T$	$\mu_{X_{\frac{ah_3}{nm}}}^T$
Tailor_-60	1	0.0105	0	0	0
Cashew nuts_-15	1	0.9896	0.9934	0.7337	1
People_+15	0.8467	0.9485	0.6494	1	1
Mandolin_+60	0	0.0740	1	0	0

Auf Grund der numerischen Ergebnisse der Zugehörigkeitsfunktionen (siehe Tabelle E.12) und des optischen Eindrucks des Farbbildes wird die Einzelbewertungsfunktion EB_{HV} für die Güte der Helligkeitsverteilung durch

$$\begin{aligned}
 EB_{HV} \left(mh_1, mh_2, mh_3, \frac{ah_1}{nm}, \frac{ah_3}{nm} \right) &= \mu_{X_{mh_1}}^D(mh_1) \cdot \mu_{X_{mh_2}}^D(mh_2) \cdot \\
 &\cdot \mu_{X_{mh_3}}^D(mh_3) \cdot \mu_{X_{\frac{ah_1}{nm}}}^T \left(\frac{ah_1}{nm} \right) \cdot \\
 &\cdot \mu_{X_{\frac{ah_3}{nm}}}^T \left(\frac{ah_3}{nm} \right)
 \end{aligned}$$

festgelegt.

3.3.6 Einzelbewertungsfunktion EB_{RA}

Die Festlegung der Einzelbewertungsfunktion EB_{RA} basiert auf der Auswertung der in Tabelle E.6 zusammengefassten numerischen Ergebnisse der ISO SCID LAB Bilder. Der optische Eindruck der mit einem Rauschfilter manipulierten Bilder ist selbst bei einer geringen Manipulation inakzeptabel. Folglich gilt für den Extremwert der Maßzahl ra :

$$ra_{\max} = 0.9797$$

Hieraus ergibt sich unter Berücksichtigung der quasi optimalen Rauschfreiheit (siehe Aussagen 3.12) sowie der nicht definierbaren Wechsellpunkte die Zugehörigkeitsfunktion:

- $\mu_{X_{ra}}^D(ra)$ mit $a_1 = -0.1$ $a_3 = 0.0$ $a_4 = 0.3697$ $a_6 = 0.9797$

Auf eine Darstellung der Ergebnisse in tabellarischer Form wird verzichtet, da die ISO SCID LAB Bilder einen Gütewert von 1 und alle manipulierten Bilder einen Gütewert von 0 besitzen.

Die Einzelbewertungsfunktion EB_{RA} für die Güte des Rauschens wird durch

$$EB_{RA}(ra) = \mu_{X_{ra}}^D(ra)$$

festgelegt.

3.3.7 Einzelbewertungsfunktion EB_{SV}

Die Festlegung der Einzelbewertungsfunktion EB_{SV} basiert auf der Auswertung der in den Tabellen E.7 und E.8 zusammengefassten numerischen Ergebnisse der ISO SCID LAB Bilder. Hierzu werden die Extrema der Werte ms_1 , ms_2 , ms_3 , ms_4 , $\frac{as1}{nm}$, $\frac{as4}{nm}$, gs_{1kor} und s_{\max} bestimmt und als Grenzbereiche der Zugehörigkeitsfunktionen festgesetzt. Es ergibt sich:

	ms_1	ms_2	ms_3	ms_4	$\frac{as1}{nm}$	$\frac{as4}{nm}$	gs_{1kor}	s_{\max}
min	0	8	16	32	0.07	0	0.13	33.27
max	8	16	32	100	0.96	0.53	2.14	141

Ferner werden unter der Annahme, dass die schwachen Veränderungen der Sättigung gerade noch akzeptable Farbbilder ergeben, die Wechsellpunkte bestimmt. Offensichtlich ist die Festlegung der Wechsellpunkte nur für die Werte ms_1 , ms_2 , ms_3 und ms_4 möglich, da die Werte $\frac{as1}{nm}$, $\frac{as4}{nm}$, gs_{1kor} und s_{\max} zu stark vom Bildmotiv abhängig sind.

Es ergeben sich die folgenden Werte:

	ms_{1w}	ms_{2w}	ms_{3w}	ms_{4w}
min	2.9	10.38	19.77	40.04
max	4.9	12.47	23.76	53.33

Hieraus ergeben sich unter Berücksichtigung der quasi optimalen Sättigungsverteilung (siehe Aussagen 3.15) und der Wechsellpunkte acht Zugehörigkeitsfunktionen:

1. $\mu_{X_{ms_1}}^T(ms_1)$ mit $a_1 = 0$ $a_2 = 2.9$ $a_3 = 2.95$
 $a_4 = 4.85$ $a_5 = 4.9$ $a_6 = 8$
2. $\mu_{X_{ms_2}}^T(ms_2)$ mit $a_1 = 8$ $a_2 = 10.38$ $a_3 = 10.88$
 $a_4 = 11.97$ $a_5 = 12.47$ $a_6 = 16$
3. $\mu_{X_{ms_3}}^T(ms_3)$ mit $a_1 = 16$ $a_2 = 19.77$ $a_3 = 20.27$
 $a_4 = 23.26$ $a_5 = 23.76$ $a_6 = 32$
4. $\mu_{X_{ms_4}}^T(ms_4)$ mit $a_1 = 32$ $a_2 = 40.04$ $a_3 = 40.54$
 $a_4 = 52.83$ $a_5 = 53.33$ $a_6 = 100$
5. $\mu_{X_{\frac{as1}{nm}}}^D(\frac{as1}{nm})$ mit $a_1 = 0.07$ $a_3 = 0.27$ $a_4 = 0.74$ $a_6 = 0.96$
6. $\mu_{X_{\frac{as4}{nm}}}^D(\frac{as4}{nm})$ mit $a_1 = 0$ $a_3 = 0$ $a_4 = 0.17$ $a_6 = 0.53$
7. $\mu_{X_{gs_{1kor}}}^D(gs_{1kor})$ mit $a_1 = 0.13$ $a_3 = 0.2$ $a_4 = 0.66$ $a_6 = 2.14$
8. $\mu_{X_{s_{max}}}^D(s_{max})$ mit $a_1 = 33.27$ $a_3 = 70.94$ $a_4 = 124.11$ $a_6 = 141$

Auszugsweise seien hier die folgenden Werte dargelegt:

Bildname	$\mu_{X_{ms_1}}^T$	$\mu_{X_{ms_2}}^T$	$\mu_{X_{ms_3}}^T$	$\mu_{X_{ms_4}}^T$	$\mu_{X_{\frac{as1}{nm}}}^D$	$\mu_{X_{\frac{as4}{nm}}}^D$	$\mu_{X_{gs_{1kor}}}^D$	$\mu_{X_{s_{max}}}^D$
Tailor ₋₆₀	0.332	1	0.498	0.165	0.079	1	0.155	0.213
People ₋₁₅	1	0.426	1	1	1	1	1	1
Meal ₊₁₅	0.468	1	1	1	1	1	0.809	1
Mandol ₊₆₀	1	0.945	1	0.443	0.045	0	1	0.393

Auf Grund der numerischen Ergebnisse der Zugehörigkeitsfunktionen (siehe Tabelle E.13) und des optischen Eindrucks des Farbbildes wird die Einzelbewertungsfunktion EB_{SV} für die Güte der Helligkeitsverteilung durch

$$\begin{aligned}
EB_{SV} \left(ms_1, ms_2, ms_3, ms_4, \frac{as_1}{nm}, \frac{as_4}{nm}, gs_{1kor}, s_{\max} \right) = \\
= \mu_{X_{ms_1}}^T(ms_1) \cdot \mu_{X_{ms_2}}^T(ms_2) \cdot \mu_{X_{ms_3}}^T(ms_3) \cdot \\
\cdot \mu_{X_{ms_4}}^T(ms_4) \cdot \mu_{X_{\frac{as_1}{nm}}}^D \left(\frac{as_1}{nm} \right) \cdot \mu_{X_{\frac{as_4}{nm}}}^D \left(\frac{as_4}{nm} \right) \cdot \\
\cdot \mu_{X_{gs_{1kor}}}^D(gs_{1kor}) \cdot \mu_{X_{s_{\max}}}^D(s_{\max})
\end{aligned}$$

festgelegt.

3.3.8 Festlegung der Gesamtbewertung

Das Ziel einer modularen Gesamtbewertungsfunktion wird durch die Kombination der Einzelbewertungen erreicht. Unter Berücksichtigung der Formeln 3.19 und 3.20 ergeben sich zwei Gesamtbewertungsfunktionen GB_{g_1} und GB_{g_2} :

$$\begin{aligned}
GB_{g_1} &= EB_{BS} \cdot EB_{VF} \cdot EB_{FV} \cdot EB_{HV} \cdot EB_{RA} \cdot EB_{SV} \\
GB_{g_2} &= EB_{BS}^{w_{BS}} \cdot EB_{VF}^{w_{VF}} \cdot EB_{FV}^{w_{FV}} \cdot EB_{HV}^{w_{HV}} \cdot EB_{RA}^{w_{RA}} \cdot EB_{SV}^{w_{SV}} \quad (3.21)
\end{aligned}$$

mit

$$w_{BS} = \frac{1}{6}, \quad w_{VF} = \frac{1}{6}, \quad w_{FV} = \frac{1}{6}, \quad w_{HV} = \frac{1}{6}, \quad w_{RA} = \frac{1}{6}, \quad w_{SV} = \frac{1}{6}$$

In der Funktion GB_{g_1} werden alle Einzelbewertungen als vollkommen gleichrangig angesehen, d.h. alle Einzelbewertungen gehen im vollem Umfang in die Gesamtbewertung ein.

In die Funktion GB_{g_2} sind alle Einzelbewertungen gleichgewichtet integriert, d.h. alle Einzelbewertungen gehen mit demselben Anteil in die Gesamtbewertung ein.

Ferner erlaubt die Wahl der Gewichte eine Gruppierung der Einzelbewertungen hinsichtlich zusammengehöriger Aspekte der Güte eines Farbbildes. Eine mögliche Gruppierung nach Aspekten der Güte lautet:

$$\{EB_{BS}, EB_{RA}\}, \quad \{EB_{FV}\}, \quad \{EB_{VF}\}, \quad \{EB_{HV}, EB_{SV}\}$$

Unter Berücksichtigung der Gleichrangigkeit der einzelnen Gruppen sowie der Gewichtung der Gruppenmitglieder zueinander ergibt sich eine mögliche Gesamtbewertung:

$$GB_{g_3} = EB_{BS}^{w_{BS}} \cdot EB_{VF}^{w_{VF}} \cdot EB_{FV}^{w_{FV}} \cdot EB_{HV}^{w_{HV}} \cdot EB_{RA}^{w_{RA}} \cdot EB_{SV}^{w_{SV}} \quad (3.22)$$

mit

$$w_{BS} = \frac{2}{3}, \quad w_{RA} = \frac{1}{3}, \quad w_{FV} = 1, \quad w_{VF} = 1, \quad w_{HV} = \frac{3}{4}, \quad w_{SV} = \frac{1}{4}$$

Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass eine ausführliche Betrachtung der Vielzahl von vorhandenen Gewichtungen hinsichtlich einer Gruppierung der Einzelbewertungen den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde und folglich nachfolgenden Arbeiten vorbehalten bleibt.

Zum Erhalt aussagekräftiger Vergleichswerte der drei Gesamtbewertungen dient exemplarisch die auf dem ISO SCID LAB Bild "People" beruhende Testreihe (siehe Tabellen E.14 und E.15). Auszugsweise seien hier die folgenden Werte dargelegt:

Bewertung	Manipulation			
	Bildschärfe			
	_s1	_s3	_us1	_us5
GB_{g_1}	0.008	0	0.07	0
GB_{g_2}	0.411	0	0.642	0
GB_{g_3}	0.181	0	0.141	0
	Farbenvielfalt			
	_+15	_+60	_-15	_-60
GB_{g_1}	0.387	0	0.099	0
GB_{g_2}	0.854	0	0.681	0
GB_{g_3}	0.715	0	0.356	0
Bewertung	Manipulation			
	Helligkeit			
	_+15	_+60	_-15	_-60
GB_{g_1}	0.08	0	0.081	0
GB_{g_2}	0.65	0	0.658	0
GB_{g_3}	0.3	0	0.211	0
	Sättigung			
	_+15	_+60	_-15	_-60
GB_{g_1}	0.411	<0.001	0.425	0.003
GB_{g_2}	0.862	0.119	0.867	0.377
GB_{g_3}	0.8	0.035	0.807	0.005

Der Vergleich der numerischen Werte der Tabellen mit dem optischen Eindruck der Testbilder ergibt, dass mit der Bewertungsfunktion GB_{g_2} eine ausgewogene Gesamtbewertung erreicht wird. Aus diesem Grund wird die Funktion GB_{g_2} im weiteren Verlauf verwendet um ein Optimierungsverfahren für Farbbilder zu entwickeln.

Kapitel 4

Manipulation von Farbbildern

Da die Manipulation von Farbbildern ein sehr umfassendes Gebiet darstellt, werden in diesem Kapitel nur die Manipulationsfunktionen vorgestellt, die zur Entwicklung des Optimierungsverfahrens in Kapitel 5 verwendet werden. Eine umfassende Erörterung dieses Themengebietes würde den Rahmen dieser Arbeit bei Weitem sprengen. Zum Nachweis der Existenz eines Optimierungsverfahrens, das auf der Gesamtbewertungsfunktion GB_{g_2} basiert, werden daher elementare Bildmanipulationen vorgenommen. Hierbei muss insbesondere berücksichtigt werden, dass ein autonomes Verfahren entwickelt wird. Folglich muss gewährleistet sein, dass die verwendeten Funktionen keine globale oder lokale Inversion der Farbwerte des Bildes verursachen. Diese Bedingung wird durch den Gebrauch monoton steigender Funktionen erfüllt. Ferner muss bei der Manipulation von Farbbildern, deren Bildpunkte in einem auf Helligkeit, Sättigung und Farbton basierenden Bezugsfarbraum codiert sind, berücksichtigt werden, dass nur die Veränderung der Helligkeits- und Sättigungswerte autonom durchführbar ist, da eine autonome Manipulation der Farbtonwerte i. Allg. das Motiv verfälscht (siehe [Stri87]).

4.1 Bildschärfe

Die Transformation eines Farbbildes mit dem Ziel die Bildschärfe zu erhöhen basiert auf der Methode des "unsharp masking"-Verfahrens für Grauwertbilder (siehe [Klet92], Seite 196ff). Das Verfahren beruht auf der Bildung der Differenz der Grauwerte zwischen dem Ausgangsfarbbild und einem mit Gauß-Tiefpass gefilterten lokalen Fensters des Ausgangsfarbbildes. Die Variation der Hochpasscharakteristik dieser Transformation wird durch die Gewichtung der Subtraktion erzielt.

Die Adaption dieses Verfahrens an Farbbilder erfolgt durch die Bildung der Differenzen der CIE LAB Werte. Das Verfahren wird unter Verwendung eines Wertes

c und eines Fensters $F_{i,j}$ mit der Fenstergröße f

$$\begin{aligned} F_{i,j} &= \\ &= \left\{ (s,t) \mid i - \frac{f}{2} \leq s \leq i + \frac{f}{2} \wedge j - \frac{f}{2} \leq t \leq j + \frac{f}{2} \right\} \end{aligned}$$

um den Bildpunkt $P_{i,j}$ durch die Gleichungen

$$T_U(L_{i,j}, c, f) = \frac{1}{1-c} \left(L_{i,j} - c \cdot \frac{1}{W} \sum_{(s,t) \in F_{i,j}} (w_{s,t} \cdot L_{s,t}) \right) \quad (4.1)$$

$$T_U(a_{i,j}, c, f) = \frac{1}{1-c} \left(a_{i,j} - c \cdot \frac{1}{W} \sum_{(s,t) \in F_{i,j}} (w_{s,t} \cdot a_{s,t}) \right) \quad (4.2)$$

$$T_U(b_{i,j}, c, f) = \frac{1}{1-c} \left(b_{i,j} - c \cdot \frac{1}{W} \sum_{(s,t) \in F_{i,j}} (w_{s,t} \cdot b_{s,t}) \right) \quad (4.3)$$

mit

$$\begin{aligned} c &\in [0, 1[\\ f &\in \{2, 4, 6, 8, \dots\} \\ W &= \sum_{(s,t) \in F_{i,j}} w_{s,t} \end{aligned}$$

dargestellt. Die in 4.1, 4.2, 4.3 verwendeten Gewichte $w_{s,t}$ werden unter Berücksichtigung der Fenstergröße f so berechnet, dass die gaußförmige Impulsantwort des Tiefpassfilters am Rande des Fensters auf $e^{-\frac{9}{2}}$ des Maximalwertes reduziert wurde. Dies wird durch

$$w_{s,t} = \exp \left[-\frac{1}{A_3} \left((s-i)^2 + (t-j)^2 \right) \right]$$

mit

$$A_3 = \frac{(f-1)^2}{9}$$

erzielt. Die Manipulation der Bildschärfe eines Farbbildes P erfolgt durch die Funktion

$$\begin{aligned} M_U(P) &= T_U(L_{i,j}, c, f) \wedge T_U(a_{i,j}, c, f) \wedge T_U(b_{i,j}, c, f) \\ &: \forall i \in \{1, \dots, n\} \wedge j \in \{1, \dots, m\} \end{aligned}$$

4.2 Farbverschiebung

Die Veränderung der Werte $a_{i,j}$ und $b_{i,j}$ eines Bildpunktes $P_{i,j}$ wird als farbverschiebende Manipulation bezeichnet. Seien die Werte a_v und b_v gegeben, dann wird eine Farbverschiebung der Bildpunkte des Farbbildes P hinsichtlich der Werte a_v und b_v durch die Gleichung

$$T_F(a_{i,j}, b_{i,j}, a_v, b_v) = a_{i,j} + a_v \cdot lw_{i,j} \quad \wedge \\ \wedge \quad b_{i,j} + b_v \cdot lw_{i,j}$$

mit

$$a_v \in [-100, 100] \\ b_v \in [-100, 100] \\ lw_{i,j} = \sqrt{1 - \left(2 \cdot \frac{L_{i,j}}{100} - 1\right)^2}$$

beschrieben. Hierbei dient der Ausgleichsfaktor $lw_{i,j}$ (siehe Abbildung 4.1) der annähernden Berücksichtigung der idealen Topologie des CIELAB Farbraums. Die

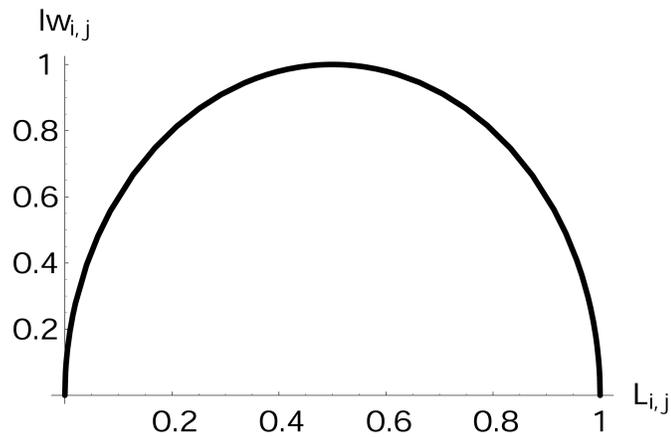


Abbildung 4.1: Ausgleichsfaktor $lw_{i,j}$

Manipulation der Farbverschiebung eines Farbbildes P erfolgt durch die Funktion

$$M_F(P) = T_F(a_{i,j}, b_{i,j}, a_v, b_v) \quad (4.4)$$

$$: \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \wedge j \in \{1, \dots, m\} \quad (4.5)$$

4.3 Helligkeit und Sättigung

Zur Manipulation der Helligkeit und der Sättigung eines Farbbildes dienen in dieser Arbeit die allgemeine Lineartransformation und die S-Transformation. Beiden Transformationen ist gemein, dass der Nullpunkt und das Bereichsmaximum unverändert bleiben. Aus diesem Grund wird vor der Bildtransformation eine lineare Streckung der Helligkeits- und Sättigungswerte mittels der Funktion

$$D(x, M) = \begin{cases} 0 & : x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \cdot M & : x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ M & : x > x_{\max} \end{cases} \quad (4.6)$$

durchgeführt (siehe [Klet92], Seite 126f). Es ergibt sich aus der Gleichung 4.6 die Funktion

$$L'_{i,j} = D(L_{i,j}, L^{\max})$$

mit

$$x_{\min} = \min\{L_{i,j} : i \in \{1, \dots, n\} \wedge j \in \{1, \dots, m\}\}$$

$$x_{\max} = \max\{L_{i,j} : i \in \{1, \dots, n\} \wedge j \in \{1, \dots, m\}\}$$

$$L^{\max} = 100$$

zur linearen Streckung der Helligkeitswerte eines Farbbildes P .

Analog wird die Streckung der Sättigung eines Farbbildpunktes $C_{i,j}$ unter Berücksichtigung von C^{\max} durchgeführt. Die Festlegung von C^{\max} erfolgt unter Wahrung des farblichen Charakters des Bildes P durch

$$C^{\max} = \sqrt{P_C^{\max}} \cdot \sqrt{141}$$

mit

$$P_C^{\max} = \max\{C_{i,j} : i \in \{1, \dots, n\} \wedge j \in \{1, \dots, m\}\}$$

4.3.1 allgemeine Lineartransformation

Die allgemeine Lineartransformation basiert auf der linearen Werteskalierung (siehe [Habe95], Seite 21f) und wird durch die Funktion

$$T_L(x, a_1, a_2) = \begin{cases} \frac{0.3x}{a_1} & : 0 \leq x \leq a_1 \\ \frac{0.4(x - a_1)}{a_2 - a_1} + 0.3 & : a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{0.3(x - a_2)}{1 - a_2} + 0.7 & : a_2 \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (4.7)$$

mit

$$\begin{aligned} x &\in [0, 1] \\ a_1, a_2 &\in [0, 1] \\ a_1 &< a_2 \end{aligned}$$

beschrieben (siehe Abbildung 4.2). Die Transformation der Helligkeit eines Farb-

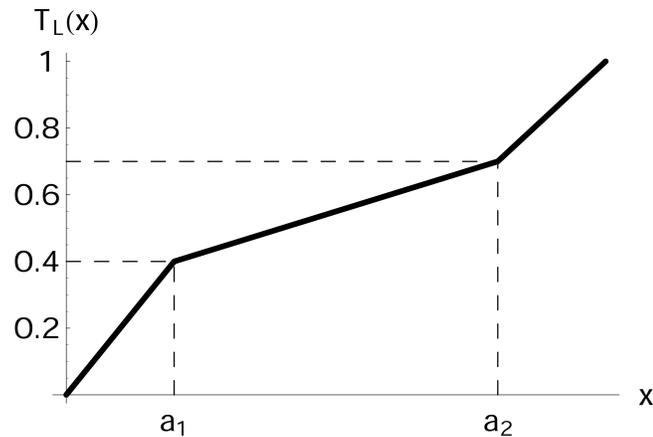


Abbildung 4.2: allgemeine Lineartransformation

bildpunktes $B_{i,j}$ erfolgt mittels Gleichung 4.7 durch

$$L'_{i,j} = L^{\max} \cdot T_L(l_{i,j}, a_1, a_2)$$

mit

$$l_{i,j} = \frac{L_{i,j}}{L^{\max}}$$

Analog wird die Sättigung eines Farbbildpunktes $C_{i,j}$ unter Berücksichtigung von C^{\max} (siehe 4.3) transformiert.

4.3.2 S-Transformation

Die S-Transformation basiert auf einer Potenzfunktion mit einem frei wählbaren Exponenten (siehe [Klet92], Seite 128ff) und ist durch die Funktion

$$T_S(x, r, s) = \begin{cases} \frac{x^r}{s^{r-1}} & : 0 \leq x \leq s \\ 1 - \frac{(1-x)^r}{(1-s)^{r-1}} & : s \leq x \leq 1 \end{cases} \quad (4.8)$$

mit

$$\begin{aligned} x &\in [0, 1] \\ r &\in [1, \infty[\\ s &\in [0, 1] \end{aligned}$$

festgelegt. Die Abbildung 4.3 diene der Verdeutlichung. Die Transformation der

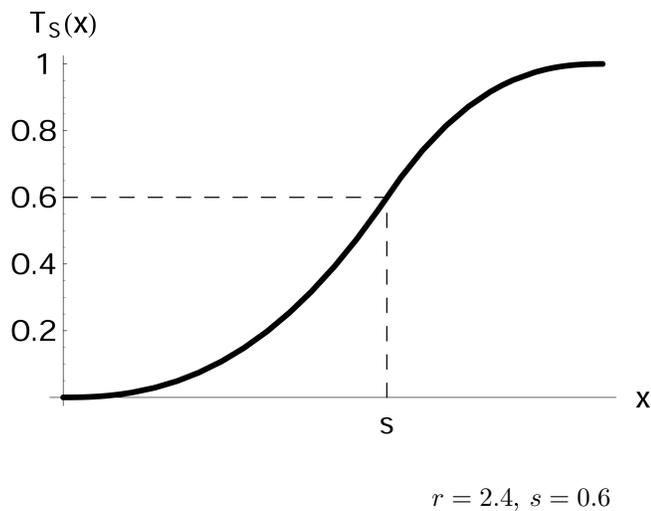


Abbildung 4.3: S-Transformation

Helligkeit eines Farbbildpunktes $B_{i,j}$ erfolgt mittels Gleichung 4.8 durch

$$L'_{i,j} = L^{\max} \cdot T_S(l_{i,j}, r, s)$$

mit

$$\begin{aligned} l_{i,j} &= \frac{L_{i,j}}{L^{\max}} \\ L^{\max} &= 100 \end{aligned}$$

Die Transformation der Sättigung eines Farbbildpunktes $C_{i,j}$ unter Berücksichtigung von C^{\max} (siehe 4.3) erfolgt analog.

4.3.3 Bildmanipulation

Zum Erhalt einer variablen Manipulationsfunktion werden die allgemeine Lineartransformation und die S-Transformation miteinander kombiniert. Basierend auf der Veränderung der Helligkeit eines Bildpunktes wird die Manipulation der Helligkeit eines Farbbildes P durch

$$\begin{aligned}
 M_L(P) &= w_L T_L(L_{i,j}, a_1, a_2) \cdot \\
 &\quad \cdot w_{S_1} T_S(L_{i,j}, r_1, s_1) \cdot \\
 &\quad \cdot w_{S_2} T_S(L_{i,j}, r_2, s_2) \\
 &: \forall i \in \{1, \dots, n\} \wedge j \in \{1, \dots, m\}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$

mit

$$\begin{aligned}
 w_L + w_{S_1} + w_{S_2} &= 1 \\
 w_L, w_{S_1}, w_{S_2} &\in [0, 1] \\
 s_1 &\in [0, 0.5] \\
 s_2 &\in [0.5, 1]
 \end{aligned}$$

festgelegt. Diese Wahl der Bildmanipulation ermöglicht einen hohen Freiheitsgrad bei der Veränderung der Helligkeitswerte des Farbbildes P . Zur Veranschaulichung diene die Manipulation $M_L(P)$ mit den Gewichten (siehe Abbildungen 4.4 bis 4.7):

$$w_1 = 0.4 \quad w_2 = 0.4 \quad w_3 = 0.2$$

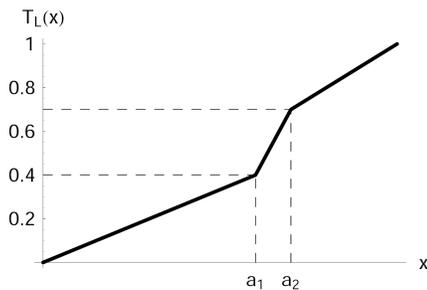


Abbildung 4.4: $T_L(L_{i,j}, 0.6, 0.7)$

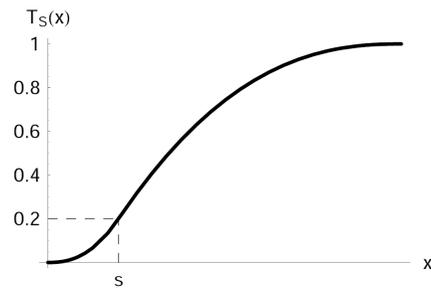


Abbildung 4.5: $T_S(L_{i,j}, 0.2, 2.4)$

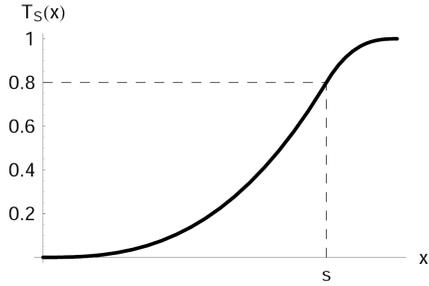


Abbildung 4.6: $T_S(L_{i,j}, 0.8, 2.7)$

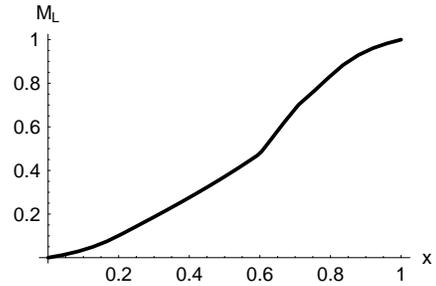


Abbildung 4.7: $M_L(P)$

Analog wird die Manipulation der Sättigung eines Farbbildes P durch

$$\begin{aligned}
 M_C(P) &= w_L T_L(C_{i,j}, a_1, a_2) \cdot \\
 &\quad \cdot w_{S_1} T_S(C_{i,j}, r_1, s_1) \cdot \\
 &\quad \cdot w_{S_2} T_S(C_{i,j}, r_2, s_2) \\
 &: \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \wedge j \in \{1, \dots, m\}
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

festgelegt.

4.4 Rauschunterdrückung

Die Transformation eines Farbbildes mit dem Ziel der Rauschunterdrückung basiert auf der Anwendung von Binominalmasken als Glättungsfilter (siehe [Jähn89], Seite 97f). Das Verfahren beruht auf der Bildung der Binominalkoeffizienten, die bei der Neuberechnung eines Bildpunktes $P_{i,j}$ als Gewichte der umgebenden Bildpunkte dienen. Ein Faktor c bestimmt den Grad der Veränderung zwischen dem Bildpunkt $P_{i,j}$ und seiner Neuberechnung.

Die Adaption dieses Verfahrens an Farbbilder erfolgt durch die Neuberechnung der CIE LAB Werte. Das Verfahren wird unter Verwendung eines Wertes c und eines Fensters $F_{i,j}$ mit der Fenstergröße f

$$\begin{aligned}
 F_{i,j} &= \\
 &= \left\{ (s,t) \mid i - \frac{f}{2} \leq s \leq i + \frac{f}{2} \wedge j - \frac{f}{2} \leq t \leq j + \frac{f}{2} \right\}
 \end{aligned}$$

um den Bildpunkt $P_{i,j}$ durch die Gleichungen

$$\begin{aligned}
 T_R(L_{i,j}, c, f) &= (1 - c)L_{i,j} + c \cdot \sum_{(s,t) \in F_{i,j}} B_{st}^f \cdot L_{s,t} \\
 T_R(a_{i,j}, c, f) &= (1 - c)a_{i,j} + c \cdot \sum_{(s,t) \in F_{i,j}} B_{st}^f \cdot a_{s,t} \\
 T_R(b_{i,j}, c, f) &= (1 - c)b_{i,j} + c \cdot \sum_{(s,t) \in F_{i,j}} B_{st}^f \cdot b_{s,t}
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

mit

$$\begin{aligned}
 c &\in [0, 1] \\
 f &\in \{2, 4, 6, 8, \dots\} \\
 B_{st}^f &= \frac{1}{2^{2f}} \frac{f!}{\left(\frac{f}{2} - (s-i)\right)! \left(\frac{f}{2} + (s-i)\right)!} \frac{f!}{\left(\frac{f}{2} - (t-j)\right)! \left(\frac{f}{2} + (t-j)\right)!}
 \end{aligned}$$

dargestellt. Die Manipulation zur Rauschunterdrückung eines Farbbildes P erfolgt durch die Funktion

$$\begin{aligned}
 M_R(P) &= T_R(L_{i,j}, c, f) \wedge T_R(a_{i,j}, c, f) \wedge T_R(b_{i,j}, c, f) \\
 &: \quad \forall i \in \{1, \dots, n\} \wedge j \in \{1, \dots, m\}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Abschließend sei für weiterführende Betrachtungen auf eine Auswahl der Literatur, die das umfangreiche Thema der Farbbildmanipulation behandelt, verwiesen (siehe [Cent97], [Pita00], [Plat96], [Prat91], [Zuga98]).

Kapitel 5

Entwicklung eines genetischen Programms

Die Kombination von Bewertungsfunktion und verschiedenen Manipulationsfunktionen mit dem Ziel ein Farbbild so zu ändern, dass ein Normalbeobachter das veränderte Farbbild als quasi optimal hinsichtlich des Optimierungsziels empfindet, führt zu einem numerischen Optimierungsverfahren. Das zu lösende Optimierungsproblem in dieser Arbeit basiert auf einer Bewertungsfunktion, die auf mehrwertiger Logik beruht. Folglich ist die Verwendung klassischer numerischer Optimierungsverfahren nicht möglich, da diese eine (stetig) differenzierbare Bewertungsfunktion voraussetzen (siehe [Gill91], Seiten 337-348; [Koji91]; [Schw88], Seiten 186-210).

Ein Optimierungsverfahren, das die in Kapitel 3 entwickelte Bewertungsfunktion einwandfrei verarbeitet, stellt die genetische Programmierung dar. Insbesondere die elementare Anpassung der genetischen Programmierung an die Problemstellung der Farbbildoptimierung führte zu dieser Auswahl. Da im Rahmen dieser Arbeit allein die Existenz eines auf der entwickelten Bewertungsstruktur basierenden Optimierungsverfahrens nachgewiesen wird, sei an dieser Stelle auf weitere Verfahren zur Optimierung nicht differenzierbarer Funktionen verwiesen (siehe [Demy85], [Pint96], [Pola97]).

5.1 Grundlagen genetischer Programmierung

Die genetische Programmierung stellt ein ständig wachsendes Forschungsgebiet dar, das in verschiedene Bereiche der Technik und Informatik Einzug hält.

Dieser Umstand ist insbesondere durch die folgenden Aussagen (siehe [Kinn94], Seite 22) begründet:

1. Für viele nicht linearen Problemansätze existiert kein alternatives Lösungsverfahren.
2. Die Codierung und Umsetzung des Verfahrens ist unkompliziert und einfach.

Auf diesen Aussagen beruht die Auswahl der genetischen Programmierung im Rahmen dieser Arbeit.

Für eine detaillierte Betrachtung dieses Themengebietes sei auf die weiterführende Literatur verwiesen (siehe [Kinn94], [Mich99], [Man00]).

5.1.1 Biologischer Hintergrund

Die biologische Genetik im Bereich der Evolutionstheorie dient als Vorbild für die Entwicklung genetischer Programme. Die Information über die Eigenschaften eines biologischen Individuums sind in den Chromosomen codiert, deren chemische Basis die Desoxyribonukleinsäure (kurz: DNS) mit ihren vier Nukleotiden (Adenin, Thymin, Cytosin, Guanin) bildet (siehe [Kinn94], Seite 55ff).

Durch Kreuzungsversuche mit Frucht- und Taufiegen entdeckte T.H. Morgan Vererbungsgesetze, die auf der über Kreuz Verknüpfung zweier Chromosomenstränge an einer Bruchstelle (kurz: Kreuzung, engl. crossover) beruht. Ferner erfolgen zufällige Veränderungen von einzelnen Chromosomen durch Mutation. Nach der Selektionstheorie von Charles Darwin führt die natürliche Auslese, der am besten an die Umwelt angepassten Individuen, zu einer Umbildung der Art von Generation zu Generation. Damit Selektion und Evolution funktionieren, müssen die folgenden Voraussetzungen gegeben sein:

- Es existiert eine Population von Individuen.
- Die Individuen einer Population besitzen unterschiedliche Eigenschaften.
- Die Fitness eines Individuums wird von diesen Eigenschaften bestimmt.
- Die Individuen einer Population besitzen die Fähigkeit zur Reproduktion.
- Die Individuen mit der besseren Fitness verdrängen die anderen aus der Population.

Obwohl dieses Modell eine Abstrahierung der Realität darstellt, ist es geeignet die Grundidee der Evolution hinreichend zu erläutern.

5.1.2 Algorithmische Umsetzung

Die Übertragung des obigen Evolutionsmodells auf einen Algorithmus ist möglich, falls die folgenden Bedingungen erfüllt sind:

- Es muss eine Population von Individuen existieren.
- Alle Individuen sind unterschiedlich mittels einer Objektkette über einer Grundmenge festgelegt.
- Zur Veränderung der Individuen existieren genetische Operationen.
- Es existiert eine Funktion, die die Fitness eines jeden Individuums festsetzt.
- Eine Neuordnung der Population erfolgt Fitness-orientiert.

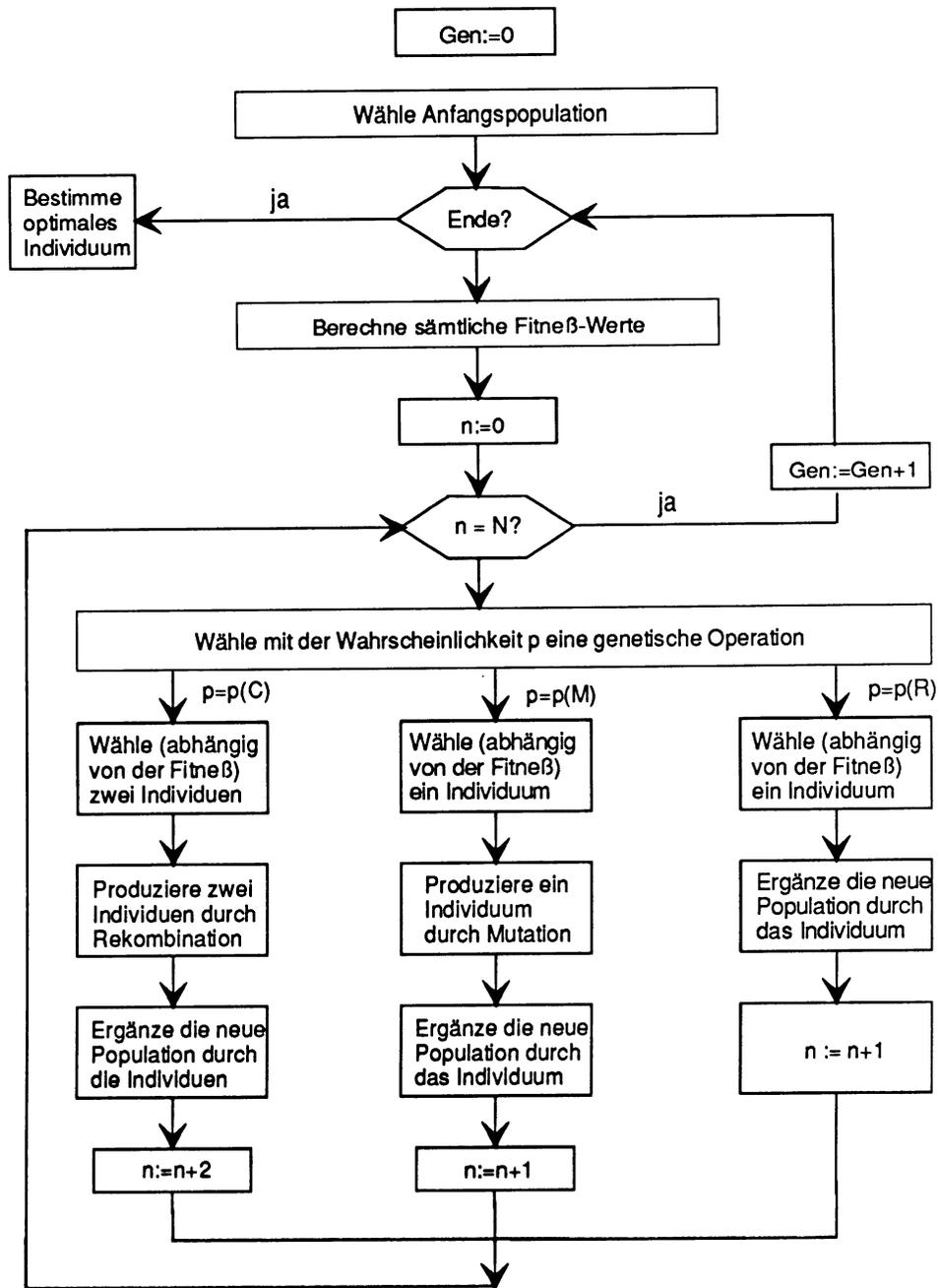
Um ein konkretes Problem unter Anwendung eines genetischen Algorithmus zu lösen, müssen die folgenden Aspekte

- Zielfunktion,
- Abbruchkriterium,
- genetische Kodierung des Problems,
- Auswahlstrategie,
- genetische Operatoren

festgelegt werden. Eine Erläuterung aller dieser Faktoren würde den Rahmen dieser Arbeit bei Weitem sprengen, daher wird an dieser Stelle auf die Festlegung in Abschnitt 5.2 sowie die Literatur ([Heis94], [Mich99]) verwiesen. Den gesamten Ablauf eines genetischen Programms verdeutlicht die Abbildung 5.1.

5.2 Umsetzung der Farbbildoptimierung

Zur Lösung des Problems der Farbbildoptimierung mittels eines genetischen Programms müssen die in Unterabschnitt 5.1.2 dargelegten Aspekte der Umsetzung berücksichtigt werden. Das resultierende genetische Programm wird im weiteren als genetische Farbbildoptimierung (kurz: GFO) bezeichnet. Die Definition 5.1 legt den Begriff der Generation fest.



(siehe [Kinn94], Seite 69)

Abbildung 5.1: Genetisches Programm

Definition 5.1 (Generation) Die Generation Gen_i eines genetischen Programms zur Farbbildoptimierung besitzt die Größe gen_{anz} und besteht aus den Farbbildern $P_j \in \mathbf{P}$ mit $j \in \{1, \dots, gen_{anz}\}$ der i -ten Generation.

Die Generation Gen_{i-1} wird als Elterngeneration der Generation Gen_i und die Generation Gen_{i+1} wird als Nachfolgenergeneration der Generation Gen_i bezeichnet.

Die Zielfunktion des genetischen Programms beruht auf der in der Formel 3.21 festgelegten Gesamtbewertungsfunktion GB_{g_2} . Diese besitzt die Möglichkeit, die Einzelbewertungen auf Grund der mehrwertigen Logik ihrer numerischen Ergebnisse an empirische Auswertungen oder konkreten Manipulationsintentionen anzupassen.

Das Abbruchkriterium des genetischen Programms basiert auf zwei Entscheidungsaspekten. Das genetische Programm wird beendet, falls für ein Farbbild $P \in \mathbf{P}$ die Aussage

$$GB_{g_2}(P) = 1$$

gilt oder falls für die Generationsbewertungen

$$GB_{Gen}^i = \sum_{P_j \in Gen_i} GB_{g_2}(P_j) \quad i \in \{1, 2, 3, \dots\}, j \in \{1, \dots, gen_{anz}\}$$

dreier aufeinanderfolgender Generationen die Aussage

$$1.01 \cdot GB_{Gen}^i > GB_{Gen}^{i+1} \quad i \in \{k, \dots, k+2\}$$

gilt. Das erste Abbruchkriterium gewährleistet, dass das genetische Programm beendet wird, falls ein Farbbild mit der quasi optimalen Gesamtbewertung gefunden wurde. Da i. Allg. nicht erwartet wird, dass jedes Ausgangsfarbbild in ein Farbbild mit einer quasi optimalen Gesamtbewertung transformierbar ist, erlaubt das zweite Abbruchkriterium ein Ende des genetischen Programms, falls bei sechs aufeinander folgenden Generationen keine Verbesserung der Generationsbewertung um mindestens 1% erfolgt. Diese Variante berücksichtigt die Tatsache, dass mit anhaltender Degeneration der Population die Wahrscheinlichkeit sinkt ein besseres Individuum zu erzeugen (siehe [Heis94], Seite 105). Eine Bestätigung dieser Aussage hinsichtlich der genetischen Farbbildoptimierung wird in Abschnitt 6.1 dargelegt.

5.2.1 Genetische Codierung

Die Festlegung der genetischen Codierung orientiert sich an den in Kapitel 4 vorgestellten Manipulationsfunktionen. Sei ein Ausgangsfarbbild P_0 gegeben, dann

ergeben sich durch die Manipulationen weitere Farbbilder. In Bezug auf die Manipulationsfunktionen $M_C(P)$, $M_F(P)$, $M_H(P)$, $M_R(P)$ und $M_U(P)$ ergibt sich mittels eines Parametervektors

$$p = (a_v, b_v, a_1^L, a_2^L, r_1^L, s_1^L, r_2^L, s_2^L, a_1^C, a_2^C, r_1^C, s_1^C, r_2^C, s_2^C, f^U, c^U, f^R, c^R)$$

mit den Parametern

- a_v, b_v : globale Farbverschiebung
- a_1^L, a_2^L : Helligkeitsveränderung durch linear Transformation
- r_1^L, s_1^L : Helligkeitsveränderung durch S-Transformation 1
- r_2^L, s_2^L : Helligkeitsveränderung durch S-Transformation 2
- a_1^C, a_2^C : Sättigungssveränderung durch linear Transformation
- r_1^C, s_1^C : Sättigungsveränderung durch S-Transformation 1
- r_2^C, s_2^C : Sättigungsveränderung durch S-Transformation 2
- f^U, c^U : Bildschärfe durch unsharp masking
- f^R, c^R : Rauschunterdrückung

sowie eines Gewichtungsvektors

$$w = (w_{L1}, w_{L2}, w_{L3}, w_{C1}, w_{C2}, w_{C3})$$

mit

$$\begin{aligned} w_{L1} + w_{L2} + w_{L3} &= 1 \\ w_{C1} + w_{C2} + w_{C3} &= 1 \end{aligned}$$

durch die sukzessive Veränderung

1. $P_p^1 = M_F(P)$ mit den Werten a_v, b_v .
2. $P_p^2 = M_L(P)$ mit den Werten $a_1^L, a_2^L, r_1^L, s_1^L, r_2^L, s_2^L, w_{L1}, w_{L2}, w_{L3}$
3. $P_p^3 = M_C(P)$ mit den Werten $a_1^C, a_2^C, r_1^C, s_1^C, r_2^C, s_2^C, w_{C1}, w_{C2}, w_{C3}$
4. $P_p^4 = M_R(P)$ mit den Werten f^R, c^R .
5. $P_p^5 = M_U(P)$ mit den Werten f^U, c^U .

ein neues Farbbild P_p . Die Umsetzung des Parametervektors p und des Gewichtungsvektors w als Chromosomen ermöglicht die Durchführung eines genetischen Programms. Es ergeben sich somit 24 Chromosomen, die durch ihre jeweilige Festlegung ein Farbbild, das auf dem Ausgangsbild basiert, erzeugen.

Definition 5.2 (Individuum der GFO) *Die Chromosomen (p, w) eines Individuums x der GFO sind durch den Parametervektor p und den Gewichtungsvektor w festgelegt. Die Anzahl der Chromosomen eines Individuums wird mit x_{anz} bezeichnet.*

Die Chromosomen eines Individuums sind in der GFO als Gleitkommazahl festgelegt. Eine Festlegung als Binärzahl ist auf Grund der notwendigen Transformation in eine Gleitkommazahl, die in den Manipulationsfunktionen verwendet wird, nicht sinnvoll. Ferner ist die intermediäre Rekombination (siehe 5.2.3) nur mit Gleitkommazahlen durchführbar.

5.2.2 Auswahlverfahren

Ein genetisches Programm verändert einzelne Individuen einer Generation durch Anwendung genetischer Operatoren. Die Festsetzung der zu verändernden Individuen erfolgt über ein Fitness-orientiertes Auswahlverfahren. Im Rahmen der GFO wird das Roulette-Auswahlverfahren verwendet, da hierbei vorrangig Individuen mit hoher Fitness ausgewählt werden. Ferner besteht eine geringe Wahrscheinlichkeit, dass ein Individuum mit niedriger Fitness bestimmt und anschließend mit einem genetische Operator verändert wird. Hierdurch wird berücksichtigt, dass sich die Fitness eines "schlechten" Individuums durch Mutation oder Rekombination deutlich verbessern kann. Dieser Umstand begründet den häufigen Gebrauch des Verfahrens in der genetischen Programmierung (siehe [Man00], Seite 9f).

Das Roulette-Auswahlverfahren ist in der GFO wie folgt festgelegt. Seien eine Generation Gen_i und eine natürliche Zahl k mit $1 \leq k \leq gen_{anz}$ gegeben, dann ist die totale Fitness in Abhängigkeit von k durch

$$tP(k) = \sum_{j=1}^k GB_{g_2}(P_j)$$

definiert. Ferner sei z eine Zufallszahl mit $1 \leq z \leq P(gen_{anz})$, dann wird das Individuum x_i ausgewählt, falls

$$tP(p-1) \leq z < tP(p)$$

gilt. Das folgende Beispiel dient der Verdeutlichung. Seien die Individuen, deren Fitness und die resultierende totale Fitness gegeben:

Nummer des Individuum:	1	2	3	4	5	6
Fitness GB_{g_2} :	0.5	0.9	0.3	0.9	0.1	0.7
totale Fitness tP :	0.5	1.4	1.7	2.6	2.7	3.4

Dann werden die ausgewählten Individuen in Abhängigkeit einer Zufallsfall bestimmt durch:

Zufallszahl:	1.8	2.1	1.3	3.0
Nummer des ausgewählten Individuum:	4	4	2	6
Fitness:	0.9	0.9	0.9	0.7

5.2.3 Genetische Operatoren

Zu den genetischen Operatoren gehören die Mutation, die Rekombination und die Selektion.

Im Rahmen der Mutation wird ein Chromosomenwert x_i durch die Addition einer normalverteilten Zufallszahl z_i unter Berücksichtigung einer Standardabweichung σ_i verändert. Für den Generationenschritt $j \rightarrow j + 1$ ergibt sich:

$$x_i^{j+1} = x_i^j + \sigma_i^{j+1} \cdot z_i^j$$

mit der Populationsgröße gen_{anz} , den freiwählbaren Konstanten α_0 , α_1 und

$$\begin{aligned} \sigma_i^{j+1} &= \sigma_i^j e^{(\tau_0 z_0)} e^{(\tau_1 z_i)} \\ \tau_0 &= \frac{\alpha_0}{\sqrt{2 \cdot gen_{anz}}} \\ \tau_1 &= \frac{\alpha_1}{\sqrt{2 \cdot \sqrt{gen_{anz}}}} \end{aligned}$$

Definition 5.3 (Strategieparameter) *Der Vektor der Standardabweichungen $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_{x_{anz}})$ wird als Strategievektor bezeichnet.*

Diese Verwendung der Strategieparameter wirkt konvergenzsteigernd wie empirische Untersuchung gezeigt haben (siehe [Shwe93]). Für die GFO bedeutet der Gebrauch von Strategieparametern, dass neben einem Individuum x auch der zugehörige Vektor der Strategieparameter gespeichert werden muss. Diese Verdopplung des verwendeten Speichers ist bei herkömmlichen Einprozessor-Computersystemen problemlos durchführbar und wegen der Steigerung der Konvergenz des Verfahrens begründet. Die Mutationsrate $p(M)$ der GFO wird auf 0.5 festgesetzt. Hierdurch wird die gleichrangige Bedeutung der Mutation und Rekombination zum Ausdruck gebracht.

Die GFO verwendet diskrete und intermediäre Rekombination. Bei der diskreten Rekombination werden über das Auswahlverfahren zwei Individuen, die Eltern, und eine natürliche Zufallszahl z mit $1 \leq z \leq x_{anz}$ bestimmt. Die Zahl z stellt den Kreuzungspunkt dar, ab dem die Chromosomenwerte der Eltern vertauscht werden. Auf diese Weise werden zwei Nachkommen mit neuen Chromosomenwerten erzeugt. Das folgende Beispiel verdeutlicht die diskrete Rekombination.

Sei $z = 5$, dann gilt:

Eltern:	1.2	-2.4	0.6	1.0	3.7	4.1	0.1
	-0.1	9.5	1.1	0.2	1.9	2.1	8.3
Nachkommen:	1.2	-2.4	0.6	1.0	1.9	2.1	8.3
	-0.1	9.5	1.1	0.2	3.7	4.1	0.1

Die intermediäre Rekombination erzeugt aus zwei Eltern durch Mittelung der Chromosomenwerte einen Nachkommen wie das folgende Beispiel verdeutlicht.

Eltern:	1.2	-2.4	0.6	1.0	3.7	4.1	0.1
	-0.1	9.5	1.1	0.2	1.9	2.1	8.3
Nachkomme:	0.55	3.55	0.85	0.6	2.8	3.1	4.2

Die Rekombinationsrate $p(C)$ der GFO beträgt $1 - p(M)$.

Auf die Reproduktion von Individuen wird verzichtet, da die Selektion der GFO auf dem $(\mu+\Gamma)$ -Konzept basiert. Dieses Konzept besagt, dass μ Eltern Γ Nachkommen erzeugen und von diesen $\mu+\Gamma$ Individuen überleben die μ besten. Die verwendeten Generationsgrößen orientieren sich an dem empfohlenen Verhältnis von $\mu/\Gamma = 1/7$ (siehe [Shwe87]). Im Rahmen der in dieser Arbeit entwickelten GFO muss der Umstand berücksichtigt werden, dass der Algorithmus seriell abgearbeitet wird. Daher muss aus Gründen einer praktikablen Laufzeit mit einer kleinen Generation gearbeitet werden. Eine Zusammenfassung der relevanten Größen der GFO ist in Anhang A zu finden.

Die Komplexität der GFO beträgt $O(4 \cdot gen_{anz} \cdot it_{anz} \cdot n \cdot m)$, hierbei entspricht der Wert it_{anz} der Anzahl der durchlaufenen Generationen.

Offensichtlich fließt die Größe der Elterngeneration auf Grund des verwendeten $(\mu+\Gamma)$ -Konzeptes mit einem Faktor von 8 in die Berechnung der Komplexität ein. Daher ist eine geringe Größe der Elterngeneration, neben einer niedrigen Anzahl von Generationsdurchläufen, für eine praxisnahe Durchführung der GFO von entscheidender Bedeutung (siehe Abschnitt 5.3).

5.2.4 Effektivität der GFO

Die nachfolgenden Betrachtungen werden exemplarisch anhand des Testbildes "Berge" vorgenommen. Das Verhalten der weiteren Testbilder kann dem Anhang G entnommen werden.

Die Tabelle 5.1 zeigt die Auswertung von je 10 Durchläufen pro Konzept mit den in Abschnitt 5.2 aufgestellten Abbruchkriterien. Die Abbildungen 5.2, 5.3 und 5.4 geben die Verläufe der auf einen Iterationsschritt bezogenen minimalen, durchschnittlichen und maximalen Werte (pro Konzept) wieder. Die numerischen Werte sind im Anhang G dargelegt. Ein wichtiger Unterschied im Verhalten des genetischen Programms unter Berücksichtigung der Anzahl der Individuen pro Generation liegt in der Anzahl der Iterationen, die bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums benötigt werden. Die Tabelle 5.2 verdeutlicht diesen Umstand. Die Tabelle 5.1 verdeutlicht, dass die GFO mit hoher Wahrscheinlichkeit gegen ein globales Maximum konvergiert, da eine erhebliche Vergrößerung der Anzahl

Konzept	max. GB_{g_2} (Start)	min. GB_{g_2} (Start)	max. GB_{g_2} (Ende)	min. GB_{g_2} (Ende)
[15 + 105]	0.624	0.491	0.832	0.829
[75 + 525]	0.625	0.601	0.832	0.832
[150 + 1050]	0.671	0.645	0.833	0.832

Tabelle 5.1: Verhalten der GFO bzgl. erzieltm Ergebnis

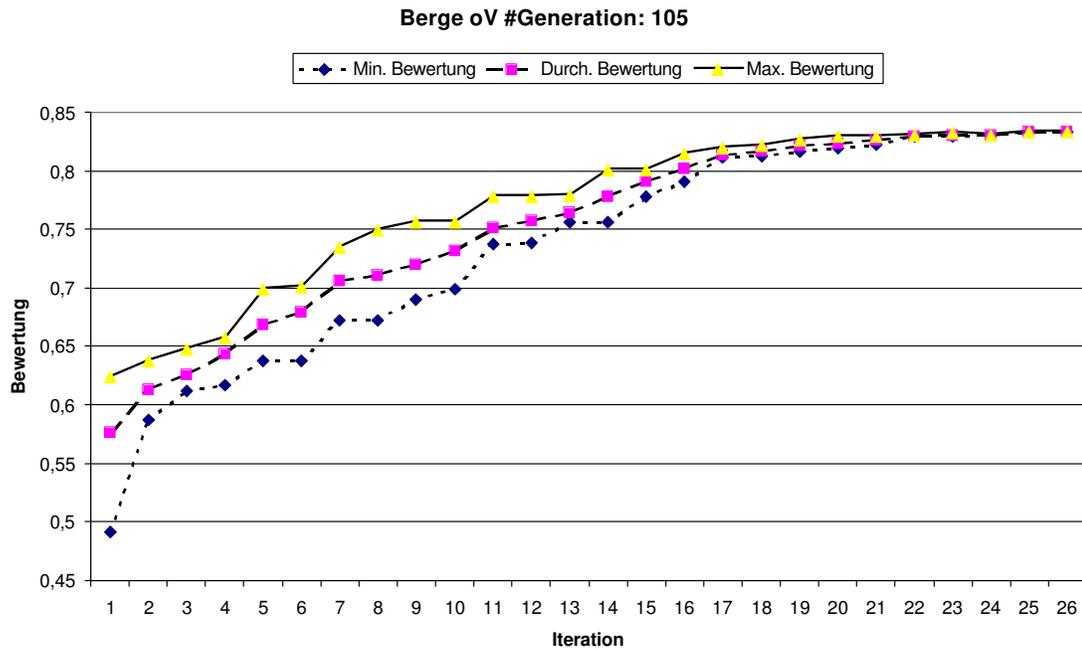


Abbildung 5.2: Verläufe der GFO bzgl. Konzept [15 + 105]

Konzept	max. Anzahl Iterationen	durch. Anzahl Iterationen	min. Anzahl Iterationen
[15 + 105]	26	23.2	21
[75 + 525]	14	12.8	12
[150 + 1050]	12	11.6	11

Tabelle 5.2: Verhalten der GFO bzgl. Anzahl der Iterationen

der Individuen pro Generation zu keiner signifikanten Verbesserung der Bewertung des Farbbildes führt. Diese Tatsache stimmt mit der in der Fachliteratur beschriebenen Wahl der Populationsgröße überein (siehe [Kinn94], Seite 67f und [Mich99], Seite 72ff). Hierbei ist zu bedenken, dass dieses Maximum hinsichtlich

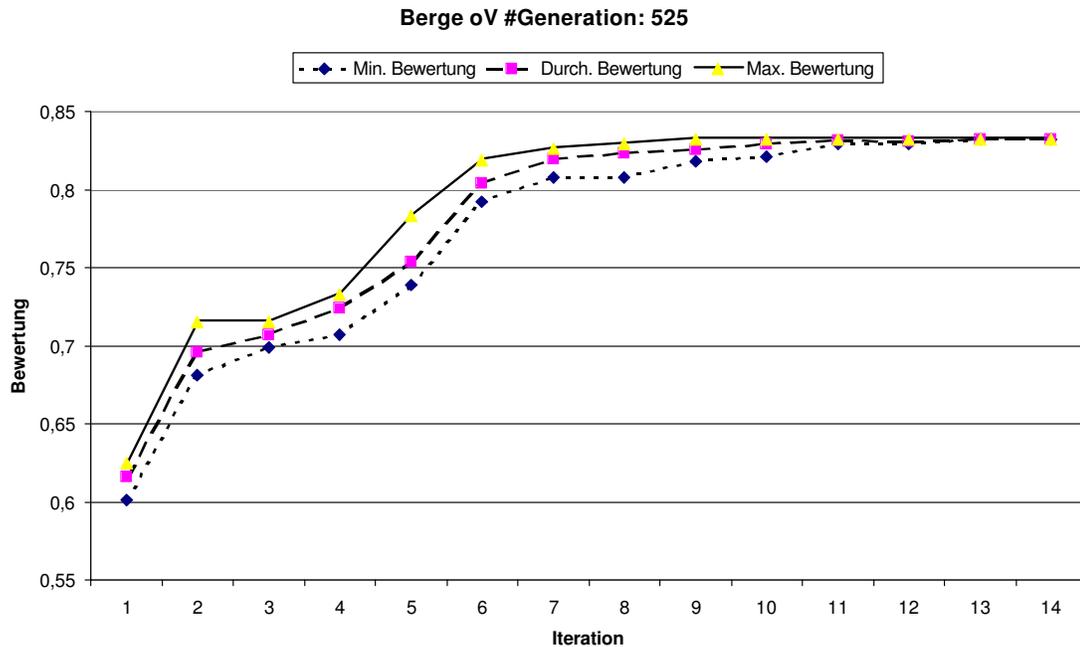


Abbildung 5.3: Verläufe der GFO bzgl. Konzept [75 + 525]

der Manipulationsfunktionen erzielt wurde und somit keine globale Aussage über ein Maximum hinsichtlich des Bildes P_0 getroffen wird. Um ein globales Maximum hinsichtlich des Ausgangsbildes zu gewährleisten müssen die Manipulationsfunktionen einzeln und in Kombination miteinander intensiv analysiert werden. Diese Aufgaben sprengen den Rahmen der vorliegenden Arbeit, da diese die Existenz einer GFO nachweist, und müssen nachfolgenden Arbeiten überlassen bleiben.

Ferner zeigt die Tabelle 5.2, dass ab einer Anzahl von 525 Individuen pro Generation eine Erhöhung der Generationsgröße keinen wesentlichen Einfluß auf die Gesamtanzahl der Iterationen besitzt.

Zur Verifizierung des Konvergenzverhaltens der GFO werden im folgenden schwache und starke Veränderungen am Ausgangsbild vorgenommen und anschließend der GFO zugeführt. Es wurden folgende Veränderungen analog zu Abschnitt 3.2 vorgenommen:

- Veränderung der Helligkeit um je x Einheiten mit $x \in \{10, 40\}$. Die Bilder werden mit "Berge_H+ x " und "Berge_H- x " bezeichnet.
- Veränderung des Kontrastes um je x Einheiten mit $x \in \{20, 50\}$. Die Bilder werden mit "Berge_K+ x " und "Berge_K- x " bezeichnet.

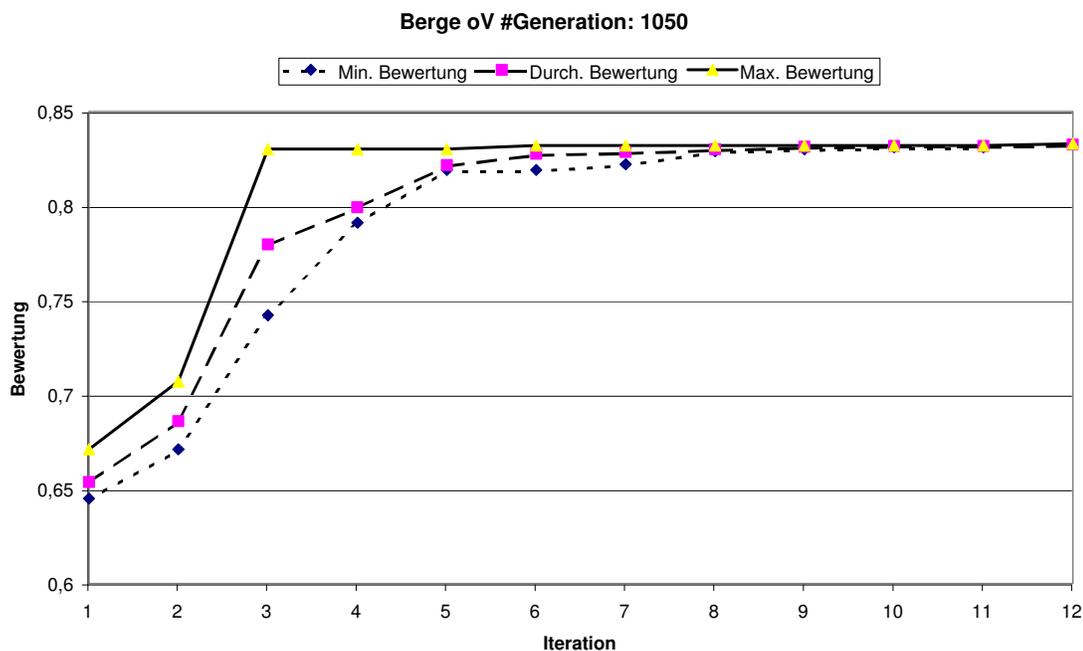


Abbildung 5.4: Verläufe der GFO bzgl. Konzept [150 + 1050]

- Veränderung der Farbbalance um je x Einheiten in Richtung "Rot" und "Cyan" $x \in \{15, 30\}$. Die Bilder werden mit "Berge_Rx" und "Berge_Cx" bezeichnet.
- Veränderung der Bildschärfe um je x Anwendungen eines Un-/Scharfzeichentfilters mit $x \in \{1, 3\}$. Die Bilder werden mit "Berge_U+x" und "Berge_U-x" bezeichnet.

Die folgende Tabelle zeigt die Auswertung von je 10 Durchläufen des Konzeptes [75 + 525] mit den in Abschnitt 5.2 aufgestellten Abbruchkriterien. Eine ausführliche Darlegung der numerischen Werte befindet sich in Anhang G. Zur Verdeutlichung des Verlaufs der GFO wird an dieser Stelle die Abbildung 5.5 exemplarisch vorgestellt. Zur Betrachtung aller Verläufe wird auf die Abbildungen H.1, ..., H.4 der durchschnittlichen Verläufe der jeweiligen Testbilder in Anhang H verwiesen. Die Tabelle 5.3 verdeutlicht, dass die GFO gegenüber Variationen des Ausgangsbildes relativ unempfindlich ist. Lediglich erhebliche Veränderungen führen zu einer signifikant reduzierten Gesamtbewertung. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass das Ausgangsbild hinsichtlich der Bewertungskriterien nicht optimal ist, belegen die Tabelle 5.3 und der Anhang G, eine genügende Konvergenz der GFO.

Bildname	max. GB_{g_2} (Start)	min. GB_{g_2} (Start)	max. GB_{g_2} (Ende)	min. GB_{g_2} (Ende)
Berge_H+10	0.593	0.557	0.831	0.829
Berge_H-10	0.621	0.587	0.831	0.829
Berge_H+40	0.378	0.267	0.756	0.725
Berge_H-40	0.685	0.574	0.829	0.819
Berge_K+20	0.626	0.606	0.829	0.829
Berge_K-20	0.694	0.500	0.830	0.829
Berge_K+50	0.561	0.485	0.805	0.801
Berge_K-50	0.342	0.239	0.817	0.809
Berge_R15	0.600	0.538	0.83	0.829
Berge_C15	0.453	0.311	0.829	0.827
Berge_R30	0.316	0.224	0.815	0.811
Berge_C30	0.493	0.304	0.801	0.793
Berge_U+1	0.581	0.521	0.831	0.830
Berge_U-1	0.494	0.398	0.831	0.829
Berge_U+3	0.564	0.492	0.819	0.808
Berge_U-3	0.356	0.275	0.748	0.723

Tabelle 5.3: Verhalten der GFO bzgl. variiertes Ausgangsbilder

5.3 Sicherung der Effizienz

Offensichtlich führt eine zufällige Manipulation eines "guten" Ausgangsbildes eher zu einer Verbesserung als die zufällige Manipulation eines "schlechten" Ausgangsbildes. Ferner ist zu berücksichtigen, dass für ein "schlechtes" Ausgangsbild P_0 in vielen Fällen die Aussage

$$GB_{g_2}(P_0) = 0$$

gilt. Die Umsetzung dieser Feststellung wird in dieser Arbeit in zwei Phasen vorgenommen. In der ersten Phase wird eine globale Veränderung der a- und b-Werte mit dem Ziel des Ausgleichs einer Farbverschiebung vorgenommen und zusätzlich eine lineare Streckung der L- und C-Werte durchgeführt. In der zweiten Phase durchläuft das aus der ersten Phase hervorgegangene Bild drei Generationen der GFO mit einem [1 + 7]-Konzept. Die Anwendung dieser beiden Phasen wird als Voroptimierung (kurz: VO) bezeichnet. Das resultierende Farbbild der VO dient als "gutes" Ausgangsbild für die GFO.

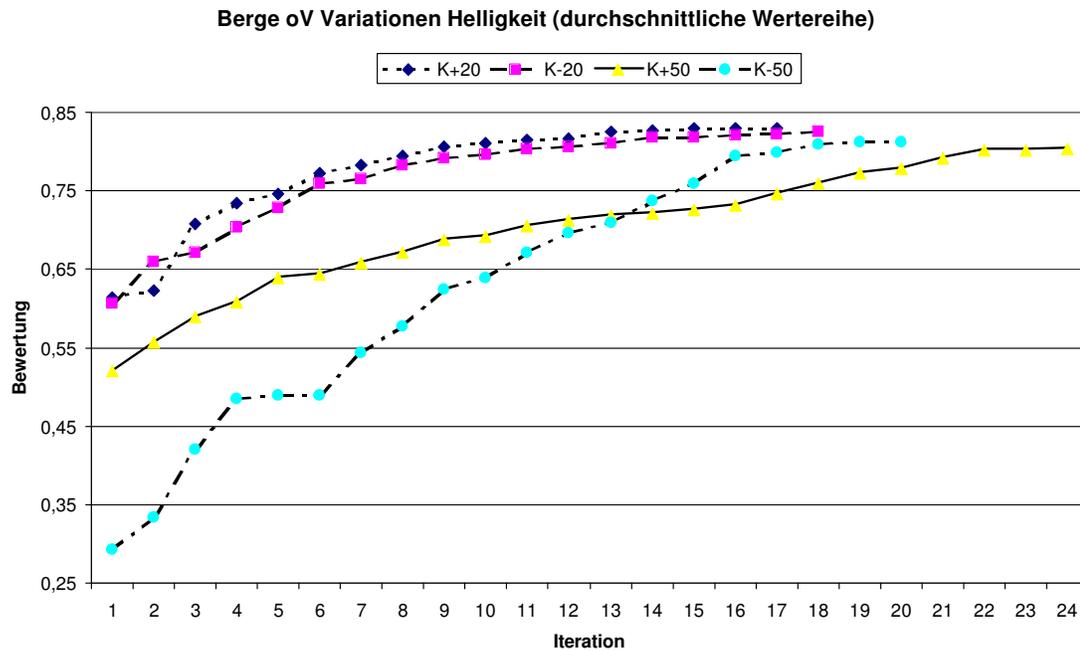


Abbildung 5.5: Verläufe der GFO bzgl. Variation Kontrast

5.3.1 Vorooptimierungsphase 1

Zur grundsätzlichen Verbesserung eines Farbbildes P_0 wird zuerst ein Ausgleich der Farbverschiebung vorgenommen, falls die Bedingung

$$EB_{FV} \neq 1$$

erfüllt ist. Hierzu werden hinsichtlich des Farbbildes P_0 die Mittelwerte

$$a_m = \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n a_{i,j}$$

$$b_m = \frac{1}{nm} \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n b_{i,j}$$

gebildet. Durch Manipulation der Farbverschiebung entsteht das Farbbild

$$P_1 = M_F(P_0) \text{ mit den Werten } a_m, b_m.$$

Dieses Farbbild weist im Vergleich zum Farbbild P_0 eine deutlich geringere Farbverschiebung auf. In Abhängigkeit des Grades der Farbverschiebung von P_0 kann

es zu einer Überkorrektur kommen, die entgegen der ursprünglichen Farbverschiebung auftritt. Dieser Fehler ist deutlich geringer wahrnehmbar und wird durch die GFO behoben.

Die lineare Streckung der Helligkeits- und Sättigungswerte dient einer breiten Streuung unter Beibehalt des Charakters des Farbbildes (siehe [Prat91], Seite 263f). Beide Streckungen basieren auf der Gleichung

$$S_L(x, x_{min}, x_{max}, d) = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \cdot d$$

mit einer zu streckenden Grundmenge X reeller positiver Zahlen, einem Dehnungsfaktor d und

$$\begin{aligned} x_{min} &= \min_{x \in X} \{x\} \\ x_{max} &= \max_{x \in X} \{x\}. \end{aligned}$$

Zur Durchführung der Streckung der Helligkeit eines Farbbildes P werden die Extremwerte der Helligkeit durch

$$\begin{aligned} L_{min} &= \min_P \{L_{i,j}\} \\ L_{max} &= \max_P \{L_{i,j}\} \end{aligned}$$

festgelegt. Ferner ergibt sich der Dehnungsfaktor $d = 100$ durch den Wertebereich der L-Werte. Hieraus resultiert die Manipulationfunktion

$$\begin{aligned} M_{S_L}^L(P) &= S_L(L_{i,j}, L_{min}, L_{max}, 100) \\ &: \quad \forall \quad i \in \{1 \cdots n\} \wedge j \in \{1 \cdots j\} \end{aligned}$$

eines Farbbildes P zur linearen Streckung der Helligkeitswerte. Bis auf die Festlegung des Dehnungsfaktors verläuft die Streckung der Sättigungswerte analog. Der Dehnungsfaktor muss an den Charakter des Farbbildes angepasst werden, da die Festlegung auf den Maximalwert von 141 die Sättigung i. Allg. zu stark erhöht. Aus diesem Grund wird der Dehnungsfaktor d_C durch

$$d_C = \sqrt{141} \cdot \sqrt{C_{max}}$$

festgesetzt. Die Manipulation der Sättigungswerte ist somit durch

$$\begin{aligned} M_{S_L}^C(P) &= S_L(C_{i,j}, C_{min}, C_{max}, d_C) \\ &: \quad \forall \quad i \in \{1 \cdots n\} \wedge j \in \{1 \cdots j\} \end{aligned}$$

festgelegt.

Die erste Phase der Vorooptimierung (kurz: VOP1) eines Farbbildes P_0 wird durch

1. $P_1 = M_F(P_0)$ mit den Werten a_m, b_m
2. $P_2 = M_{S_L}^L(P_1)$ mit den Werten $L_{min}, L_{max}, d = 100$
3. $P_{01} = M_{S_L}^C(P_2)$ mit den Werten C_{min}, C_{max}, d_C

beschrieben. Das resultierende Farbbild P_{01} dient entweder der GFO oder der zweiten Phase der Vorooptimierung als Ausgangsbild. Die Verbesserung in der Gesamtbewertung nach der ersten Vorooptimierungsphase ist in der Tabelle 5.4 anhand des nicht optimierten Testbildes "Berge" dargelegt. Zur Kennzeichnung des nach Phase 1 voroptimierten Bildes dient das angehängte Kürzel `_vop1`. Die Bewertungen der weiteren vier Testbilder sind in der Tabelle G.21 im Anhang G dargelegt. Die numerischen Ergebnisse der Tabelle G.21 verdeutlichen die erziel-

Bildname	GB_{g_2}	EB_{BS}	EB_{VF}	EB_{FV}	EB_{HV}	EB_{RA}	EB_{SV}
Berge	0.105	0.342	0.393	1	0.011	1	0.001
Berge_vop1	0.483	0.318	1	1	0.312	0.999	0.129

Tabelle 5.4: Vorooptimierungsphase 1

ten Verbesserungen der Güte der Testbilder.

Die GFO ist mit dem aus der Vorooptimierungsphase 1 resultierenden Farbbild P_{01} effizienter durchführbar, da der Suchraum des Verfahrens genügend klein gewählt werden kann. Dies beruht auf der geringen Farbverschiebung des Ausgangsbildes P_{01} sowie den durch die lineare Streckung hervorgerufenen deutlichen Erhöhungen der Einzelbewertungen EB_{VF} , EB_{HV} und EB_{SV} . Somit ist es möglich die Wertebereiche der folgenden Chromosomen auf

$$\begin{aligned}
 -6 &\leq a_v \leq 6 && \text{mit } \sigma_0 = 0.75 \\
 -6 &\leq b_v \leq 6 && \text{mit } \sigma_0 = 0.75 \\
 1 &\leq r_1^L \leq 3 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
 1 &\leq r_2^L \leq 3 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
 1 &\leq r_1^C \leq 3 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
 1 &\leq r_2^C \leq 3 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05
 \end{aligned}$$

einzuschränken. Diese Feststellung ist die Voraussetzung für die zweite Vorooptimierungsphase.

5.3.2 Vorooptimierungsphase 2

Die zweite Phase der Vorooptimierung besteht aus einer GFO mit einem [1 + 7]-Konzept. Offensichtlich wird in dieser GFO nur die Mutation und nicht die Rekombination durchgeführt. Der Sinn der Vorooptimierungsphase 2 (kurz: VOP2) liegt in einem schnell generierten Ausgangsbild P_{02} , das eine deutlich höhere Gesamtbewertung besitzt als das Bild P_{01} der VOP1. Ferner wird mit der VOP2 eine Verbesserung des Farbbildes hinsichtlich der Bewertungsfunktion GB_{g_2} gewährleistet und folglich ein günstigerer Startpunkt der GFO erzeugt.

Zum Erhalt vergleichbarer Ergebnisse wurden 10 Durchläufen der VOP2 auf das Testbild "Berge" angewandt und in Tabelle 5.5 zusammengefasst. Die numerischen Ergebnisse belegen, dass die Anzahl der Iterationen aus praktischen Erwägungen auf drei beschränkt werden kann, da innerhalb der ersten drei Generationen die Gesamtbewertung ($GB_{g_2}(P_{01}) = 0.483$) des Bildes P_{01} deutlich erhöht wird und danach nur verhältnismäßig gering ansteigt. Auf Grund der niedrigen Genera-

Fitness	GB_{g_2} (3. Generation)	GB_{g_2} (Ende)	it_{anz}
maximale	0.66605	0.72003	18
mittlere	0.63304	0.68341	11
minimale	0.59880	0.65007	6

Tabelle 5.5: Verhalten VOP2, Testbild "Berge"

tionsgrößen ist die Laufzeit der VOP2 hinsichtlich der erzielten Verbesserung akzeptabel. Das resultierende Farbbild P_{02} dient der GFO als Ausgangsbild.

In der Tabelle 5.6 sind die Ergebnisse von je 10 Durchläufen der GFO mit verschiedenen Konzepten wiedergegeben. Die resultierenden durchschnittlichen Verläufe sind der Abbildung 5.6 zu entnehmen. Die Darstellungen der minimalen, durchschnittlichen und maximalen Verläufe hinsichtlich eines Konzeptes sind im Anhang H dargelegt. Die numerischen Ergebnisse belegen die erzielten Verbesserungen der Güte der Testbilder. Ferner sind in der Tabelle F.10 die einzelnen Chromosomenwerte dargelegt. Ein Vergleich der Tabellen 5.7 und 5.2 verdeut-

Konzept	max. GB_{g_2} (Start)	min. GB_{g_2} (Start)	max. GB_{g_2} (Ende)	min. GB_{g_2} (Ende)
[15 + 105]	0.764	0.762	0.831	0.830
[75 + 525]	0.783	0.772	0.831	0.830
[150 + 1050]	0.792	0.779	0.831	0.830

Tabelle 5.6: Ergebnisse der GFO mit VO

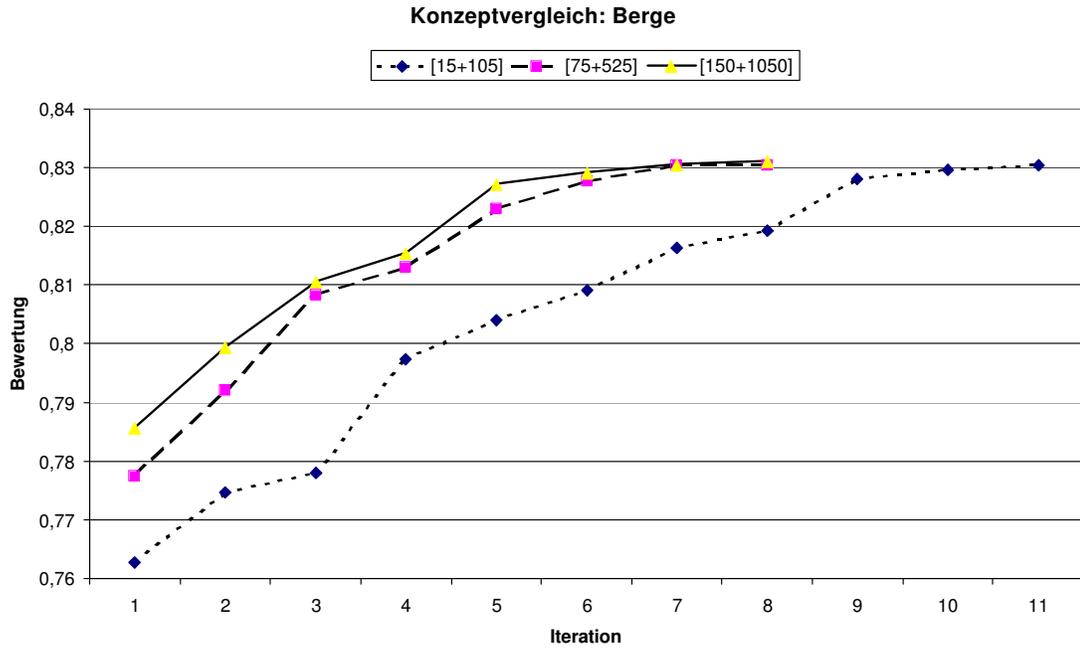


Abbildung 5.6: Durchschnittliche Verläufe der GFO mit VO

licht die Steigerung der Effizienz, da sich die Anzahl der Iterationen signifikant reduziert.

Konzept	max. Anzahl Iterationen	durch. Anzahl Iterationen	min. Anzahl Iterationen
[15 + 105]	12	11.4	10
[75 + 525]	8	7.6	7
[150 + 1050]	8	7.5	7

Tabelle 5.7: Anzahl der Iterationen der GFO mit VO

Kapitel 6

Ergebnisdiskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde an 40 Testbildern die GFO vorgenommen. Für die Testbilder wurde gezielt eine Vielzahl von Motiven ausgewählt, damit die GFO möglichst umfassend getestet werden konnte. Bei 37 dieser Bilder wurde eine signifikante Verbesserung der Güte erzielt. Folglich kann mit einer hohen Wahrscheinlichkeit davon ausgegangen werden, dass die GFO allgemein anwendbar ist. Die Festlegung des Optimierungsziels anhand der Bezugsreihe ISO SCID LAB führt zu quasi optimalen Farbbildern, die vom Normalbeobachter angenehmer als die Ausgangsbilder empfunden werden.

Die nachfolgende Ergebnisdiskussion basiert auf einer Auswahl von fünf Bildern aus einer Reihe von 40 nicht optimierten Testbildern. Die numerischen Größen dieser Auswahl sind in Anhang C.1 dargelegt. Die Auswahl der Bilder "Berge", "Frau", "Haus", "Kind" und "Stadt" basiert auf der Notwendigkeit verschiedene Motive und somit unterschiedliche Bildcharakteristika in die Ergebnisdiskussion aufzunehmen. Die folgende Tabelle gibt die Hauptcharakteristika dieser Testbilder wieder:

Bildname	Bildtyp	Hauptcharakteristika
Berge	Landschaft	geringer Kontrast, geringe maximale Farbsättigung, leichte Unschärfe
Frau	Person	deutlich farbverschoben, hoher Anteil von Grautönen, deutliche Unschärfe an den Rändern
Haus	Gebäude	leicht farbverschoben, geringer Anteil von Grautönen, hohe maximale Farbsättigung
Kind	Person	geringer Kontrast, geringe Gesamthelligkeit, leicht farbverschoben
Stadt	Gebäude	deutlich farbverschoben, geringer Kontrast, leichte Unschärfe

6.1 Konvergenz der GFO

Eine allgemeine Aussage über die Konvergenz der GFO zu treffen stellt ein komplexes Thema dar. Dies beruht auf der Abhängigkeit des Verlaufs der GFO vom zu optimierenden Farbbild und des indirekten Einflusses der Chromosomen auf die Gesamtbewertungsfunktion. Dieser indirekte Einfluß der Chromosomen basiert auf den zwischengelagerten Manipulationsfunktionen und den daraus resultierenden großen Wertebereichen der Chromosomen, die den Suchraum des Verfahrens bilden. Ferner ist insbesondere die Güte des Ausgangsbildes P_0 von entscheidender Bedeutung. Der Grund liegt in der zufälligen Festlegung der Startgeneration, die i. Allg. eine geringe Anzahl von Extremfällen erzeugt und somit für ein "schlechtes" Ausgangsbild nur wenige Individuen mit einer von Null verschiedenen Gesamtbewertung GB_{g_2} liefert. Hierdurch wird die Auswahlmöglichkeit innerhalb der GFO deutlich eingeschränkt, was wiederum zu einer schnelleren Degeneration der Population führt. Die Lösung des Problems der gezielten Festlegung einer Startgeneration wird im Rahmen dieser Arbeit nicht verfolgt. Ein möglicher Lösungsansatz wird in Kapitel 7 vorgestellt.

Zur Überprüfung der Konvergenz werden die Verläufe der im Unterabschnitt 5.2.4 vorgestellten Konzepte betrachtet. Die Abbildungen H.5; ···, H.9 im Anhang H geben die durchschnittlichen Verläufe von zehn durchgeführten GFO der jeweiligen Konzepte auf das betreffende Testbild wieder. Die numerischen Werte sind in den Tabellen G.1, ···, G.9 im Anhang G dargelegt. Exemplarisch wird an dieser Stelle auf die Abbildung 6.1 der Verläufe der GFO bzgl. des Testbildes "Berge" verwiesen. Aus den durchschnittlichen Verläufen ist erkennbar, dass die GFO mit hoher Wahrscheinlichkeit gegen genau ein Maximum der Gesamtbewertungsfunktion konvergiert. Hierbei bleibt ungeklärt ob es sich um ein lokales oder globales Maximum hinsichtlich der Optimierfähigkeit des Ausgangsbildes handelt. Eine Betrachtung dieser Fragestellung führt zu dem Problem des indirekten Einflusses der Chromosomen auf die Gesamtbewertung, da anhand der Chromosomen das Ausgangsfarbbild mittels der Manipulationsfunktionen verändert und erst danach bewertet wird. Daher muss eine ausführlichere Erörterung nachfolgenden Arbeiten vorbehalten bleiben. Für die vorgestellte GFO wird mit hoher Wahrscheinlichkeit ein globales Maximum erreicht, da eine erhebliche Vergrößerung der Anzahl der Individuen pro Generation über den in der Literatur vorgeschlagenen Wert hinaus keine signifikante Verbesserung der Gesamtbewertungsfunktion ergibt.

Eine Betrachtung der erzielten durchschnittlichen Verbesserungen einer GFO mit einem [150+1050]-Konzept hinsichtlich der Gesamtbewertungsfunktion GB_{g_2} gibt die Tabelle 6.1 wieder. Die relative Steigerung rS wird durch

$$rS(x) = \frac{x - GB_{g_2}(P_0)}{GB_{g_2}(Ende)}$$

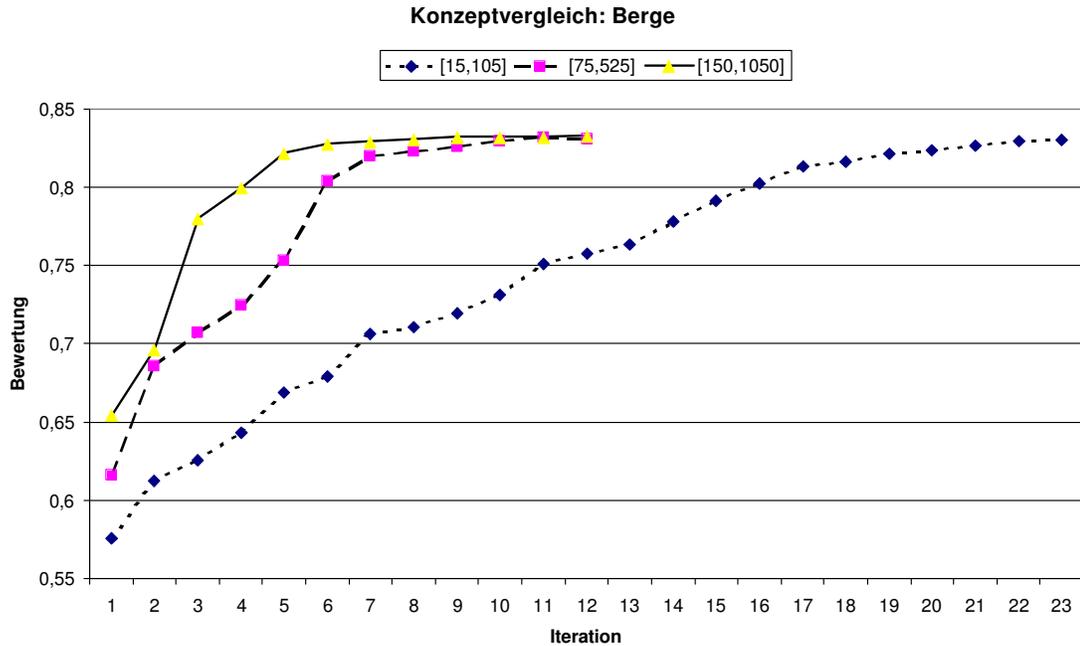


Abbildung 6.1: GFO ohne Voroptimierung, "Berge"

festgelegt. Hieraus ist ersichtlich, dass die GFO eine erhebliche Verbesserung der

Bildname	$GB_{g_2}(P_0)$	$GB_{g_2}(Ende)$	$rS(GB_{g_2}(Ende))$ in %
Berge	0.105	0.8305	87.39
Frau	0	0.6908	100
Haus	0.205	0.7991	74.35
Kind	0	0.9248	100
Stadt	0	0.7249	100

Tabelle 6.1: Steigerung der Bewertung durch die GFO

Ausgangsbilder gewährleistet. Unter Berücksichtigung der Konvergenz der GFO ist diese Verbesserung reproduzierbar. Dieser Umstand stellt die Bedeutung der GFO für eine Automatisierung der Farbbildoptimierung deutlich heraus.

6.2 Effizienz der GFO

6.2.1 GFO ohne Vorooptimierung

Die durchschnittlichen Verläufe der GFO ohne Vorooptimierung hinsichtlich der Testbilder (siehe Abbildungen 6.2 und 6.3 sowie Tabellen G.1; · · , G.9) verdeutlichen, die hohen Anzahl von Iterationen bei der GFO mit [15 + 105]-Konzept. Ferner ist unter Berücksichtigung der Komplexität der GFO die Anzahl der Iterationen der GFO mit [105 + 1050]-Konzept hinsichtlich eines effizienten Einsatzes zu hoch. Dies beruht auf der geringen Größe der Eltern- und Nachkommengene-

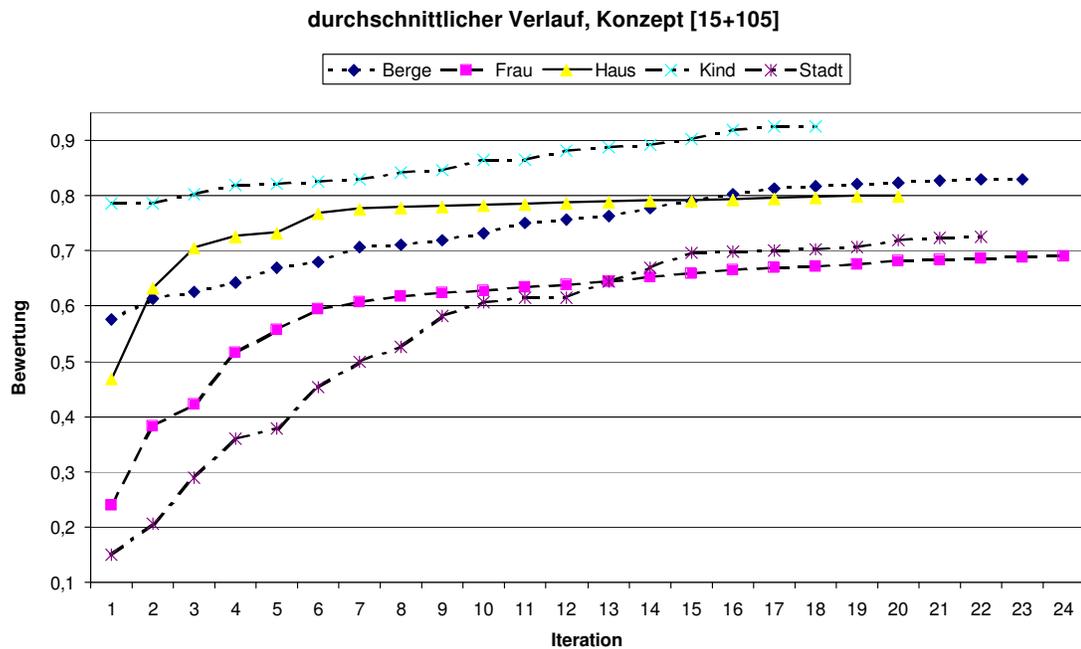


Abbildung 6.2: GFO ohne Vorooptimierung, [15 + 105]-Konzept

ration bezüglich des Suchraums, der durch die Wertebereiche der Chromosomen gegeben ist. Folglich ist es unwahrscheinlich, dass ein Individuum mit einer hohen Gesamtbewertung in der ersten Generation erzeugt wird. Dies hat i. Allg. zur Folge, dass eine Verbesserung des Farbbildes nur durch eine große Anzahl von Generationen erzielt werden kann, wobei die Gefahr einer zwischenzeitlichen Degeneration berücksichtigt werden muß.

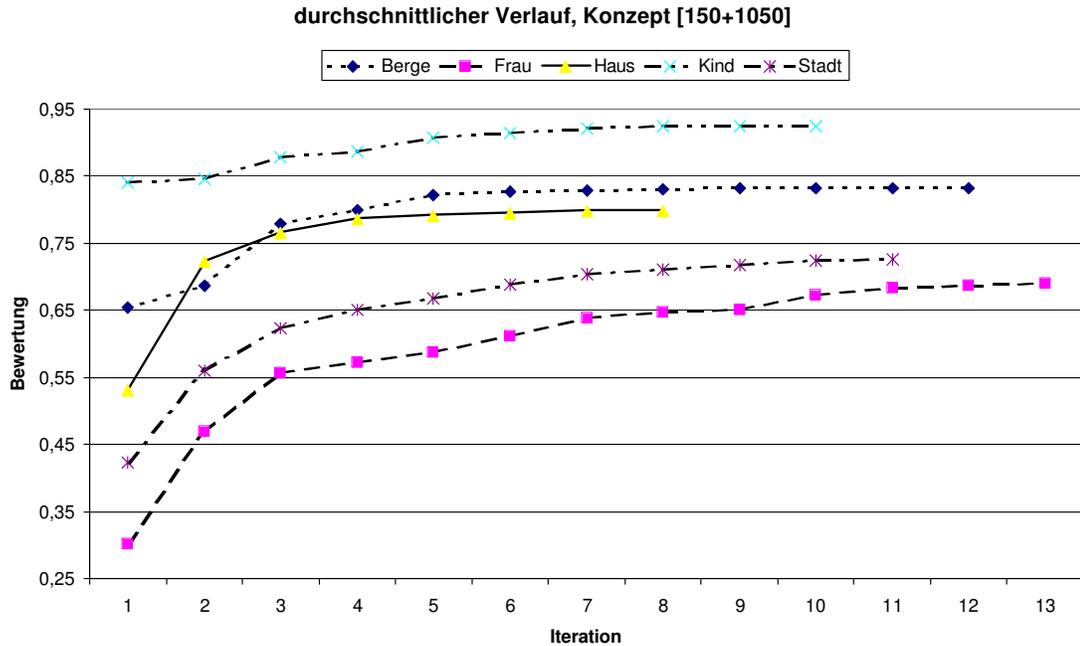


Abbildung 6.3: GFO ohne Voroptimierung, [150 + 1050]-Konzept

6.2.2 GFO mit Voroptimierung

Die Tabelle 6.2 zeigt deutlich, dass mittels der beiden Voroptimierungsphasen eine erhebliche Verbesserung der Ausgangsbilder erzielt wird.

Bildname	GB_{g_2}	GB_{g_2} (VOP1)	GB_{g_2} (VOP2)
Berge	0.105	0.483	0.666
Frau	0	0.276	0.322
Haus	0.205	0.447	0.468
Kind	0	0.735	0.765
Stadt	0	0.216	0.308

Tabelle 6.2: Ergebnisse der VOP1 und VOP2

Die Verläufe der GFO mit beiden Voroptimierungsphasen (siehe Abbildungen 6.4, ..., 6.6) und die numerischen Ergebnisse (siehe Tabellen G.11, ..., G.19 im Anhang G) verdeutlichen, die signifikante Verringerung der Anzahl der Iterationen. Die Reduzierung der Anzahl der Iteration ist in der Tabelle 6.3 für die jeweiligen durchschnittlichen Verläufe der GFO dargelegt.

Die Verwendung eines Ausgangsbildes, das eine höhere Gesamtbewertung als das zu optimierende Bild besitzt, führt nach einer relativ geringen Anzahl von Ge-

Bildname	Konzept	it_{anz} ohne VO	it_{anz} mit VO	Reduzierung in %
Berge	[15 + 105]	23.3	11.2	51.93
	[75 + 525]	12.2	7.6	37.70
	[150 + 1050]	11.6	7.4	36.21
Frau	[15 + 105]	23.6	13.6	42.37
	[75 + 525]	17.6	8.6	51.14
	[150 + 1050]	12.6	7.5	40.48
Haus	[15 + 105]	20.4	9.7	52.45
	[75 + 525]	11.7	7.7	34.19
	[150 + 1050]	8.1	6.6	18.52
Kind	[15 + 105]	18.1	10	44.75
	[75 + 525]	11.9	7.5	36.97
	[150 + 1050]	9.3	7.1	23.66
Stadt	[15 + 105]	22.9	13.4	41.48
	[75 + 525]	13.8	8.4	39.13
	[150 + 1050]	10.6	7.9	25.47

Tabelle 6.3: Vergleich der Anzahl der Iterationen

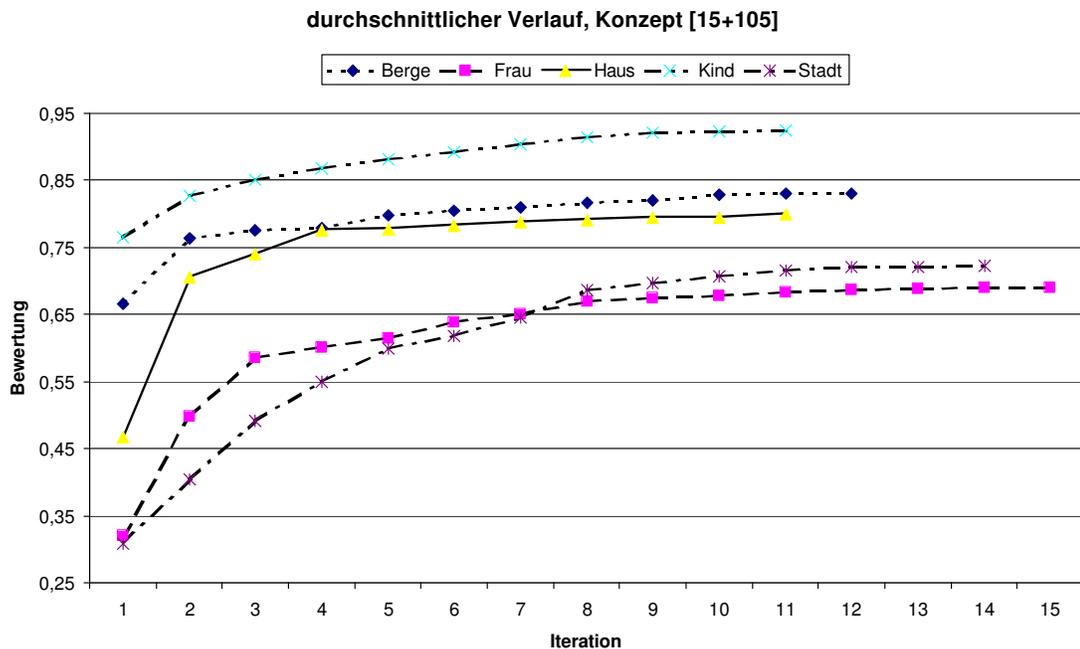


Abbildung 6.4: GFO mit Vorooptimierung, [15 + 105]-Konzept

nerationen zu einem quasi optimalen Farbbild hinsichtlich des Optimierungsziels der ISO SCID LAB Reihe. Unabhängig von der Feststellung ob das erzielte Be-

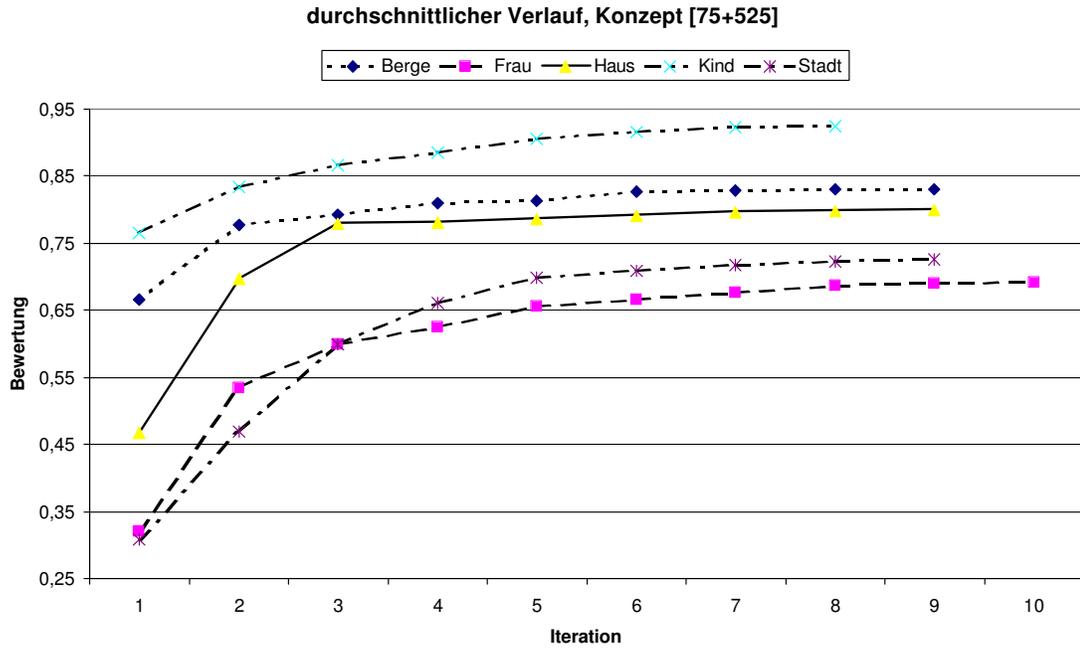


Abbildung 6.5: GFO mit Voroptimierung, [75 + 525]-Konzept

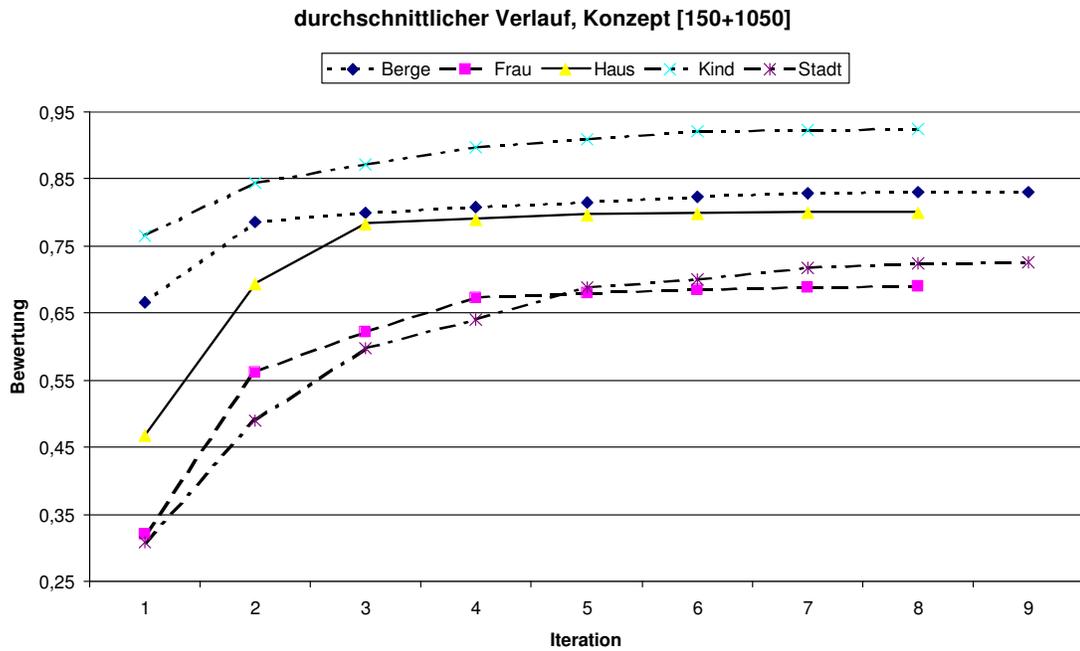


Abbildung 6.6: GFO mit Voroptimierung, [150 + 1050]-Konzept

wertungsmaximum global oder lokal ist, wird das optimierte Farbbild von einem Normalbeobachter als deutlich *angenehmer* wahrgenommen. Diese Feststellung trifft auf alle fünf vorgestellten Testbilder zu und zeigt, dass die GFO mit einem [15 + 105]-Konzept effektiv und effizient durchführbar ist.

Die unterschiedlich erzielten Bewertungsmaxima verdeutlichen den direkten Einfluss des zu optimierenden Bildes auf das Endergebnis. Exemplarisch sei hier das Bild "Frau" betrachtet. Da dieses Bild offensichtlich einen sehr hohen Anteil von Grautönen besitzt und zu den Rändern an Schärfe deutlich abnimmt, fallen die Werte der Einzelbewertungsfunktionen für die Bildschärfe ($EB_{BS} = 0.009$), die Farbvielfalt ($EB_{VF} = 0.685$) und die Sättigungsverteilung ($EB_{SV} = 0.07$) niedrig aus. Dies stimmt mit einer Einordnung des Bildes durch einen Normalbeobachter hinsichtlich des Aspektes "gutes Farbbild" überein. Das Beispiel verdeutlicht den Einfluss des Ausgangsbildes auf die GFO.

6.3 Bewertung der GFO

Die GFO stellt einen erheblichen Fortschritt gegenüber einem statischen Verfahren zur Farbbildoptimierung dar. Mittels der GFO lassen sich Farbbilder hinsichtlich eines vorgegebenen Optimierungsziels, das durch die Bewertungsfunktion GB_{g_2} festgelegt ist, verbessern. Auf Grund dieses Umstandes wird die GFO zu einem dynamischen Verfahren, das die verschiedenen Anpassungen an ein Optimierungsziel (z.B. Druckverfahren, Struktur des bedruckten Materials, gewünschter Eindruck beim Normalbeobachter) ermöglicht. Es lassen sich zwar mit einem statischen Verfahren ähnlich der Vorooptimierungsphase 1 Verbesserungen an den Ausgangsbildern erzielen (siehe Tabelle 6.2), allerdings besteht keine einfache Variante ein solches Verfahren universell einzusetzen.

Die Tabelle 6.4 verdeutlicht anhand der relativen Steigerung rS , dass die GFO mit einem [150 + 1050]-Konzept im Vergleich zur statischen Vorooptimierungsphase 1 und dynamischen Vorooptimierungsphase 2 das Ausgangsbild erheblich verbessert.

Die Effizienz der GFO wird durch beide Vorooptimierungsphasen signifikant verbessert, da durch die Vorooptimierungsphasen der Suchraum deutlich eingeschränkt und die Güte der Individuen der Startgeneration sichergestellt wird. Auf Grund dieser Fakten liefert die GFO mit einem [15 + 105]-Konzept nach einer geringen Anzahl von Iterationen ein reproduzierbares Ergebnis. Dieser Umstand erlaubt einen praxisnahen Einsatz der GFO.

Abschließend muß festgestellt werden, dass die vorliegende Arbeit mittels der GFO die Existenz eines dynamischen Verfahrens zur Farbbildoptimierung nachweist. Die Mächtigkeit der GFO verhindert, dass in dieser Arbeit alle Aspekte (z.B. Gewichtung der Einzelbewertungen, Festlegung der Manipulationsfunktio-

Bildname	GB_{g_2}	GB_{g_2}	GB_{g_2}	GB_{g_2}	rS	rS	rS
	(P_0)	(VOP1)	(VOP2)	(GFO)	(VOP1) in %	(VOP2) in %	(GFO) in %
Berge	0.105	0.483	0.666	0.831	45.41	67.51	87.39
Frau	0	0.276	0.322	0.691	39.94	46.60	100
Haus	0.205	0.447	0.468	0.799	30.29	32.92	74.35
Kind	0	0.735	0.765	0.924	79.55	82.79	100
Stadt	0	0.216	0.308	0.725	29.79	42.48	100

Tabelle 6.4: GFO im Vergleich zur VOP1

nen) hinsichtlich einer maximalen Effektivität untersucht wurden. Diese Verbesserungen der GFO müssen nachfolgenden Arbeiten vorbehalten bleiben.

Kapitel 7

Schlussbemerkung und Ausblick

Die Ergebnisse (siehe Anhang F, I) zeigen, dass die genetische Farbbildoptimierung ein effektives, autonomes und modulares Verfahren darstellt, das die Güte der bearbeiteten Farbbild deutlich erhöht. Die Modularität der GFO wird durch die linguistische Einordnung der numerischen Einzelbewertungen erzielt. Diese Einordnung erfolgt über eine auf mehrwertiger Logik basierenden Zugehörigkeitsfunktion und ermöglicht die unabhängige Erweiterung der Gesamtbewertung. Durch die Verwendung des CIELAB Farbraums wird die Autonomie der GFO gewährleistet, da die Gleichabständigkeit dieses Bezugsfarbraums die statistische Analyse des zu optimierenden Farbbildes zulässt. Ferner wird durch die Voroptimierung des Ausgangsfarbbildes die Effizienz der GFO gesteigert, da ein Farbbild erzeugt wird, dessen Gesamtbewertung nahe dem Bewertungsoptimum liegt. Dies ermöglicht die Verwendung von niedrigen Populationsgrößen, wodurch die Gesamtlaufzeit der GFO verringert und der Einsatz auf herkömmlichen Einprozessor-Computersystemen praktikabel wird.

Die in dieser Arbeit erstmalig entwickelte modulare Bewertungsstruktur und die entwickelten Voroptimierungsphasen des Verfahrens einer genetischen Farbbildoptimierung stellen eine Basisvariante dar, deren Verbesserung im Bereich der weitergehenden Forschung liegt.

Die Optimierung des genetischen Programms hinsichtlich der Kenngrößen und die Umsetzung des seriellen Programms in einen parallelen Algorithmus mit dem Ziel die Grösse der Elterngeneration zu erhöhen sind zwei nachfolgende Untersuchungsgebiete. Hierbei ist insbesondere eine Analyse des Konvergenzverhaltens der GFO von Interesse.

Neben der Weiterentwicklung der genetischen Programmierung ist die Integration der entwickelten Bewertungsstruktur in andere Verfahren zur Optimierung nicht differenzierbarer Funktionen hinsichtlich eines Effizienzvergleiches von Interesse.

Ein weiterer Forschungsbereich liegt in der Ergänzung der Gesamtbewertungsfunktion. Hierbei ist die Erweiterung um Einzelbewertungen, die auf der Analyse der Ortsfrequenzen eines Farbbildes beruhen sowie die Verwendung anderer Bezugsfarbräume (z.B. RLAB), die die Integration von betrachtungsabhängigen Umgebungsparametern in die GFO ermöglichen, von Interesse. Ein interessantes Themengebiet liefert die Adaption weiterer Bezugsreihen von quasi optimalen Farbbildern, so dass die GFO an die jeweils gewünschten Optimierungsziele angepasst werden kann.

Ferner erlauben die Entwicklung problembezogener Bewertungs- und Manipulationsfunktionen (z.B. zur Korrektur lokaler Bildfehler) sowie die Anpassung an spezielle Anforderungen vorhandener Anwendungsgebiete (z.B. Druckvorstufe) einen breit gefächerten Einsatz der GFO.

Anhang A

Kenngröße	Bedeutung
gen_{anz}	Anzahl der Individuen einer Generation
x_{anz}	Anzahl der Chromosomen eines Individuums
$(\mu + \Gamma)$ -Konzept	μ Eltern erzeugen Γ Nachkommen, aus denen die μ besten als neue Eltern bestimmt werden
$p(M)$	Mutationsrate
$p(C)$	Rekombinationsrate
a_v, b_v	Chromosomen für die globale Farbverschiebung
a_1^L, a_2^L	Chromosomen für die Helligkeitsveränderung durch Lineartransformation
r_1^L, s_1^L	Chromosomen für die Helligkeitsveränderung durch S-Transformation 1
r_2^L, s_2^L	Chromosomen für die Helligkeitsveränderung durch S-Transformation 2
a_1^C, a_2^C	Chromosomen für die Sättigungssveränderung durch Lineartransformation
r_1^C, s_1^C	Chromosomen für die Sättigungsveränderung durch S-Transformation 1
r_2^C, s_2^C	Chromosomen für die Sättigungsveränderung durch S-Transformation 2
f^U, c^U	Chromosomen für die Bildschärfe durch unsharp masking
f^R, c^R	Chromosomen für die Rauschunterdrückung

Zur Durchführung der GFO wird das [3, 21]-Konzept verwendet.

Zur Durchführung der GFO ohne Voroptimierungsphasen werden die Wertebereiche der Chromosomen (p, w) durch

$$\begin{aligned}
-100 &\leq a_v \leq 100 && \text{mit } \sigma_0 = 0.75 \\
-100 &\leq b_v \leq 100 && \text{mit } \sigma_0 = 0.75 \\
0.1 &\leq a_1^L \leq 0.45 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
0.65 &\leq a_2^L \leq 0.9 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
1 &\leq r_1^L \leq 9 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
0 &\leq s_1^L \leq 0.5 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
1 &\leq r_2^L \leq 9 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
0.5 &\leq s_2^L \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
0.1 &\leq a_1^C \leq 0.45 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
0.65 &\leq a_2^C \leq 0.9 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
1 &\leq r_1^C \leq 9 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
0 &\leq s_1^C \leq 0.5 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
1 &\leq r_2^C \leq 9 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
0.5 &\leq s_2^C \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
1 &\leq f^U \leq 10 && \text{mit } \sigma_0 = 1.0 \\
0 &\leq c^U \leq 0.75 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
0 &\leq f^R \leq 6 && \text{mit } \sigma_0 = 1.0 \\
0 &\leq c^R \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.05 \\
0 &\leq w_{L1} \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
0 &\leq w_{L2} \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
0 &\leq w_{L3} \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
0 &\leq w_{C1} \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
0 &\leq w_{C2} \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01 \\
0 &\leq w_{C3} \leq 1 && \text{mit } \sigma_0 = 0.01
\end{aligned}$$

festgelegt.

Anhang B

Die folgenden Formeln dienen der Transformation von Farbvalenzen aus einem RGB Bezugsfarbraum mit 8 Bit Datentiefe in den CIEXYZ Farbraum unter der Normlichtart D65 sowie deren Umkehrung.

B.1 RGB \rightarrow CIEXYZ

Transformation: RGB \rightarrow CIEXYZ

1. Schritt

$$\begin{aligned}R'_{sRGB} &= \frac{R_{8bit}}{255.0} \\G'_{sRGB} &= \frac{G_{8bit}}{255.0} \\B'_{sRGB} &= \frac{B_{8bit}}{255.0}\end{aligned}$$

2. Schritt

$$\begin{aligned}R_{sRGB} &= t(R'_{sRGB}) \\G_{sRGB} &= t(G'_{sRGB}) \\B_{sRGB} &= t(B'_{sRGB})\end{aligned}$$

mit

$$t(x) = \begin{cases} \frac{x}{12.92} & : x \leq 0.03938 \\ \left(\frac{x + 0.055}{1.055}\right)^{2.4} & : x > 0.03938 \end{cases}$$

3. Schritt

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = 100.0 \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.072 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{pmatrix}$$

B.2 RGB \leftarrow CIEXYZ

Transformation: RGB \leftarrow CIEXYZ

1. Schritt

$$\begin{pmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{pmatrix} = 0.01 \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}$$

2. Schritt

$$\begin{aligned} R'_{sRGB} &= t(R_{sRGB}) \\ G'_{sRGB} &= t(G_{sRGB}) \\ B'_{sRGB} &= t(B_{sRGB}) \end{aligned}$$

mit

$$t(x) = \begin{cases} 12.92x & : x \leq 0.00304 \\ 1.055x^{0.4167} - 0.055 & : x > 0.00304 \end{cases}$$

3. Schritt

$$\begin{aligned} R_{8bit} &= 255.0R'_{sRGB} \\ G_{8bit} &= 255.0G'_{sRGB} \\ B_{8bit} &= 255.0B'_{sRGB} \end{aligned}$$

Anhang C

C.1 Numerische Größen der Testbilder

Bezeichnung	Bildgröße [mm]	Bildauflösung [dpi]
Bride and groom (N1)	160 × 128	406
People (N2)	160 × 128	406
Cashew nuts (N3)	128 × 160	406
Meal (N4)	160 × 128	406
Mandolin (N5)	128 × 160	406
Tailor (N6)	160 × 128	406

Tabelle C.1: ISO SCID LAB Testbilder

Bezeichnung	Bildgröße [mm]	Bildauflösung [dpi]
Berge	106 × 76	72
Frau	187 × 129	72
Haus	179 × 143	72
Kind	73 × 98	150
Stadt	185 × 110	150

Tabelle C.2: Nicht optimierte Testbilder

C.2 ISO SCID LAB Bilder



Abbildung C.1: Bride & groom



Abbildung C.2: People



Abbildung C.3: Cashew nuts



Abbildung C.4: Meal



Abbildung C.5: Mandolin



Abbildung C.6: Tailor

C.3 Nicht optimierte Bilder



Abbildung C.7: Berge



Abbildung C.8: Frau



Abbildung C.9: Haus



Abbildung C.10: Kind



Abbildung C.11: Stadt

Anhang D



Abbildung D.1: People



Abbildung D.2: People_Scharf1



Abbildung D.3: People_Scharf3



Abbildung D.4: People_Unscharf1



Abbildung D.5: People_Unscharf5



Abbildung D.6: People_Rot10



Abbildung D.7: People_Rot40



Abbildung D.8: People_Cyan10



Abbildung D.9: People_Cyan40



Abbildung D.10: People_Rausch15

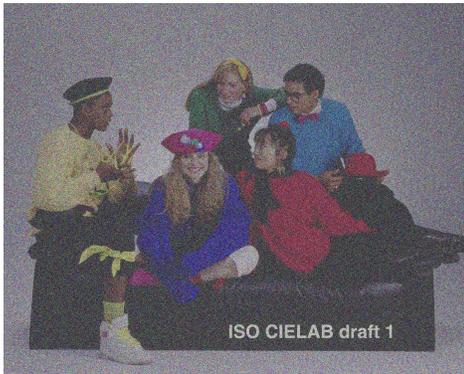


Abbildung D.11: People_Rausch60



Abbildung D.12: People_Kontr+15



Abbildung D.13: People_Kontr+60



Abbildung D.14: People_Kontr-15



Abbildung D.15: People_Kontr-60



Abbildung D.16: People_Hell+15



Abbildung D.17: People_Hell+60



Abbildung D.18: People_Hell-15



Abbildung D.19: People_Hell-60



Abbildung D.20: People_Sätt+15



Abbildung D.21: People_Sätt+60



Abbildung D.22: People_Sätt-15



Abbildung D.23: People_Sätt-60

Anhang E

Bildname	vf	\sqrt{vf}	Bildname	vf	\sqrt{vf}
Bride & groom	719.90	26.83			
Bride & groom_+15	964.94	31.06	Bride & groom_+60	1933.43	43.97
Bride & groom_-15	523.54	22.88	Bride & groom_-60	116.61	10.80
People	869.41	29.49			
People_+15	1110.92	33.33	People_+60	2461.17	49.61
People_-15	650.26	25.50	People_-60	150.54	12.27
Cashew nuts	1139.61	33.76			
Cashew nuts_+15	1475.04	38.41	Cashew nuts_+60	2726.33	52.21
Cashew nuts_-15	844.94	29.07	Cashew nuts_-60	192.54	13.88
Meal	992.84	31.51			
Meal_+15	1304.98	36.12	Meal_+60	2365.00	48.63
Meal_-15	716.34	26.76	Meal_-60	151.34	12.30
Mandolin	1138.41	33.74			
Mandolin_+15	1472.43	38.37	Mandolin_+60	3041.25	55.15
Mandolin_-15	851.89	29.19	Mandolin_-60	198.69	14.10
Tailor	840.98	29.00			
Tailor_+15	1133.41	33.67	Tailor_+60	2158.42	46.46
Tailor_-15	607.52	24.65	Tailor_-60	132.16	11.50

Auswertung der Formel 3.5

Tabelle E.1: Farbenvielfalt

Bildname	μ_r^{A1}	μ_u^{A1}	μ_r^{A2}	μ_u^{A2}
Bride and groom	0.2409	0.2475	0.0250	0.0249
Bride and groom_scharf1	0.3946	0.4001	0.0045	0.0046
Bride and groom_scharf3	0.9687	0.9687	0.0054	0.0053
Bride and groom_unscharf1	0.2037	0.2102	0.0369	0.0367
Bride and groom_unscharf5	0.1312	0.1369	0.0548	0.0543
People	0.2963	0.2965	0.0127	0.0125
People_scharf1	0.6631	0.6657	0.0022	0.0024
People_scharf3	0.9785	0.9790	0.0114	0.0108
People_unscharf1	0.1531	0.1511	0.0440	0.0420
People_unscharf5	0.1115	0.1092	0.1007	0.0966
Cashew nuts	0.5460	0.5762	0.0102	0.0098
Cashew nuts_scharf1	0.8161	0.8267	0.0042	0.0040
Cashew nuts_scharf3	0.9448	0.9467	0.0363	0.0346
Cashew nuts_unscharf1	0.4176	0.4573	0.0151	0.0138
Cashew nuts_unscharf5	0.3141	0.3643	0.0238	0.0207
Meal	0.3443	0.3773	0.0159	0.0139
Meal_scharf1	0.6200	0.6425	0.0052	0.0036
Meal_scharf3	0.9222	0.9316	0.0531	0.0447
Meal_unscharf1	0.2861	0.3185	0.0353	0.0319
Meal_unscharf5	0.2172	0.2539	0.0540	0.0496
Mandolin	0.6507	0.6724	0.0091	0.0086
Mandolin_scharf1	0.8501	0.8570	0.0043	0.0039
Mandolin_scharf3	0.9154	0.9166	0.0692	0.0681
Mandolin_unscharf1	0.5205	0.5569	0.0183	0.0169
Mandolin_unscharf5	0.4112	0.4611	0.0228	0.0208
Tailor	0.6153	0.6204	0.0104	0.0099
Tailor_scharf1	0.8700	0.8707	0.0038	0.0035
Tailor_scharf3	0.9024	0.8992	0.0800	0.0830
Tailor_unscharf1	0.3580	0.3732	0.0211	0.0194
Tailor_unscharf5	0.1981	0.2271	0.0321	0.0287

Auswertung der Formeln 3.1 und 3.2

Tabelle E.2: Bildschärfe I

Bildname	μ_{\max}^{A1}	μ_{\max}^{A2}	bs
Bride and groom	0.2475	0.0250	0.006188
Bride and groom_scharf1	0.4001	0.0046	0.001840
Bride and groom_scharf3	0.9687	0.0054	0.005231
Bride and groom_unscharf1	0.2102	0.0369	0.007756
Bride and groom_unscharf5	0.1369	0.0548	0.007502
People	0.2965	0.0127	0.003766
People_scharf1	0.6657	0.0024	0.001598
People_scharf3	0.9790	0.0114	0.011161
People_unscharf1	0.1531	0.0440	0.006736
People_unscharf5	0.1115	0.1007	0.011281
Cashew nuts	0.5762	0.0102	0.005877
Cashew nuts_scharf1	0.8267	0.0042	0.003472
Cashew nuts_scharf3	0.9467	0.0363	0.034365
Cashew nuts_unscharf1	0.4573	0.0151	0.006905
Cashew nuts_unscharf5	0.3643	0.0238	0.008670
Meal	0.3773	0.0159	0.005999
Meal_scharf1	0.6425	0.0052	0.003341
Meal_scharf3	0.9316	0.0531	0.049468
Meal_unscharf1	0.3185	0.0353	0.011243
Meal_unscharf5	0.2539	0.0540	0.013711
Mandolin	0.6724	0.0091	0.006119
Mandolin_scharf1	0.8570	0.0043	0.003685
Mandolin_scharf3	0.9166	0.0692	0.063429
Mandolin_unscharf1	0.5569	0.0183	0.010191
Mandolin_unscharf5	0.4611	0.0228	0.010513
Tailor	0.6204	0.0104	0.006452
Tailor_scharf1	0.8707	0.0038	0.003309
Tailor_scharf3	0.9024	0.0830	0.074899
Tailor_unscharf1	0.3732	0.0211	0.007875
Tailor_unscharf5	0.2271	0.0321	0.007290

Auswertung der Formeln 3.3

Tabelle E.3: Bildschärfe II

Bildname	a_M^G	b_M^G	fv	$\frac{ G }{nm}$
Bride and groom	-0.53	-0.76	0.92	0.3339
Bride and groom_R10	2.63	0.64	2.70	0.0125
Bride and groom_R40	2.61	0.97	2.79	<0.0001
Bride and groom_C10	-0.90	-0.44	1.01	0.0279
Bride and groom_C40	-0.38	-0.24	0.45	0.0002
People	-0.15	-0.52	0.54	0.0947
People_R10	1.63	0.03	1.64	0.0109
People_R40	1.72	0.44	1.77	0.0002
People_C10	0.17	-0.15	0.23	0.0071
People_C40	-0.56	-0.68	0.89	0.0001
Cashew nuts	0.25	0.55	0.61	0.1497
Cashew nuts_R10	2.14	0.75	2.27	0.0190
Cashew nuts_R40	2.25	0.81	2.39	0.0016
Cashew nuts_C10	-1.13	-0.32	1.17	0.0775
Cashew nuts_C40	-1.75	-0.94	1.98	0.0054
Meal	-0.48	0.37	0.61	0.0596
Meal_R10	1.60	0.93	1.85	0.0458
Meal_R40	1.34	0.50	1.44	0.0148
Meal_C10	-1.50	-0.31	1.53	0.0396
Meal_C40	-1.50	-0.58	1.61	0.0181
Mandolin	0.91	0.04	0.92	0.0909
Mandolin_R10	1.34	0.47	1.42	0.0165
Mandolin_R40	1.70	0.63	1.81	0.0121
Mandolin_C10	-1.11	-0.48	1.20	0.0770
Mandolin_C40	-1.44	-0.42	1.50	0.0147
Tailor	0.39	0.10	0.40	0.4313
Tailor_R10	1.36	0.49	1.45	0.0169
Tailor_R40	1.70	0.64	1.81	0.0121
Tailor_C10	-1.25	-0.62	1.40	0.0311
Tailor_C40	-1.67	-0.48	1.73	0.0127

Auswertungen der Formeln 3.7

Tabelle E.4: Farbverschiebung

Bildname	mh_0	mh_1	mh_2	mh_3	$\frac{ah_1}{nm}$	$\frac{ah_2}{nm}$	$\frac{ah_3}{nm}$
Bride and groom	34.97	17.76	55.99	80.87	0.63	0.25	0.12
Bride and groom_+15	45.96	28.15	54.22	80.79	0.48	0.35	0.17
Bride and groom_+60	75.86	–	67.31	80.80	0	0.37	0.63
Bride and groom_-15	29.80	16.02	53.53	75.60	0.67	0.28	0.05
Bride and groom_-60	13.46	13.42	40.63	–	0.99	0.01	0
People	35.54	13.46	54.17	78.12	0.47	0.51	0.02
People_+15	46.07	26.01	58.78	74.72	0.42	0.50	0.08
People_+60	75.73	–	66.77	81.56	0	0.39	0.61
People_-15	30.29	14.57	48.67	79.81	0.54	0.45	0.01
People_-60	13.68	13.68	–	–	1.0	0	0
Cashew nuts	36.92	17.17	53.64	84.49	0.59	0.26	0.15
Cashew nuts_+15	47.36	27.76	54.37	84.25	0.47	0.34	0.19
Cashew nuts_+60	76.41	–	66.99	81.70	0	0.36	0.64
Cashew nuts_-15	31.52	16.54	52.66	77.65	0.65	0.25	0.10
Cashew nuts_-60	14.33	13.47	41.05	–	0.97	0.03	0
Meal	59.09	20.18	56.64	84.58	0.28	0.27	0.45
Meal_+15	65.67	28.45	55.90	85.12	0.19	0.29	0.52
Meal_+60	84.44	–	66.88	87.17	0	0.13	0.87
Meal_-15	50.88	19.86	56.96	76.88	0.33	0.37	0.30
Meal_-60	24.23	23.29	40.83	–	0.95	0.05	0
Mandolin	45.03	20.66	54.97	80.02	0.42	0.41	0.17
Mandolin_+15	53.74	29.06	55.78	79.96	0.30	0.45	0.25
Mandolin_+60	78.99	–	67.43	82.36	0	0.23	0.77
Mandolin_-15	38.53	20.82	53.90	75.91	0.51	0.42	0.07
Mandolin_-60	17.66	17.40	41.43	–	0.99	0.01	0
Tailor	44.40	18.90	55.15	80.81	0.44	0.35	0.21
Tailor_+15	53.59	28.98	55.93	81.06	0.34	0.39	0.27
Tailor_+60	79.12	–	67.79	83.24	0	0.27	0.73
Tailor_-15	38.00	18.58	54.47	76.95	0.51	0.40	0.09
Tailor_-60	17.52	16.97	40.99	–	0.98	0.02	0

Auswertungen der Formeln 3.9

Tabelle E.5: Helligkeitsverteilung

Bildname	μ_r^R	μ_u^R	ra
Bride and groom	0.0239	0.0243	0.0241
Bride and groom_15	0.9796	0.9797	0.9797
Bride and groom_60	0.9875	0.9876	0.9876
People	0.1563	0.1757	0.1660
People_15	0.9889	0.9887	0.9888
People_60	0.9896	0.9889	0.9893
Cashew nuts	0.1859	0.2249	0.2054
Cashew nuts_15	0.9865	0.9875	0.9870
Cashew nuts_60	0.9882	0.9880	0.9881
Meal	0.0877	0.1038	0.0958
Meal_15	0.9876	0.9882	0.9879
Meal_60	0.9885	0.9887	0.9886
Mandolin	0.3616	0.3778	0.3697
Mandolin_15	0.9898	0.9905	0.9902
Mandolin_60	0.9908	0.9914	0.9911
Tailor	0.3462	0.3913	0.3688
Tailor_15	0.9900	0.9897	0.9899
Tailor_60	0.9916	0.9918	0.9917

Auswertungen der Formeln 3.11

Tabelle E.6: Rauschen

Bildname	ms_1	ms_2	ms_3	ms_4	$\frac{as_1}{nm}$	$\frac{as_2}{nm}$	$\frac{as_3}{nm}$	$\frac{as_4}{nm}$
Bride and groom	3.64	11.06	20.27	40.54	0.71	0.19	0.09	<0.01
Bride and groom_+15	3.86	11.02	21.74	40.76	0.65	0.22	0.12	<0.01
Bride and groom_+60	5.03	11.73	22.23	45.64	0.38	0.24	0.23	0.15
Bride and groom_-15	3.46	11.36	19.04	38.40	0.77	0.17	0.05	<0.01
Bride and groom_-60	2.71	9.43	19.43	–	0.96	0.04	0.01	0
People	4.43	10.88	21.75	52.83	0.27	0.53	0.09	0.11
People_+15	4.20	11.90	21.33	54.61	0.21	0.54	0.13	0.12
People_+60	4.74	12.05	24.65	50.15	0.10	0.11	0.52	0.27
People_-15	4.82	10.02	21.64	48.45	0.39	0.44	0.07	0.10
People_-60	3.63	10.96	22.76	36.85	0.84	0.06	0.09	0.01
Cashew nuts	3.53	11.97	22.75	47.71	0.32	0.23	0.31	0.14
Cashew nuts_+15	3.64	12.02	23.34	48.39	0.29	0.20	0.31	0.20
Cashew nuts_+60	4.39	11.66	24.39	53.18	0.17	0.11	0.21	0.51
Cashew nuts_-15	3.50	11.91	22.03	46.12	0.36	0.26	0.27	0.11
Cashew nuts_-60	3.48	10.85	21.98	38.14	0.66	0.25	0.08	<0.01
Meal	4.85	11.18	22.81	42.85	0.43	0.30	0.19	0.08
Meal_+15	5.10	11.41	22.70	44.65	0.35	0.32	0.20	0.13
Meal_+60	3.22	12.17	22.99	53.26	0.07	0.26	0.34	0.33
Meal_-15	4.71	11.15	22.64	40.98	0.51	0.26	0.17	0.06
Meal_-60	3.35	11.29	19.95	35.45	0.78	0.16	0.05	0.01
Mandolin	4.34	11.71	23.26	49.65	0.33	0.20	0.30	0.17
Mandolin_+15	4.53	11.49	23.75	49.83	0.28	0.19	0.29	0.24
Mandolin_+60	4.35	12.03	22.98	58.65	0.10	0.17	0.20	0.53
Mandolin_-15	4.14	11.91	22.28	47.52	0.37	0.22	0.28	0.13
Mandolin_-60	3.45	10.93	22.91	35.81	0.61	0.26	0.11	0.01
Tailor	2.95	11.11	21.89	46.31	0.74	0.15	0.07	0.04
Tailor_+15	3.14	11.19	22.28	50.21	0.68	0.17	0.09	0.06
Tailor_+60	3.87	11.45	22.56	59.71	0.46	0.22	0.17	0.15
Tailor_-15	2.79	11.11	21.75	42.01	0.78	0.13	0.06	0.05
Tailor_-60	1.92	10.91	19.75	34.66	0.92	0.05	0.02	<0.01

Auswertungen der Formeln 3.13

Tabelle E.7: Sättigungsverteilung I

Bildname	s_{\max}	as_G	gs_1	$gs_{1_{kor}}$
Bride and groom	70.94	0.33	0.47	0.66
Bride and groom_+15	77.86	0.24	0.37	0.48
Bride and groom_+60	99.45	0.05	0.13	0.13
Bride and groom_-15	63.10	0.40	0.52	0.82
Bride and groom_-60	33.27	0.68	0.71	2.14
People	102.39	0.09	0.33	0.32
People_+15	110.05	0.07	0.32	0.29
People_+60	124.71	0.02	0.16	0.13
People_-15	92.20	0.11	0.29	0.31
People_-60	46.57	0.26	0.31	0.66
Cashew nuts	107.01	0.15	0.47	0.44
Cashew nuts_+15	115.80	0.12	0.43	0.37
Cashew nuts_+60	127.49	0.04	0.26	0.20
Cashew nuts_-15	95.99	0.18	0.50	0.52
Cashew nuts_-60	47.50	0.31	0.47	0.99
Meal	71.68	0.06	0.14	0.20
Meal_+15	79.51	0.05	0.14	0.18
Meal_+60	101.90	0.04	0.55	0.54
Meal_-15	64.39	0.08	0.16	0.25
Meal_-60	37.01	0.39	0.49	1.32
Mandolin	124.11	0.09	0.28	0.22
Mandolin_+15	131.73	0.07	0.25	0.19
Mandolin_+60	133.52	0.03	0.30	0.22
Mandolin_-15	113.06	0.12	0.31	0.28
Mandolin_-60	57.62	0.31	0.51	0.88
Tailor	104.71	0.44	0.59	0.57
Tailor_+15	114.02	0.37	0.53	0.47
Tailor_+60	133.79	0.17	0.37	0.28
Tailor_-15	93.42	0.50	0.64	0.68
Tailor_-60	45.57	0.72	0.79	1.73

Auswertungen der Formeln 3.14

Tabelle E.8: Sättigungsverteilung II

Bildname	$\mu_{X_{bs}}^D (bs)$	$\mu_{X_{bs}}^T (bs)$	$\mu_{X_{\mu_{\max}^{A1}}}^D (\mu_{\max}^{A1})$	$\mu_{X_{\mu_{\max}^{A1}}}^T (\mu_{\max}^{A1})$
Bride and groom	1	1	1	1
Bride and groom_scharf1	0.4713	0.5531	1	1
Bride and groom_scharf3	1	1	0.0023	0.0476
Bride and groom_unscharf1	0.9993	0.8647	0.8498	0.8026
Bride and groom_unscharf5	0.9993	0.8758	0.1069	0.3379
People	1	1	1	1
People_scharf1	0.3522	0.4945	1	1
People_scharf3	0.9905	0.5083	0	0
People_unscharf1	0.9999	0.9706	0.1868	0.4996
People_unscharf5	0.9903	0.5023	0	0
Cashew nuts	1	1	1	1
Cashew nuts_scharf1	0.9845	0.9235	0.4933	0.6109
Cashew nuts_scharf3	0.6683	0.3187	0.0222	0.1491
Cashew nuts_unscharf1	0.9999	0.9509	1	1
Cashew nuts_unscharf5	0.9979	0.7677	1	1
Meal	1	1	1	1
Meal_scharf1	0.9753	0.9035	1	1
Meal_scharf3	0.2756	0.1996	0.0477	0.2187
Meal_unscharf1	0.9902	0.5007	1	1
Meal_unscharf5	0.9775	0.4806	1	1
Mandolin	1	1	1	1
Mandolin_scharf1	0.9985	0.9765	0.3162	0.5345
Mandolin_scharf3	0.0562	0.0903	0.0828	0.2880
Mandolin_unscharf1	0.9939	0.6068	1	1
Mandolin_unscharf5	0.9929	0.5750	1	1
Tailor	1	1	1	1
Tailor_scharf1	0.9651	0.8853	0.2495	0.4999
Tailor_scharf3	<0.0001	0.0002	0.1250	0.3538
Tailor_unscharf1	0.9991	0.8510	1	1
Tailor_unscharf5	0.9999	0.9714	0.7974	0.8418

Tabelle E.9: Zugehörigkeitsfunktionen der Bildschärfe

Bildname	$\mu_{X_{vf}}^D(\sqrt{vf})$	$\mu_{X_{vf}}^T(\sqrt{vf})$
Bride and groom	1	1
Bride and groom_+15	1	1
Bride and groom_+60	0.5433	0.3339
Bride and groom_-15	0.8786	0.5001
Bride and groom_-60	0	0
People	1	1
People_+15	1	1
People_+60	0.1339	0.1655
People_-15	0.9862	0.8317
People_-60	0.0168	0.0608
Cashew nuts	1	1
Cashew nuts_+15	0.9050	0.5004
Cashew nuts_+60	0.0376	0.0877
Cashew nuts_-15	1	1
Cashew nuts_-60	0.0736	0.1273
Meal	1	1
Meal_+15	0.9752	0.7447
Meal_+60	0.1854	0.1947
Meal_-15	0.9999	0.9917
Meal_-60	0.0176	0.0622
Mandolin	1	1
Mandolin_+15	0.9064	0.5040
Mandolin_+60	<0.0001	<0.0001
Mandolin_-15	1	1
Mandolin_-60	0.0845	0.1364
Tailor	1	1
Tailor_+15	1	1
Tailor_+60	0.3996	0.2596
Tailor_-15	0.9629	0.7238
Tailor_-60	0.0038	0.0288

Tabelle E.10: Zugehörigkeitsfunktionen der Farbenvielfalt

Bildname	$\mu_{X_{fv}}^T(fv)$	$\frac{ G }{nm}$
Bride and groom	1	0.3339
Bride and groom_R10	0	0.0125
Bride and groom_R40	0	<0.0001
Bride and groom_C10	0.8305	0.0279
Bride and groom_C40	1	0.0002
People	1	0.0947
People_R10	0.3236	0.0109
People_R40	0.2734	0.0002
People_C10	1	0.0071
People_C40	1	0.0001
Cashew nuts	1	0.1497
Cashew nuts_R10	0.0880	0.0190
Cashew nuts_R40	0.0398	0.0016
Cashew nuts_C10	0.4991	0.0775
Cashew nuts_C40	0.1955	0.0001
Meal	1	0.0596
Meal_R10	0.2452	0.0458
Meal_R40	0.3999	0.00848
Meal_C10	0.3637	0.0396
Meal_C40	0.3345	0.00981
Mandolin	1	0.0909
Mandolin_R10	0.4059	0.0165
Mandolin_R40	0.2582	0.00721
Mandolin_C10	0.4873	0.0770
Mandolin_C40	0.3764	0.00947
Tailor	1	0.4313
Tailor_R10	0.3963	0.0169
Tailor_R40	0.4134	0.00821
Tailor_C10	0.2576	0.0311
Tailor_C40	0.2884	0.00927

Tabelle E.11: Zugehörigkeitsfunktion der Farbverschiebung

Bildname	$\mu_{X_{mh_1}}^D$	$\mu_{X_{mh_2}}^D$	$\mu_{X_{mh_3}}^D$	$\mu_{X_{\frac{ah_1}{nm}}}^T$	$\mu_{X_{\frac{ah_3}{nm}}}^T$
Bride and groom	1	1	1	1	1
Bride and groom_+15	0.6997	1	1	1	1
Bride and groom_+60	0	0.0809	1	0	0.2725
Bride and groom_-15	1	0.9999	0.8073	0.5572	1
Bride and groom_-60	0.9999	0.0043	0	0	0
People	1	1	1	1	1
People_+15	0.8467	0.9485	0.6494	1	1
People_+60	0	0.1169	1	0	0.3282
People_-15	1	0.7350	1	1	0.2633
People_-60	1	0	0	0	0
Cashew nuts	1	1	1	1	1
Cashew nuts_+15	0.7303	1	1	1	1
Cashew nuts_+60	0	0.1017	1	0	0.2594
Cashew nuts_-15	1	0.9896	0.9934	0.7337	1
Cashew nuts_-60	1	0.0120	0	0	0
Meal	1	1	1	1	1
Meal_+15	0.6752	1	0.9976	0.5241	0.5227
Meal_+60	0	0.1089	0.9436	0	0
Meal_-15	1	0.9988	0.9533	1	1
Meal_-60	0.9630	0.0073	0	0.0063	0
Mandolin	1	1	1	1	
Mandolin_+15	0.6227	1	1	1	1
Mandolin_+60	0	0.0740	1	0	0
Mandolin_-15	0.9999	1	0.8515	1	1
Mandolin_-60	1	0.0220	0	0	0
Tailor	1	1	1	1	
Tailor_+15	0.6299	1	1	1	1
Tailor_+60	0	0.0550	1	0	0.0733
Tailor_-15	1	1	0.9585	1	1
Tailor_-60	1	0.0105	0	0	0

Tabelle E.12: Zugehörigkeitsfunktionen der Helligkeitsverteilung

Bildname	$\mu_{X_{ms1}}^T$	$\mu_{X_{ms2}}^T$	$\mu_{X_{ms3}}^T$	$\mu_{X_{ms4}}^T$	$\mu_{X_{nm}^{gs1}}^D$	$\mu_{X_{nm}^{gs4}}^D$	$\mu_{X_{kor}^{gs1}}^D$	$\mu_{X_{smax}}^D$
Bride & groom	1	1	1	1	1	1	1	1
Bride & groom ₊₁₅	1	1	1	1	1	1	1	1
Bride & groom ₊₆₀	0.48	1	1	1	1	1	0.001	1
Bride & groom ₋₁₅	1	1	0.403	0.398	0.954	1	0.977	0.913
Bride & groom ₋₆₀	0.414	0.301	0.455	0.059	<0.001	1	<0.001	0
People	1	1	1	1	1	1	1	1
People_ ₊₁₅	1	1	1	0.486	0.845	1	1	1
People_ ₊₆₀	1	0.921	0.446	1	0.053	0.836	<0.001	0.997
People_ ₋₁₅	1	0.426	1	1	1	1	1	1
People_ ₋₆₀	1	1	1	0.301	0.573	1	1	1
Cashew nuts	1	1	1	1	1	1	1	1
Cashew nuts ₊₁₅	1	0.945	0.916	1	1	0.986	1	1
Cashew nuts ₊₆₀	1	1	0.462	0.651	0.466	0.004	1	0.92
Cashew nuts ₋₁₅	1	1	1	1	1	1	1	1
Cashew nuts ₋₆₀	1	0.965	1	0.382	1	1	0.898	0.285
Meal	1	1	1	1	1	1	1	1
Meal_ ₊₁₅	0.468	1	1	1	1	1	0.809	1
Meal_ ₊₆₀	1	0.799	1	0.571	<0.001	0.607	1	1
Meal_ ₋₁₅	1	1	1	1	1	1	1	1
Meal_ ₋₆₀	1	1	0.678	0.09	0.903	1	0.6	0.02
Mandolin	1	1	1	1	1	1	1	1
Mandolin_ ₊₁₅	1	1	0.515	1	1	0.925	0.93	0.593
Mandolin_ ₊₆₀	1	0.945	1	0.443	0.045	0	1	0.393
Mandolin_ ₋₁₅	1	1	1	1	1	1	1	1
Mandolin_ ₋₆₀	1	1	1	0.237	1	1	0.957	0.75
Tailor	1	1	1	1	1	1	1	1
Tailor_ ₊₁₅	1	1	1	1	1	1	1	1
Tailor_ ₊₆₀	1	1	1	0.432	1	1	1	0.365
Tailor_ ₋₁₅	0.48	1	1	1	0.932	1	0.999	1
Tailor_ ₋₆₀	0.332	1	0.498	0.165	0.079	1	0.155	0.213

Tabelle E.13: Zugehörigkeitsfunktionen der Sättigungsverteilung

Bewertung	Manipulation			
	Bildschärfe			
	<u>_s1</u>	<u>_s3</u>	<u>_us1</u>	<u>_us5</u>
<i>EB_{BS}</i>	0.495	0	0.181	0
<i>EB_{VF}</i>	1	0	1	1
<i>EB_{FV}</i>	1	1	0.46	0.992
<i>EB_{HV}</i>	0.999	1	0.999	0.946
<i>EB_{RA}</i>	0.374	0	1	1
<i>EB_{SV}</i>	0.026	0	0.843	0.077
<i>GB_{g1}</i>	0.008	0	0.07	0
<i>GB_{g2}</i>	0.411	0	0.642	0
<i>GB_{g3}</i>	0.181	0	0.141	0
	Farbenvielfalt			
	<u>+15</u>	<u>+60</u>	<u>-15</u>	<u>-60</u>
<i>EB_{BS}</i>	1	0	1	0
<i>EB_{VF}</i>	1	0.165	1	0.832
<i>EB_{FV}</i>	1	1	1	0.599
<i>EB_{HV}</i>	0.821	0.404	0.53	0
<i>EB_{RA}</i>	1	1	1	1
<i>EB_{SV}</i>	0.471	0.002	0.226	0.037
<i>GB_{g1}</i>	0.387	0	0.099	0
<i>GB_{g2}</i>	0.854	0	0.681	0
<i>GB_{g3}</i>	0.715	0	0.356	0
	Farbverschiebung			
	<u>_R10</u>	<u>_R40</u>	<u>_C10</u>	<u>_C40</u>
<i>EB_{BS}</i>	0.954	0.595	1	0.777
<i>EB_{VF}</i>	1	1	1	0.993
<i>EB_{FV}</i>	0.334	0	0	0
<i>EB_{HV}</i>	0.979	0.676	0.94	0.878
<i>EB_{RA}</i>	1	1	1	1
<i>EB_{SV}</i>	0	0	0	0
<i>GB_{g1}</i>	0	0	0	0
<i>GB_{g2}</i>	0	0	0	0
<i>GB_{g3}</i>	0	0	0	0

Tabelle E.14: "People" Gesamtbewertungen I

Bewertung	Manipulation			
	Helligkeit			
	$\underline{+15}$	$\underline{+60}$	$\underline{-15}$	$\underline{-60}$
EB_{BS}	0.999	0	0.999	0
EB_{VF}	0.733	0	0.87	0.088
EB_{FV}	1	0.464	1	0.999
EB_{HV}	0.522	0	0.194	0
EB_{RA}	1	1	1	1
EB_{SV}	0.21	0.003	0.483	0.079
GB_{g_1}	0.08	0	0.081	0
GB_{g_2}	0.65	0	0.658	0
GB_{g_3}	0.3	0	0.211	0
	Rauschen			
	Gauß 15%	Gauß 60%		
EB_{BS}	0	0		
EB_{VF}	0.338	0		
EB_{FV}	1	1		
EB_{HV}	0.991	0.958		
EB_{RA}	0	0		
EB_{SV}	0	0		
GB_{g_1}	0	0		
GB_{g_2}	0	0		
GB_{g_3}	0	0		
	Sättigung			
	$\underline{+15}$	$\underline{+60}$	$\underline{-15}$	$\underline{-60}$
EB_{BS}	1	1	1	0.207
EB_{VF}	1	0.838	1	0.685
EB_{FV}	1	1	1	0.474
EB_{HV}	0.999	0.959	0.999	1
EB_{RA}	1	1	0.919	1
EB_{SV}	0.411	<0.001	0.426	0.043
GB_{g_1}	0.411	<0.001	0.425	0.003
GB_{g_2}	0.862	0.119	0.867	0.377
GB_{g_3}	0.8	0.035	0.807	0.005

Tabelle E.15: "People" Gesamtbewertungen II

Anhang F

Bildname	μ_r^{A1}	μ_u^{A1}	μ_r^{A2}	μ_u^{A2}
Berge	0.3111	0.2685	0.1007	0.0632
Berge_scharf1	0.5849	0.5888	0.0424	0.0162
Berge_scharf3	0.8044	0.8249	0.0541	0.0676
Berge_unscharf1	0.0907	0.0742	0.1060	0.0670
Berge_unscharf5	0.0182	0.0140	0.1544	0.1039
Frau	0.0589	0.0812	0.3815	0.2883
Frau_scharf1	0.1685	0.2467	0.1526	0.0943
Frau_scharf3	0.8094	0.8864	0.0516	0.0231
Frau_unscharf1	0.0428	0.0549	0.3136	0.2463
Frau_unscharf5	0.0357	0.0461	0.3267	0.2685
Haus	0.3744	0.4703	0.1158	0.0420
Haus_scharf1	0.6418	0.7738	0.0216	0.0044
Haus_scharf3	0.8848	0.9530	0.0843	0.0352
Haus_unscharf1	0.2391	0.3493	0.0980	0.0411
Haus_unscharf5	0.1123	0.2199	0.1838	0.0964

Tabelle F.1: Ergebnisse II der Formeln 3.1 und 3.2

Bildname	μ_{\max}^{A1}	μ_{\max}^{A2}	bs
Berge	0.3111	0.1007	0.031328
Berge_scharf1	0.5888	0.0424	0.024965
Berge_scharf3	0.8249	0.0676	0.055763
Berge_unscharf1	0.0907	0.1060	0.009614
Berge_unscharf5	0.0182	0.1544	0.002810
Frau	0.0812	0.3815	0.030978
Frau_scharf1	0.2467	0.1526	0.037646
Frau_scharf3	0.8864	0.0516	0.045738
Frau_unscharf1	0.0549	0.3136	0.017217
Frau_unscharf5	0.0461	0.3267	0.015061
Haus	0.4703	0.1158	0.054461
Haus_scharf1	0.7738	0.0216	0.016714
Haus_scharf3	0.9530	0.0843	0.080338
Haus_unscharf1	0.3493	0.0980	0.003423
Haus_unscharf5	0.2199	0.1838	0.040418

Tabelle F.2: Ergebnisse II der Formeln 3.3

Bildname	vf	\sqrt{vf}	Bildname	vf	\sqrt{vf}
Berge	411.56	20.29			
Berge_+15	569.16	23.86	Berge_+60	1614.13	40.18
Berge_-15	297.34	17.24	Berge_-60	65.02	8.06
Frau	634.30	25.19			
Frau_+15	877.34	29.62	Frau_+60	2086.59	45.68
Frau_-15	451.78	21.26	Frau_-60	96.08	9.80
Haus	1056.01	32.50			
Haus_+15	1408.83	37.53	Haus_+60	3322.04	57.64
Haus_-15	786.48	28.04	Haus_-60	187.33	13.69

Tabelle F.3: Ergebnisse II der Formeln 3.5

Bildname	a_M^G	b_M^G	fv	$\frac{ G }{nm}$
Berge	-0.14	-0.99	1.01	0.0876
Berge_R10	0.62	-0.32	0.70	0.0611
Berge_R40	-0.62	2.49	2.56	<0.0001
Berge_C10	-1.90	-1.38	2.35	0.0028
Berge_C40	-1.43	-0.50	1.52	0.0001
Frau	0.14	0.16	0.22	0.0001
Frau_R10	-	-	-	0
Frau_R40	-	-	-	0
Frau_C10	1.68	-0.82	1.87	0.0002
Frau_C40	0.77	-0.53	0.94	0.0005
Haus	-0.02	-0.59	0.59	0.0369
Haus_R10	1.09	0.61	1.25	0.0077
Haus_R40	0.75	0.93	1.19	0.0003
Haus_C10	-0.63	-0.29	0.69	0.0037
Haus_C40	-0.48	0.47	0.67	<0.0001

Tabelle F.4: Ergebnisse II der Formeln 3.7

Bildname	mh_0	mh_1	mh_2	mh_3	$\frac{ah_1}{nm}$	$\frac{ah_2}{nm}$	$\frac{ah_3}{nm}$
Berge	66.25	35.50	54.51	80.31	0.06	0.45	0.49
Berge_+15	71.53	38.32	58.10	81.95	0.01	0.43	0.56
Berge_+60	86.92	-	69.70	86.92	0	0.01	0.99
Berge_-15	57.10	34.50	56.48	75.14	0.14	0.66	0.20
Berge_-60	27.29	27.13	40.57	-	0.99	0.01	0
Frau	57.81	23.15	57.94	77.03	0.28	0.21	0.51
Frau_+15	64.52	32.78	54.36	79.49	0.21	0.21	0.58
Frau_+60	83.79	35.14	68.96	85.65	0.01	0.11	0.88
Frau_-15	49.72	21.50	61.25	73.58	0.32	0.58	0.09
Frau_-60	23.47	23.43	52.06	71.74	0.98	0.01	0.01
Haus	42.37	23.15	50.82	77.15	0.40	0.49	0.11
Haus_+15	51.82	30.14	54.69	79.29	0.24	0.64	0.12
Haus_+60	78.17	17.41	67.54	80.12	0.01	0.15	0.84
Haus_-15	36.29	24.25	50.46	70.40	0.55	0.44	0.01
Haus_-60	16.46	16.42	52.72	-	0.99	0.01	0

Tabelle F.5: Ergebnisse II der Formeln 3.9

Bildname	μ_r^R	μ_u^R	ra
Berge	0.2548	0.2102	0.2325
Berge_15	0.9886	0.9873	0.9880
Berge_60	0.9901	0.9893	0.9897
Frau	0.0450	0.0622	0.0536
Frau_15	0.9879	0.9883	0.9881
Frau_60	0.9923	0.9916	0.9920
Haus	0.3352	0.4291	0.3822
Haus_15	0.9885	0.9886	0.9886
Haus_60	0.9920	0.9911	0.9916

Tabelle F.6: Ergebnisse II der Formeln 3.11

Bildname	ms_1	ms_2	ms_3	ms_4	$\frac{as_1}{nm}$	$\frac{as_2}{nm}$	$\frac{as_3}{nm}$	$\frac{as_4}{nm}$
Berge	4.92	11.83	21.44	33.31	0.45	0.30	0.24	0.01
Berge_+15	5.12	11.10	21.85	34.03	0.37	0.29	0.31	0.03
Berge_+60	5.66	12.14	22.30	44.38	0.10	0.26	0.30	0.34
Berge_-15	4.64	12.10	21.01	–	0.53	0.32	0.15	0
Berge_-60	3.64	10.33	–	–	0.86	0.14	0	0
Frau	4.92	14.46	19.42	36.86	0.01	0.42	0.54	0.03
Frau_+15	0.80	14.13	20.13	39.22	0.01	0.09	0.84	0.06
Frau_+60	–	13.87	26.04	43.26	0	0.01	0.16	0.83
Frau_-15	7.42	13.35	20.60	36.84	0.01	0.75	0.23	0.01
Frau_-60	6.32	10.40	17.74	49.65	0.81	0.17	0.01	0.01
Haus	4.35	11.72	25.36	40.38	0.13	0.10	0.58	0.19
Haus_+15	4.55	11.64	27.10	40.23	0.11	0.09	0.44	0.36
Haus_+60	4.80	11.73	23.46	59.95	0.04	0.07	0.09	0.80
Haus_-15	4.31	12.06	23.00	39.46	0.15	0.11	0.62	0.11
Haus_-60	3.83	11.08	20.37	54.40	0.28	0.62	0.09	0.01

Tabelle F.7: Ergebnisse II der Formeln 3.13

Bildname	$\frac{as'_1}{nm}$	$\frac{as'_2}{nm}$	$\frac{as'_3}{nm}$	$\frac{as'_4}{nm}$	S_{\max}
Berge	0.08	0.23	0.31	0.38	37.32
Berge_+15	0.07	0.22	0.31	0.40	42.14
Berge_+60	0.05	0.18	0.33	0.44	75.97
Berge_-15	0.08	0.23	0.30	0.39	32.71
Berge_-60	0.10	0.24	0.30	0.36	16.56
Frau	0.01	0.39	0.56	0.04	98.49
Frau_+15	0.01	0.14	0.79	0.05	106.56
Frau_+60	0	0.01	0.20	0.79	106.93
Frau_-15	0.01	0.85	0.13	0.01	96.20
Frau_-60	0.85	0.13	0.01	0.01	52.23
Haus	0.10	0.09	0.23	0.58	76.16
Haus_+15	0.13	0.10	0.59	0.18	114.41
Haus_+60	0.05	0.07	0.10	0.78	117.56
Haus_-15	0.17	0.16	0.61	0.06	68.01
Haus_-60	0.32	0.60	0.07	0.01	41.62

Tabelle F.8: Ergebnisse II der Formeln 3.14

Chromosom	Berge	Frau	Haus	Kind	Stadt
a_1^L	0.788	0.570	0.4702	0.195	0.131
a_2^L	0.575	0.363	0.182	0.577	0.536
w_{L1}	0.476	0.351	0.400	0.208	0.522
r_1^L	2.961	1.124	1.016	1.932	3.201
s_1^L	0.758	0.989	0.941	0.972	0.531
w_{L2}	0.500	0.731	0.494	0.502	0.582
r_2^L	1.001	2.524	1.123	1.033	3.291
s_2^L	0.515	0.508	0.503	0.907	0.800
w_{L3}	0.023	0.004	0.253	0.287	0.013
a_v	0.812	-46.032	-0.781	-0.471	-22.223
b_v	3.412	26.758	0.353	1.336	-12.316
a_1^C	0.331	0.226	0.261	0.355	0.318
a_2^C	0.923	0.847	0.661	0.694	0.854
w_{C1}	0.471	0.006	0.303	0.154	0.127
r_1^C	1.13	5.131	2.431	1	3.322
s_1^C	0.5	0.389	0.492	0.491	0.338
w_{C2}	0.341	0.937	0.541	0.352	0.141
r_2^C	0.505	3.893	2.262	1	6.413
s_2^C	1.471	0.953	0.561	0.513	0.641
w_{C3}	0.031	0.032	0.135	0.494	0.755
c^U	0.023	0.339	0.001	0.010	0.381
f^U	1.234	2	1.041	2.127	2.011
c^R	0.012	0.339	0.319	0.031	0.517
f^R	0.972	1	2.014	1.782	0.692

Tabelle F.9: Chromosomen GFO ohne VO

Chromosom	Berge	Frau	Haus	Kind	Stadt
a_1^L	0.409	0.480	0.378	0.155	0.171
a_2^L	0.553	0.461	0.649	0.245	0.561
w_{L1}	0.338	0.667	0.374	0.248	0.425
r_1^L	0.013	1.504	0.034	1.352	1.441
s_1^L	0.956	0.999	0.996	0.972	0.731
w_{L2}	0.501	0.495	0.501	0.502	0.582
r_2^L	1.071	3.144	1.003	1.033	3.291
s_2^L	0.507	0.500	0.515	0.907	0.800
w_{L3}	0.491	0.002	0.505	0.287	0.013
a_v	-0.074	0.487	-0.573	0.714	-0.763
b_v	0.583	-0.125	-0.259	-0.014	0.146
a_1^C	0.248	0.294	0.318	0.455	0.388
a_2^C	0.694	0.754	0.798	0.694	0.854
w_{C1}	0.326	0.349	0.319	0.354	0.297
r_1^C	1.11	4.978	1.101	1	1.416
s_1^C	0.493	0.496	0.487	0.541	0.481
w_{C2}	0.350	0.331	0.344	0.152	0.241
r_2^C	1.131	1.092	1.030	1.001	1.137
s_2^C	0.508	0.502	0.507	0.563	0.544
w_{C3}	0.341	0.323	0.334	0.494	0.510
c^U	0.015	0.285	0.176	0.106	0.216
f^U	1.340	2	1.146	1.173	1.411
c^R	0.004	0.394	0.093	0.051	0.517
f^R	0.998	1.742	1.835	1.042	0.692

Tabelle F.10: Chromosomen GFO mit VO

Anhang G

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.576	0.616	0.653
2	0.612	0.686	0.696
3	0.625	0.707	0.779
4	0.643	0.724	0.799
5	0.668	0.753	0.821
6	0.679	0.803	0.827
7	0.706	0.819	0.828
8	0.711	0.823	0.830
9	0.719	0.825	0.830
10	0.731	0.829	0.831
11	0.751	0.830	0.831
12	0.757	0.831	0.831
13	0.763		
14	0.778		
15	0.791		
16	0.802		
17	0.813		
18	0.816		
19	0.821		
20	0.823		
21	0.826		
22	0.829		
23	0.830		

Tabelle G.1: durch. Verläufe, Berge ohne VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.491	0.624	0.601	0.625	0.645	0.671
2	0.587	0.638	0.681	0.715	0.671	0.707
3	0.612	0.648	0.699	0.725	0.742	0.829
4	0.617	0.657	0.707	0.733	0.791	0.829
5	0.638	0.699	0.739	0.783	0.819	0.830
6	0.648	0.701	0.792	0.819	0.820	0.830
7	0.672	0.734	0.808	0.826	0.822	0.830
8	0.682	0.749	0.811	0.829	0.829	0.831
9	0.690	0.756	0.818	0.830	0.830	0.831
10	0.699	0.756	0.821	0.830	0.830	0.831
11	0.737	0.778	0.829	0.831	0.831	0.831
12	0.738	0.779	0.829		0.831	
13	0.756	0.780	0.830			
14	0.766	0.801	0.831			
15	0.778	0.806				
16	0.791	0.814				
17	0.811	0.819				
18	0.812	0.826				
19	0.816	0.829				
20	0.819	0.830				
21	0.822	0.831				
22	0.829					
23	0.829					
24	0.830					
25	0.830					
26	0.831					

Tabelle G.2: extreme Verläufe, Berge ohne VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.238	0.275	0.301
2	0.383	0.468	0.499
3	0.422	0.535	0.555
4	0.514	0.571	0.572
5	0.557	0.582	0.587
6	0.596	0.603	0.611
7	0.607	0.614	0.639
8	0.617	0.626	0.647
9	0.624	0.640	0.647
10	0.627	0.646	0.672
11	0.634	0.650	0.682
12	0.637	0.656	0.687
13	0.645	0.661	0.69
14	0.653	0.676	
15	0.659	0.687	
16	0.664	0.688	
17	0.669	0.689	
18	0.672	0.690	
19	0.676		
20	0.681		
21	0.683		
22	0.686		
23	0.688		
24	0.690		
25	0.691		

Tabelle G.3: durch. Verläufe, Frau ohne VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.106	0.349	0.175	0.354	0.287	0.318
2	0.294	0.507	0.445	0.571	0.448	0.491
3	0.315	0.591	0.483	0.606	0.527	0.599
4	0.445	0.591	0.526	0.636	0.539	0.637
5	0.496	0.601	0.541	0.639	0.540	0.669
6	0.557	0.615	0.562	0.649	0.561	0.682
7	0.594	0.619	0.581	0.651	0.573	0.686
8	0.597	0.639	0.599	0.685	0.588	0.689
9	0.606	0.641	0.622	0.661	0.593	0.690
10	0.609	0.642	0.637	0.663	0.647	0.691
11	0.617	0.652	0.639	0.667	0.671	0.691
12	0.619	0.657	0.640	0.679	0.684	
13	0.634	0.661	0.642	0.684	0.689	
14	0.641	0.667	0.668	0.689	0.690	
15	0.649	0.669	0.682	0.690		
16	0.652	0.672	0.684	0.691		
17	0.655	0.684	0.689			
18	0.657	0.687	0.690			
19	0.661	0.689	0.691			
20	0.668	0.690				
21	0.674	0.691				
22	0.679	0.691				
23	0.686					
24	0.690					
25	0.691					

Tabelle G.4: extreme Verläufe, Frau ohne VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.468	0.523	0.530
2	0.632	0.711	0.722
3	0.704	0.764	0.765
4	0.725	0.782	0.785
5	0.730	0.784	0.791
6	0.767	0.788	0.794
7	0.774	0.792	0.797
8	0.778	0.794	0.799
9	0.779	0.796	
10	0.781	0.797	
11	0.783	0.799	
12	0.785		
13	0.787		
14	0.789		
15	0.790		
16	0.792		
17	0.793		
18	0.796		
19	0.797		
20	0.799		

Tabelle G.5: durch. Verläufe, Haus ohne VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.459	0.486	0.502	0.546	0.512	0.553
2	0.547	0.710	0.704	0.718	0.685	0.766
3	0.610	0.761	0.753	0.774	0.753	0.777
4	0.649	0.765	0.779	0.786	0.782	0.792
5	0.668	0.766	0.780	0.789	0.788	0.798
6	0.762	0.771	0.782	0.793	0.791	0.799
7	0.771	0.777	0.789	0.796	0.795	0.799
8	0.772	0.786	0.791	0.798	0.798	
9	0.775	0.788	0.791	0.798	0.799	
10	0.777	0.789	0.793	0.799		
11	0.778	0.790	0.799			
12	0.783	0.790	0.799			
13	0.784	0.791				
14	0.786	0.792				
15	0.787	0.793				
16	0.788	0.795				
17	0.789	0.796				
18	0.791	0.797				
19	0.794	0.798				
20	0.799	0.799				
21	0.799					

Tabelle G.6: extreme Verläufe, Haus ohne VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.785	0.835	0.840
2	0.786	0.847	0.856
3	0.803	0.654	0.877
4	0.818	0.868	0.887
5	0.820	0.888	0.907
6	0.824	0.891	0.913
7	0.829	0.895	0.921
8	0.841	0.898	0.924
9	0.846	0.913	0.925
10	0.864	0.919	0.925
11	0.865	0.924	
12	0.881	0.925	
13	0.888		
14	0.891		
15	0.903		
16	0.918		
17	0.924		
18	0.924		

Tabelle G.7: durch. Verläufe, Kind ohne VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.776	0.792	0.826	0.845	0.830	0.851
2	0.777	0.793	0.845	0.851	0.837	0.861
3	0.778	0.840	0.846	0.860	0.864	0.890
4	0.786	0.841	0.856	0.888	0.866	0.910
5	0.788	0.842	0.866	0.905	0.896	0.915
6	0.791	0.844	0.870	0.906	0.906	0.920
7	0.792	0.851	0.871	0.918	0.919	0.924
8	0.826	0.852	0.877	0.920	0.922	0.925
9	0.835	0.854	0.905	0.924	0.924	0.925
10	0.856	0.876	0.913	0.925	0.925	
11	0.858	0.877	0.924	0.925		
12	0.877	0.886	0.925			
13	0.884	0.891				
14	0.890	0.892				
15	0.892	0.911				
16	0.917	0.921				
17	0.924	0.924				
18	0.924	0.925				
19	0.924					

Tabelle G.8: extreme Verläufe, Kind ohne VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.150	0.266	0.422
2	0.205	0.442	0.559
3	0.289	0.587	0.623
4	0.359	0.643	0.650
5	0.378	0.651	0.667
6	0.454	0.660	0.688
7	0.499	0.667	0.703
8	0.526	0.676	0.710
9	0.582	0.680	0.716
10	0.607	0.694	0.723
11	0.614	0.707	0.725
12	0.615	0.715	
13	0.644	0.723	
14	0.669	0.725	
15	0.696		
16	0.698		
17	0.701		
18	0.702		
19	0.706		
20	0.720		
21	0.723		
22	0.725		

Tabelle G.9: durch. Verläufe, Stadt ohne VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.050	0.287	0.201	0.343	0.300	0.525
2	0.078	0.349	0.377	0.510	0.476	0.647
3	0.249	0.351	0.505	0.680	0.583	0.689
4	0.260	0.467	0.602	0.691	0.621	0.699
5	0.266	0.485	0.603	0.693	0.637	0.707
6	0.401	0.522	0.604	0.707	0.669	0.714
7	0.453	0.549	0.611	0.715	0.691	0.721
8	0.476	0.581	0.629	0.719	0.693	0.724
9	0.519	0.661	0.637	0.720	0.707	0.724
10	0.538	0.684	0.664	0.722	0.721	0.725
11	0.539	0.689	0.691	0.723	0.725	
12	0.540	0.691	0.707	0.724		
13	0.590	0.693	0.716	0.725		
14	0.609	0.704	0.723	0.725		
15	0.671	0.707	0.725			
16	0.673	0.712				
17	0.675	0.719				
18	0.676	0.721				
19	0.684	0.722				
20	0.719	0.724				
21	0.721	0.725				
22	0.725	0.725				
23	0.725					

Tabelle G.10: extreme Verläufe, Stadt ohne VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.762	0.777	0.786
2	0.774	0.792	0.799
3	0.778	0.810	0.808
4	0.797	0.813	0.815
5	0.804	0.827	0.823
6	0.809	0.829	0.827
7	0.816	0.830	0.830
8	0.819	0.831	0.831
9	0.828		
10	0.829		
11	0.831		

Tabelle G.11: durch. Verläufe, Berge mit VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.762	0.764	0.772	0.783	0.779	0.792
2	0.772	0.778	0.785	0.799	0.791	0.811
3	0.776	0.780	0.802	0.819	0.800	0.819
4	0.792	0.805	0.807	0.822	0.811	0.822
5	0.798	0.808	0.825	0.829	0.819	0.829
6	0.802	0.819	0.829	0.830	0.825	0.830
7	0.807	0.821	0.830	0.831	0.830	0.831
8	0.813	0.824	0.831		0.830	
9	0.825	0.830				
10	0.829	0.831				
11	0.830					
12	0.831					

Tabelle G.12: extreme Verläufe, Berge mit VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.499	0.534	0.561
2	0.584	0.599	0.621
3	0.600	0.624	0.673
4	0.614	0.655	0.679
5	0.637	0.665	0.685
6	0.650	0.675	0.690
7	0.668	0.686	0.691
8	0.675	0.690	0.647
9	0.678	0.691	0.647
10	0.683		0.672
11	0.686		0.682
12	0.688		0.687
13	0.690		0.69
14	0.691		

Tabelle G.13: durch. Verläufe, Frau mit VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.458	0.561	0.485	0.591	0.498	0.606
2	0.557	0.615	0.579	0.635	0.606	0.647
3	0.558	0.654	0.589	0.669	0.667	0.678
4	0.569	0.668	0.628	0.672	0.671	0.684
5	0.616	0.671	0.637	0.681	0.677	0.690
6	0.624	0.678	0.656	0.689	0.685	0.691
7	0.661	0.679	0.679	0.691	0.690	0.691
8	0.668	0.686	0.689	0.691	0.691	
9	0.671	0.689	0.691			
10	0.678	0.690				
11	0.681	0.691				
12	0.685	0.691				
13	0.689					
14	0.690					
15	0.691					

Tabelle G.14: extreme Verläufe, Frau mit VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.705	0.697	0.692
2	0.739	0.778	0.783
3	0.775	0.780	0.789
4	0.777	0.786	0.795
5	0.782	0.791	0.798
6	0.786	0.796	0.798
7	0.791	0.798	0.799
8	0.794	0.799	
9	0.795		
10	0.799		

Tabelle G.15: durch. Verläufe, Haus mit VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.686	0.728	0.684	0.707	0.681	0.701
2	0.718	0.763	0.767	0.788	0.779	0.789
3	0.760	0.786	0.771	0.789	0.786	0.791
4	0.761	0.787	0.782	0.790	0.793	0.798
5	0.764	0.792	0.788	0.796	0.798	0.799
6	0.770	0.796	0.795	0.798	0.798	0.799
7	0.781	0.798	0.798	0.799	0.799	
8	0.786	0.799	0.799			
9	0.791					
10	0.798					
11	0.799					

Tabelle G.16: extreme Verläufe, Haus mit VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.827	0.834	0.844
2	0.850	0.866	0.871
3	0.868	0.885	0.897
4	0.881	0.905	0.909
5	0.892	0.916	0.921
6	0.903	0.923	0.923
7	0.913	0.924	0.925
8	0.920	0.925	
9	0.924		
10	0.925		

Tabelle G.17: durch. Verläufe, Kind mit VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.815	0.839	0.810	0.857	0.830	0.856
2	0.846	0.856	0.852	0.891	0.837	0.891
3	0.856	0.887	0.861	0.906	0.879	0.911
4	0.865	0.892	0.890	0.914	0.891	0.919
5	0.884	0.901	0.911	0.919	0.920	0.924
6	0.899	0.911	0.920	0.925	0.921	0.924
7	0.908	0.919	0.924	0.925	0.925	0.925
8	0.916	0.925	0.925			
9	0.917	0.925				
10	0.924					
11	0.925					

Tabelle G.18: extreme Verläufe, Kind mit VO

Iteration	GB_{g_2}		
	[15 + 105]	[75 + 525]	[150 + 1050]
1	0.404	0.469	0.489
2	0.491	0.598	0.597
3	0.549	0.661	0.640
4	0.598	0.698	0.687
5	0.618	0.708	0.700
6	0.644	0.717	0.717
7	0.686	0.721	0.723
8	0.697	0.725	0.725
9	0.707		
10	0.715		
11	0.720		
12	0.723		
13	0.725		

Tabelle G.19: durch. Verläufe, Stadt mit VO

Iteration	GB_{g_2}					
	[15 + 105]		[75 + 525]		[150 + 1050]	
	min.	max.	min.	max.	min.	max.
1	0.351	0.471	0.412	0.527	0.469	0.526
2	0.417	0.594	0.537	0.641	0.562	0.638
3	0.494	0.647	0.605	0.697	0.594	0.694
4	0.567	0.649	0.681	0.716	0.669	0.716
5	0.581	0.684	0.697	0.721	0.684	0.724
6	0.604	0.696	0.707	0.724	0.711	0.725
7	0.637	0.714	0.716	0.725	0.722	0.725
8	0.668	0.716	0.725	0.725	0.725	
9	0.691	0.717	0.725			
10	0.707	0.724				
11	0.711	0.725				
12	0.714	0.725				
13	0.719					
14	0.724					
15	0.725					

Tabelle G.20: extreme Verläufe, Stadt mit VO

Bildname	GB_{g_2}	EB_{BS}	EB_{VF}	EB_{FV}	EB_{HV}	EB_{RA}	EB_{SV}
Berge	0.105	0.342	0.393	1	0.011	1	0.001
Berge_vop1	0.483	0.318	1	1	0.312	0.999	0.129
Frau	0	0.002	0.792	0	0.551	1	0
Frau_vop1	0.276	0.003	1	0.874	0.661	1	0.341
Haus	0.205	0.122	0.464	1	0.859	0.851	0.002
Haus_vop1	0.447	0.161	1	1	0.938	0.946	0.061
Kind	0	0.501	0.222	1	0	1	0.026
Kind_vop1	0.735	0.443	0.976	1	0.459	0.998	0.675
Stadt	0	0.600	0.4994	0	0.049	1	0
Stadt_vop1	0.216	0.765	1	1	0.923	1	< 0.001

Tabelle G.21: Voroptimierungsphase 1

Anhang H

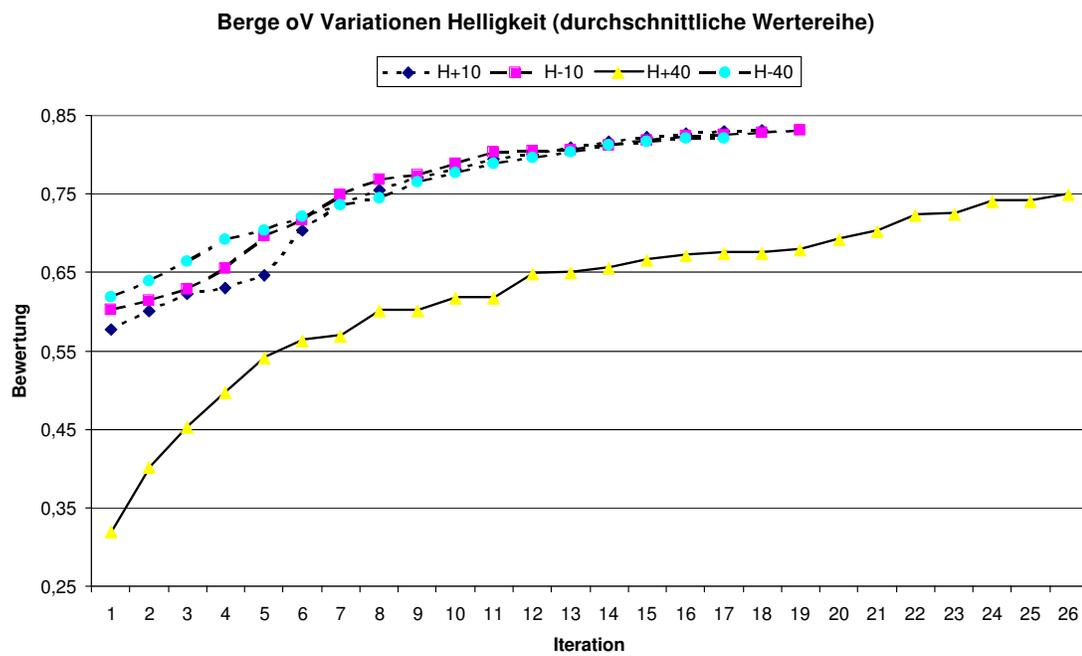


Abbildung H.1: Variationen der Helligkeit

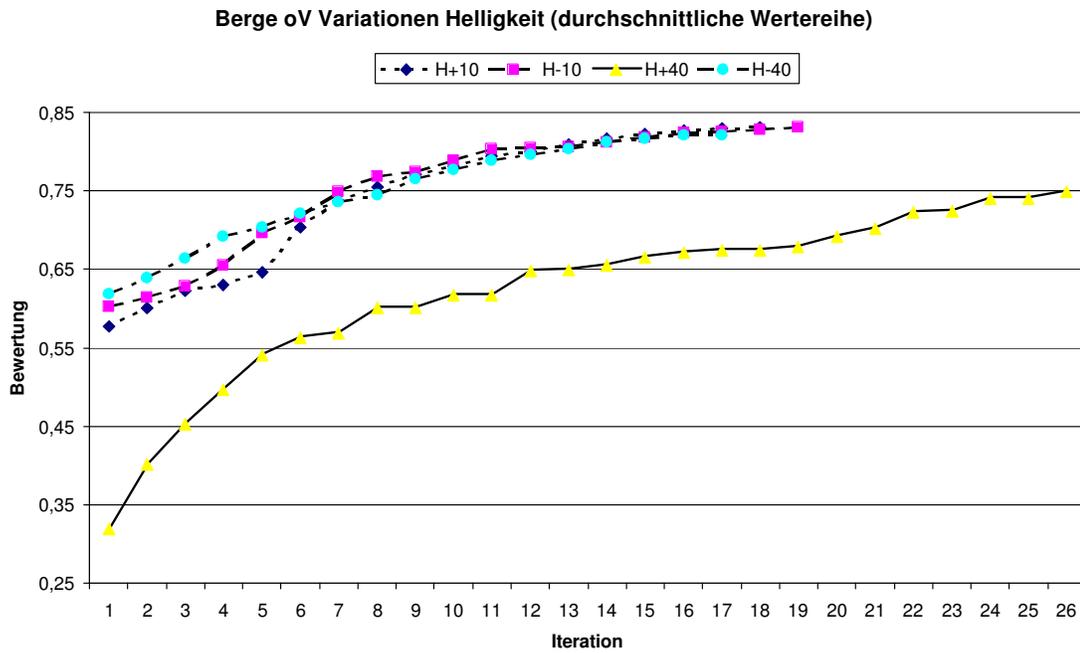


Abbildung H.2: Variationen des Kontrastes

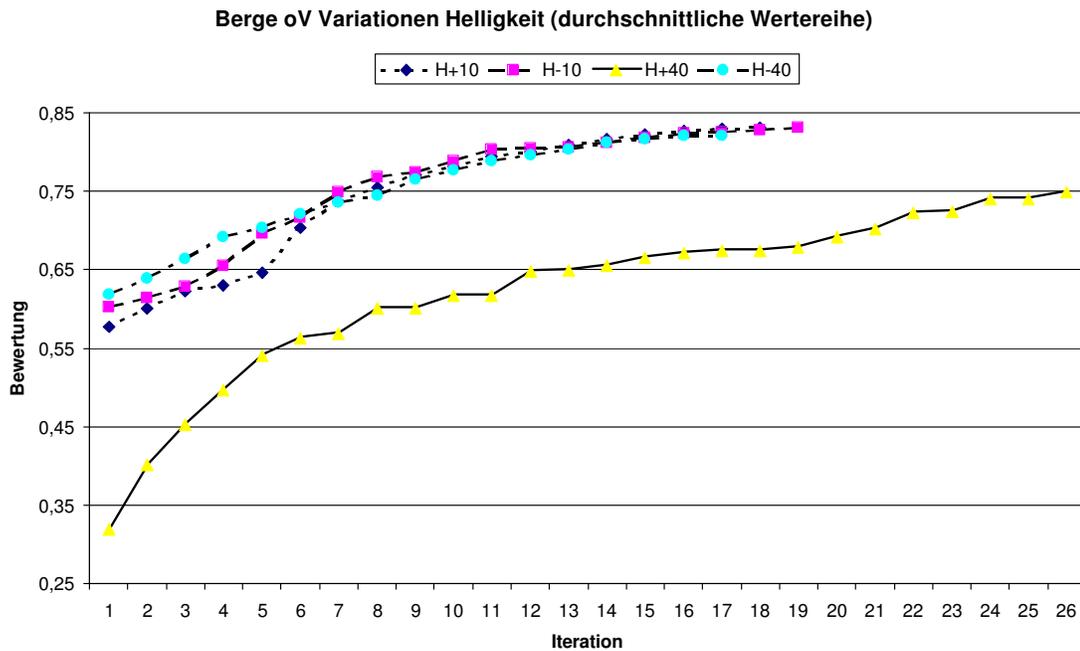


Abbildung H.3: Variationen der Farbbalance

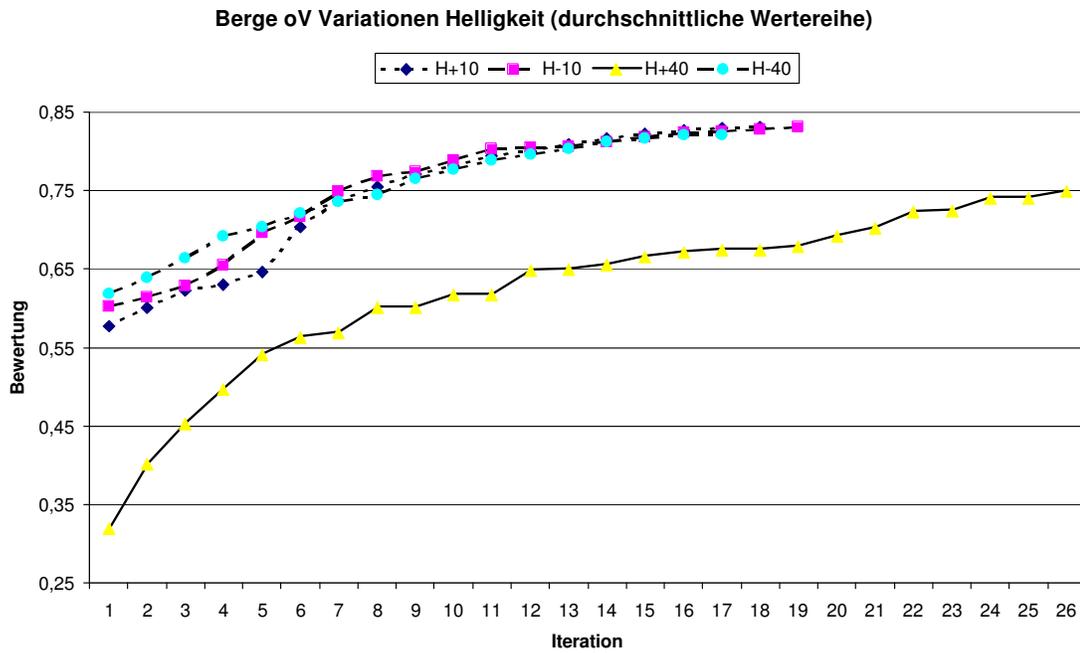


Abbildung H.4: Variationen der Bildschärfe

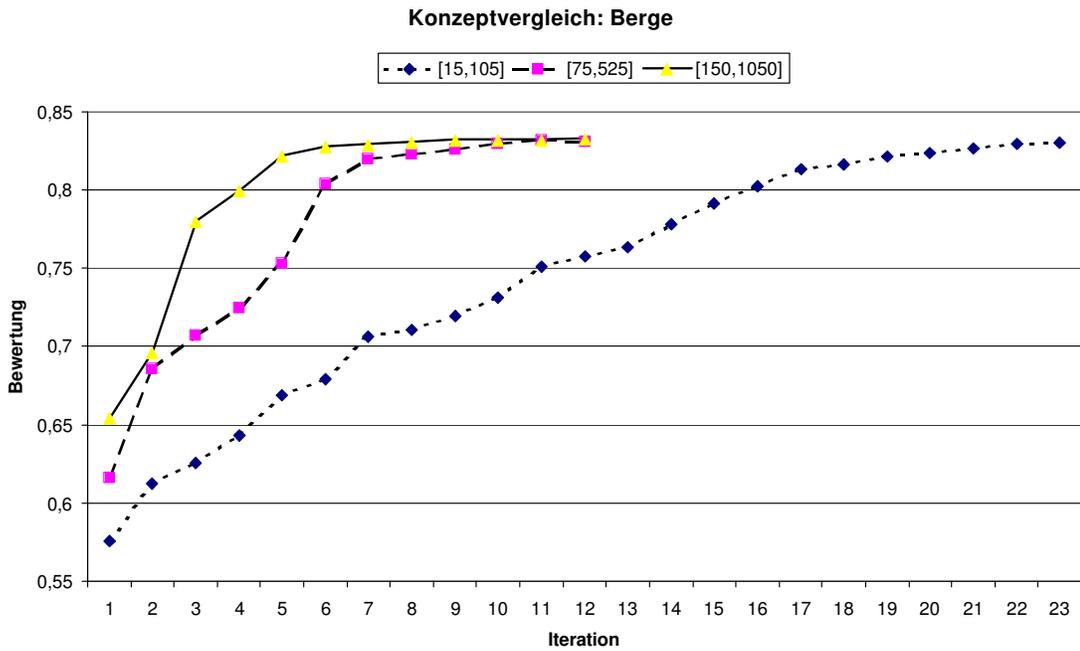


Abbildung H.5: GFO ohne Voroptimierung, "Berge"

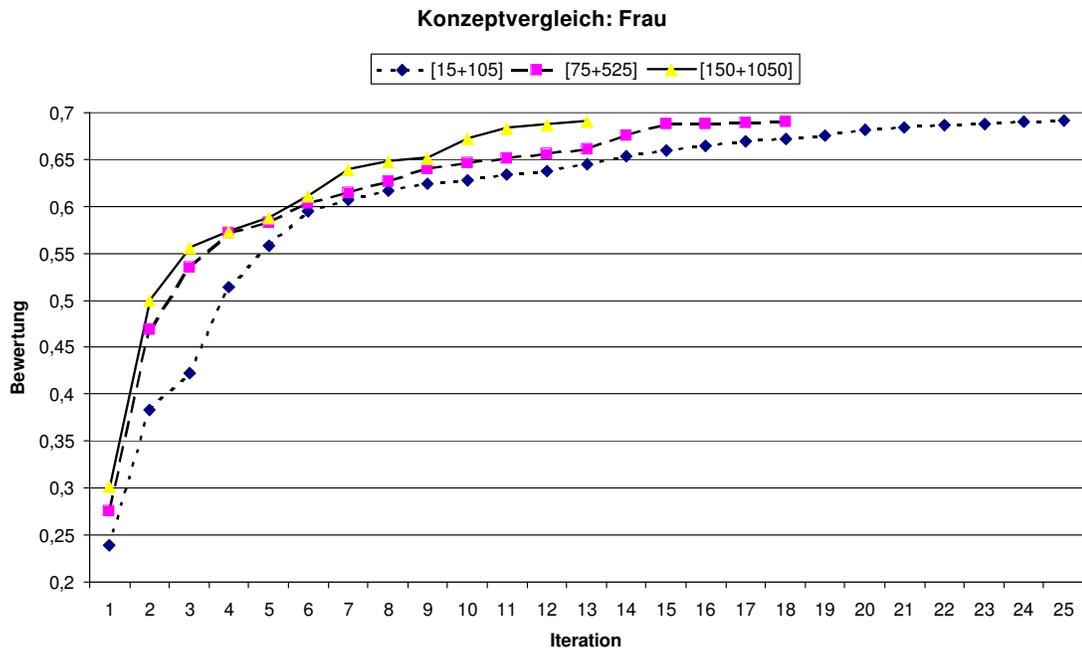


Abbildung H.6: GFO ohne Vorooptimierung, "Frau"

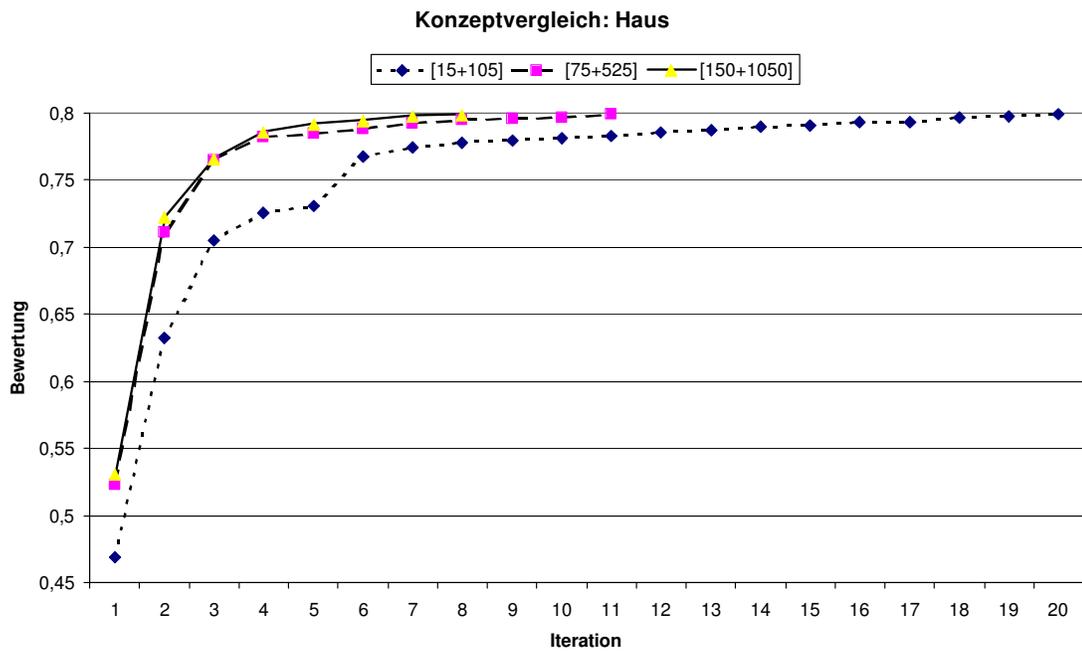


Abbildung H.7: GFO ohne Vorooptimierung, "Haus"

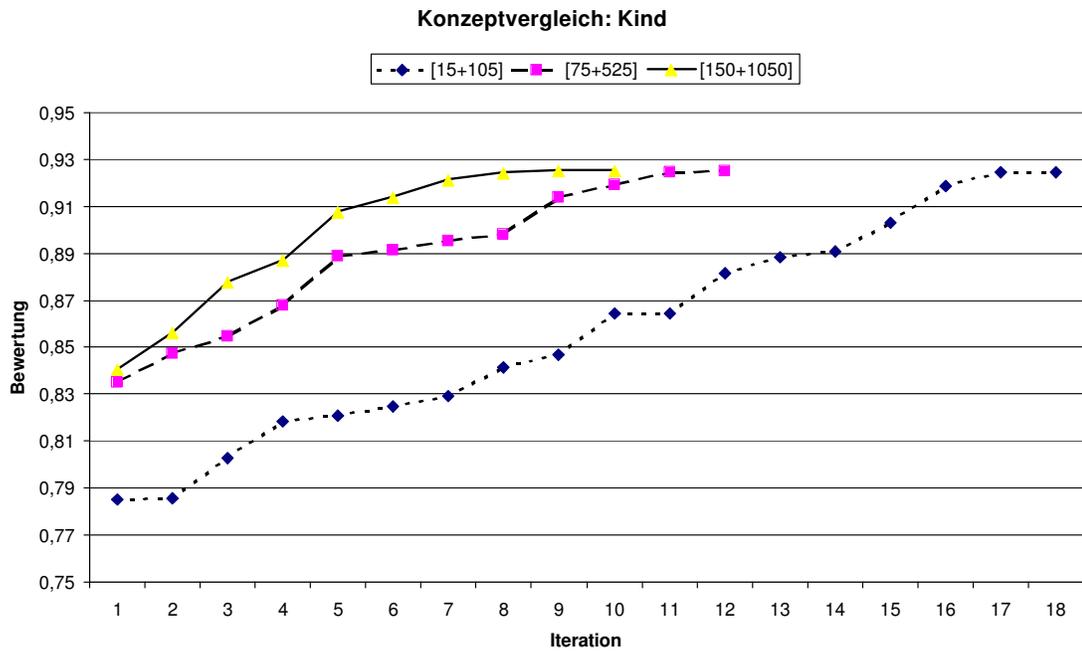


Abbildung H.8: GFO ohne Voroptimierung, "Kind"

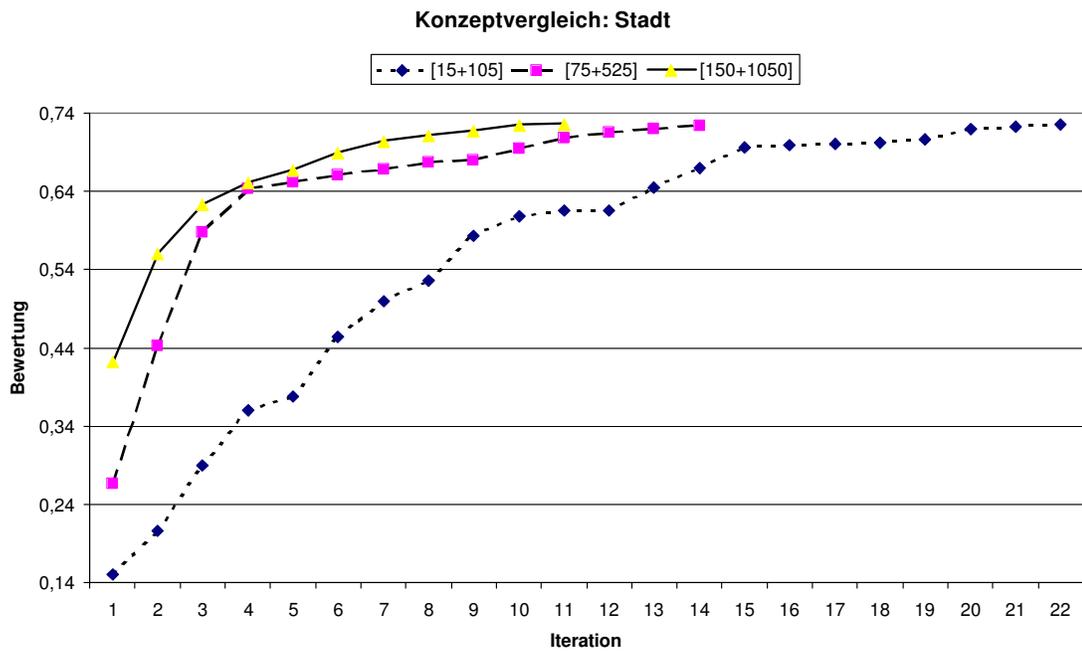


Abbildung H.9: GFO ohne Voroptimierung, "Stadt"

Anhang I



Abbildung I.1: VOP1 "Berge"



incl. VOP1 & VOP2

Abbildung I.2: GFO "Berge"



Abbildung I.3: VOP1 "Frau"



incl. VOP1 & VOP2

Abbildung I.4: GFO "Frau"



Abbildung I.5: VOP1 "Haus"



incl. VOP1 & VOP2

Abbildung I.6: GFO "Haus"



Abbildung I.7: VOP1 "Kind"



incl. VOP1 & VOP2

Abbildung I.8: GFO "Kind"



Abbildung I.9: VOP1 "Stadt"



incl. VOP1 & VOP2

Abbildung I.10: GFO "Stadt"

Literaturverzeichnis

- [Abma94] Wolfgang Abmayr, *Einführung in die digitale Bildverarbeitung* B.G. Teubner 1994
- [Brig92] E.O. Brigham, *FFT - Schnelle Fourier-Transformation*, 5. Auflage, Oldenbourg Verlag 1992
- [Cent97] J.A. Centeno, V. Haertel, *An adaptive image enhancement algorithm*, Ausgabe 30, Pattern Recognition, Seiten 1183-1189, 1997
- [Demy85] V.F. Demyanov, L.V. Vasilev, *Nondifferentiable Optimization*, Optimization Software Inc. 1985
- [Fair98] Mark D. Fairchild, *Color Appearance Models*, Addison Wesley Longman 1998
- [Fiel99] Gary G. Field, *Color and Its Reproduction*, 2nd Edition, GATF Press 1999
- [Gill91] P.E. Gill, W. Murray, M.H. Wright, *Numerical Linear Algebra and Optimization*, Volume 1, Addison-Wesley 1991
- [Habe95] P. Haberäcker, *Praxis der Digitalen Bildverarbeitung und Mustererkennung*, Hanser Verlag 1995
- [Hall79] E. L. Hall, *Computer Image Processing and Recognition*, Academic Press 1979
- [Haus94] Gert Hauske, *Systemtheorie des visuellen Wahrnehmung* B.G. Teubner 1994
- [Heis94] Jochen Heistermann, *Genetische Algorithmen*, Theorie und Praxis evolutionärer Optimierung, B.G. Teubner 1994
- [Hend97] W.R. Hendee, Peter N.T. Wells, *The Perception of Visual Information*, 2nd Edition, Springer Verlag 1997

- [Irte91] Hans Irtel, *Psychophysische Invarianzen in der Farb- und Helligkeitswahrnehmung*, Lehr- und Forschungstexte Psychologie, Springer Verlag 1991
- [Jähn89] Bernd Jähne, *Digitale Bildverarbeitung*, Springer Verlag 1989
- [Jaco00] R. Jacobson, S. Triantaphilidou, *Metric Approaches to Image Quality*, Seiten 58-71, Conference Proceedings, Colour Image Science 2000, University of Derby 2000
- [Keus96] Thomas Keus, *Multispektrale Farbanalyse*, Dissertationsschrift, Shaker Verlag 1996
- [Kinn94] Werner Kinnebrock, *Optimierung mit genetischen und selektiven Algorithmen*, Oldenbourg Verlag 1994
- [Klet92] R. Klette, P. Zamperoni, *Handbuch der Operatoren für die Bildbearbeitung*, Bildtransformation für die digitale Bildverarbeitung, Vieweg 1992
- [Koji91] M. Kojima, N. Megiddo, T. Noma, A. Yoshise, *A Unified Approach to Interior Point Algorithms for Linear Complementarity Problems*, Springer Verlag 1991
- [Krau96] Helmut Kraus, *Scannen, Mit Desktop-Scannern zum perfekten Bild*, Addison-Wesley 1996
- [Levi85] M. Levine, *Vision in Man and Machine*, McGraw-Hill Book Company 1985
- [Mall96] R. Malladi, J.A. Sethian, *A Unified Approach to Noise Removal, Image Enhancement, and Shape Recovery*, Ausgabe 5, IEEE Transactions on image processing, Seiten 1554-1568, 1996
- [Man00] K.F. Man, K.S. Tang, S. Kwong, *Genetic Algorithms, Concepts and Design*, Springer Verlag 2000
- [Mich99] Zbigniew Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, 3rd Edition, Springer Verlag 1999
- [Mogh97] , A. Moghaddamzadeh, N. Bourbakis, *A fuzzy region growing approach for segmentation of color images*, Vol.30, Seiten 867-881, Pattern Recognition 1997
- [Otto96] Thomas Otto, *Spektrale Analyse von Licht mittels Festkörpersensoren*, Habilitationsschrift, Shaker Verlag 1996
- [Pint96] J.D. Pinter, *Global Optimization in Action*, Continuous and Lipschitz Optimization: Algorithms, Implementations and Applications, Kluwer Academic Publishers 1996

- [Pita96] I. Pitas, P. Kiniklis, *Multichannel Techniques in Color Image Enhancement and Modeling*, Ausgabe 5, IEEE Transactions in image processing, Seiten 168-171, 1996
- [Pita00] I. Pitas, *Digital Image Processing Algorithms and Applications*, John Wiley & Sons 2000
- [Plat96] K.N. Plataniotis, D. Androutsos, A.N. Venetsanopoulos, *Fuzzy adaptive filters for multichannel image processing*, Ausgabe 55, Signal Processing, Seiten 96-106, 1996
- [Poet75] D. Poetsch, *Neue Wege zur automatischen Farbkorrektur*, Ausgabe 29, Fernseh- und Kinotechnik, Seiten 309-313, 1975
- [Pola97] E. Polak, *Optimization, Algorithms and Consistent Approximations*, Springer Verlag 1997
- [Pomi96] Torsten Pomierski, *Neurophysiologisch motivierte Architektur zur Erzeugung stabiler Farb- und Texturrepräsentationen*, Dissertationsschrift, Ilmenau 1996
- [Poyn96] Charles A. Poynton, *A Technical Introduction to Digital Video*, John Wiley & Sons 1996
- [Prat91] William K. Pratt, *Digital Image Processing*, 2nd Edition, John Wiley & Sons 1991
- [Rami85] Robert W. Ramirez, *The FFT Fundamentals and Concepts*, Prentice-Hall 1985
- [Reit98] Paula J. Reitan, *3D visualization of color image histograms*, Ausgabe 30, Seiten 2025-2035, Computer Networks and ISDN Systems, 1998
- [Rich81] Manfred Richter, *Einführung in die Farbmeterik*, 2.Auflage, Walter de Gruyter 1981
- [Schl93] K. Schläpfer, *Farbmeterik in der Reproduktionstechnik und im Mehrfarbendruck*, 2.Auflage, UGRA 1993
- [Schl97] K. Schläpfer, *CIE94 - Die neue Farbabstandsformel*, Ausgabe 3/97, UGRA Mitteilungen 1997
- [Schw88] H.R. Schwarz, *Numerische Mathematik*, B.G. Teubner 1988
- [Shli96] R. Schlittgen, *Einführung in die Statistik*, Analyse und Modellierung von Daten, 6.Auflage, Oldenbourg Verlag 1996

- [Shwe87] H.P. Schwefel, *Collective phenomena in evolutionary systems*, Reprints of the Annual Meeting of the International Society of General System Research, Vol.2, Seiten 1025-1033, Budapest 1987
- [Shwe93] H.P. Schwefel, T. Bäck, F.Kursawe, *Natural analoge Verfahren*, Grundlagen und praktischer Einsatz in der Optimierung, Tutorium Universität Dortmund 1993
- [Shyu98] M.S. Shyu, J.J. Leou *A Genetic Algorithm Approach to Color Image Enhancement*, Volume 31, Seiten 871-880, Pattern Recognition 1998
- [Sitt93] P. Sitte, *Horizonte der Biologie*, VCH Verlagsgesellschaft 1993
- [Stok96] M. Stokes, M. Anderson, S. Chandrasekar, R. Motta, *A Standard Default Color Space for Internet - sRGB*, www.w3.org, 1996
- [Stri87] R.N. Strickland, C.S. Kim, W.F. McDonnell, *Digital color image enhancement based on the saturation component*, Vol. 26, Seiten 609-616, Optical Engineering 1987
- [Trit93] Kelvin Tritton, *Colour control in lithography*, Pira International 1993
- [Voge97] Helmut Vogel, *Gerthsen Physik*, 19. Auflage, Springer-Verlag 1997
- [Voic97] L.I. Voicu, H.R. Myler, A.R. Weeks, *Practical considerations on color image enhancement using homomorphic filtering* Ausgabe 6, Journal of Electronic Imaging, Seiten 108-113, 1997
- [Wahl84] Friedrich M. Wahl, *Digitale Bildsignalverarbeitung*, Springer Verlag 1984
- [Witt95] Klaus Witt, *CIE-Empfehlungen zur industriellen Farbabstandsbewertung*, Ausgabe 1/95, Deutsche farbwissenschaftliche Gesellschaft e.V. 1995
- [Wolf98] S.G. Wolf, R. Ginosar, Y.Y. Zeevi, *Spatio-Chromatic Image Enhancement Based on a Model of Human Visual Information Processing* Ausgabe 9, Journal of visual communication and image representation, Seiten 25-37, 1998
- [Wysz82] Günter Wyszecki & W.S. Stiles, *Color Science, Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, 2nd Edition, John Wiley & Sons 1982
- [Yage87] R.R. Yager, S. Ovchinnikov, R.M. Tong, H.T. Nguyen, *Fuzzy Sets and Applications*, Selected Papers by L.A. Zadeh, John Wiley & Sons 1987
- [Zade75] L.A. Zadeh, K.S. Fu, K. Tanaka, M. Shimura, *Fuzzy Sets and their Applications to Cognitive and Decision Processes* Academic Press 1975

[Zuga98] D. Zuga, V. Lattuati, *A new approach of color images segmentation based on fusing region an edge segmentations outputs*, Ausgabe 31, Pattern Recognition, Seiten 105-113, 1998

Lebenslauf

Name: Blei
Vorname: Andreas Stefan
Akademischer Grad: Dipl.-Math.

Geburtsdatum: 11. Dezember 1967
Geburtsort: Opladen

Schulabschluss: Abitur (20. Mai 1987) an der Werner-Heisenberg-Schule
Städtisches Gymnasium in Leverkusen-Lützenkirchen

Dienstzeit: 01. September 1987 bis 30. April 1989 beim
Arbeiter-Samariter Bund in Burscheid

Studium: Vom 01. Oktober 1989 bis 04. Juni 1996 im
Diplomstudium der angewandten Mathematik
an Bergischen Universität Wuppertal

Promotion: Vom 01. September 1997 bis 14. Mai 2002 im
Ingenieursstudiumgang Kommunikationstechnologie - Druck
an der Bergischen Universität Wuppertal
im Rahmen einer Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter

Beruf: Seit 10. Juni 2002 bei Gottwald Port Technology in Düsseldorf
Softwareentwickler im Bereich Steuerung und Logistik