

André Hoffmann

Systematische Erforschung der Farbentstehung an menschlichen Zähnen

André Hoffmann

**Systematische Erforschung
der Farbentstehung
an menschlichen Zähnen**

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie, detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar

© 2000-2003 André Hoffmann, Dammweg 16, 46535 Dinslaken

© 2003 André Hoffmann, Dammweg 16, 46535 Dinslaken

© 2004 André Hoffmann, Dammweg 16, 46535 Dinslaken

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch die des Nachdruckes, der Wiedergabe in jeder Form und der Übersetzung in andere Sprachen behalten sich Urheber und Verleger vor. Jede Verwertung – auch nur auszugsweise Verwertung – und jegliche Form der Wiedergabe außerhalb der engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes ist ohne Zustimmung und schriftliche Genehmigung des Verlages bzw. des Urhebers unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Übersetzungen, Vervielfältigung, Verarbeitung, Abschrift, Entnahme, systematische Auswertung, Verbreitung, Vortrag, Funk, Fernsehsendung, Telefonübertragung, den fotomechanischen Weg (Fotokopie, Mikrokopie), Magnettonverfahren, Mikroverfilmung, Einspeicherung und Verarbeitung in oder mit elektronischen bzw. mechanischen Systemen. Dies betrifft das Werk sowie Teile daraus, Abbildungen und Tabellen.

Die in diesem Werk ohne besondere Kennzeichnung aufgeführten Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. berechtigt nicht zu der Annahme, daß solche Namen ohne Weiteres von jedem benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich häufig um gesetzlich geschützte Warenzeichen handeln.

Um den Textfluß nicht zu stören, wurde stets die grammatikalisch männliche Form gewählt. Selbstverständlich sind in diesen Fällen immer Frauen und Männer gemeint.

Die Erkenntnisse in Medizin bzw. Zahnmedizin unterliegen einem laufenden Fortschritt durch Forschung und Erfahrungen. Autor und Verlag dieses Werkes haben große Sorgfalt walten lassen, daß die in diesem Werk gemachten therapeutischen Angaben (insbesondere hinsichtlich Indikation, Dosierung und unerwünschte Wirkungen) dem derzeitigen Wissensstand entsprechen. Das entbindet den Leser bzw. Nutzer dieses Buches aber nicht von der Verpflichtung, anhand der Beipackzettel zu verschreibende Präparate eigenverantwortlich zu überprüfen, ob die dort gemachten Angaben von denen in diesem Buch abweichen und eigenverantwortlich seine Verordnung zu treffen. Die Entscheidung für oder gegen eine bestimmte Therapie liegt alleine in der Verantwortlichkeit des Behandlers.

Lizenzvertrag. Mit dem Erwerb oder dem Erhalten dieses Werkes sind Sie einen Lizenzvertrag eingegangen, der Ihnen ein nicht exklusives Nutzungsrecht (Lesen) des erworbenen Produktes einräumt. Eine Weitergabe, der Verleih bzw. ein Ausleihen dieses Werkes oder Teilen hieraus in welcher Form und über welchen Weg auch immer an Dritte ist nicht erlaubt. Die Inhalte und Zahlen werden ausschließlich unter dieser Lizenz veräußert bzw. herausgegeben. Hiernach ist eine systematische Auswertung der Zahlen nicht erlaubt. Ebenso wenig ist die ungesicherte bzw. öffentliche Aufbewahrung, die Gewährung des unbeaufsichtigten Zugangs durch Dritte sowie eine unbeaufsichtigte Bereitstellung/Nutzung in Bibliotheken nicht gestattet. Verstöße gegen diese Lizenzvereinbarung können Schadensersatzansprüche zur Folge haben.

Um vielfach den Textfluß nicht zu stören, wurde in Klammern lediglich der Erstautor mit Veröffentlichungsdatum benannt und von der Erwähnung des Zweitautors und/oder weiterer Autoren (et al.) zu Gunsten der Übersichtlichkeit und Einheitlichkeit abgesehen.

Erst durch die vernetzende Betrachtung der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen, Hauptstudien und Nachuntersuchungen sowie aufgrund der Methodikdesigns und Auswahl der Systeme war es innerhalb dieses Forschungsprojektes möglich geworden, eine ganze Reihe von Phänomenen und Effekten, Wirkungen, Störgrößen und Einflußfaktoren zu erkunden und zu quantifizieren sowie zu analysieren und einer isolierten Betrachtung zu unterziehen, deren Ursachen und Grundlagen und diejenigen von jenen auftretenden Phänomenen und Effekten zu klären und zu erklären (Grundlagenforschung) und mehrere neue Theorien aufzustellen, zu begründen und zu beweisen.

Erstmalig wurde zudem der Beweis einer Relation zwischen Flüssigkeitsgehalt und Farbgebung von Zähnen erbracht. Die hier geknüpfte Beziehung zwischen dem Flüssigkeitsgehalt und der Farbe des Zahnes in Zusammenhang mit dem Zeitfaktor der Flüssigkeitsaufnahme- sowie der Flüssigkeitsabgabechronologie bildet die Grundlage für das hier vorgestellte Verfahren zur Todeszeitbestimmung.

Mit seiner Vielzahl an Ergebnissen besitzt dieses Werk Relevanz für die zahnärztliche visuelle und metrische Zahnfarbestimmung in praxi und in der Wissenschaft, für das strukturbio-logische und dentalphysiologische Verständnis von Naturwissenschaftlern, für die medizinische und rechtsmedizinische Farberfassung, für die Industrie, für die Forschung zur Weiterentwicklung neuartiger Farbmeßapparaturen und Zahnfarbringe, für die Sicherheitsbranche (Biometrie, dentaler Fingerabdruck) und nicht zuletzt auch für einen jeden Anwender von Farbmeßinstrumenten und Farbinteressierten.

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Literaturübersicht	4
2.1	Flüssigkeit und Zähne	4
2.2	Historische und wissenschaftliche Grundlagen der Farblehre und -metrik – höhere Farbmatrik	9
2.3	Zahnmedizin und Farbmatrik	28
3.	Material und Methodik	45
3.1	Verwendete Zähne	47
3.2	Instrumente und Apparaturen	47
3.2.1	Surveymaster/Protimeter Moisture Measurement System (Protimeter)	47
3.2.1.1	Technische Daten	47
3.2.2	Elektronisches Hygro-Thermometer (Thies Klima)	47
3.2.3	Spekto-pen (DR. LANGE)	48
3.2.3.1	Technische Daten	48
3.2.4	Spektraldensitometer 528 (X-Rite)	48
3.2.4.1	Technische Daten	49
3.2.5	Chroma-Meter CR-300 (Minolta)	49
3.2.5.1	Technische Daten	49
3.2.5.2	Weißreflektor CR-A43 für das Chroma-Meter CR-300 (Minolta)	50
3.2.6	Spektralphotometer CM-503c (Minolta)	50
3.2.6.1	Meßprinzip, Beleuchtungs- und Betrachtungssystem	50
3.2.6.2	Blockdiagramm	51
3.2.6.3	Ablauf einer Messung	52
3.2.6.4	Vormessung	52
3.2.6.5	Technische Daten	52
3.2.6.6	Kalibrierstandard CM-A82 für das Spektralphotometer CM-503c (Minolta)	53
3.2.7	Spektralphotometer CM-503i (Minolta)	54
3.2.7.1	Meßprinzip, Beleuchtungs- und Betrachtungssystem	54
3.2.7.2	Blockdiagramm	55
3.2.7.3	Ablauf einer Messung	55
3.2.7.4	Vormessung	56
3.2.7.5	Technische Daten	56
3.2.7.6	Kalibrierstandard CM-A21 für das Spektralphotometer CM-503i (Minolta)	57
3.2.7.7	Meßgerätehalterung CM-A3 (Minolta)	57
3.2.8	Mikroskopisches Chromameter CR-241 (Minolta)	57
3.2.8.1	Technische Daten	57
3.2.8.2	Weißreflektor CR-A43 (Minolta)	57
3.2.9	Farbringe (VITAPAN classical, VITA 3D-MASTER)	58
3.2.10	Flüssigkeitsmeßgerät MA100/Sartorius Moisture Analyzer (Sartorius)	58
3.2.10.1	Technische Daten	59
3.2.11	Mikrowaage MC21S (Sartorius)	60
3.2.11.1	Technische Daten	61
3.2.12	Mikrowaage MC5 (Sartorius)	61

3.2.12.1	Technische Daten	61
3.2.13	PJC/CVL 3 Pantone® Lichtkabine (JUST NORMLICHT)	61
3.2.13.1	Technische Daten	61
3.2.14	CC/FS 2-AY-2/36 Farbprüfleuchte (JUST NORMLICHT)	62
3.2.14.1	Technische Daten	62
3.3	Meßvorrichtung und Versuchsaufbau	62
3.4	Umgebungsbedingungen	65
3.5	Meßgrößen, Normlicht, Weißabgleich	65
3.6	Statistik	66
3.7	Legende der Farbcodierungen	68
4.	Voruntersuchungen (Material- und Methodenfindung)	69
4.1	Einleitung zu den Voruntersuchungen: In-vivo- und In-vitro-Testung von Spektralphotometern verschiedener Hersteller und die Suche nach einem geeigneten Feuchtigkeitsmeßgerät	69
4.2	Art der Voruntersuchungen	71
	– Gewichtsmessungen an Zähnen während der De- und Rehydrierung	
	– Reihennmessungen an planem Versuchskörper und am Zahn	
	– Messungen an planem Körper und an Zähnen vor und nach Positionierung und Reponierungen der Meßinstrumentarien freihand	
	– Messungen an planem Körper sowie an Zähnen vor und nach Positionierung und Reponierungen der Meßinstrumentarien innerhalb ihrer Stativaufhängung	
	– Messungen an Zähnen vor und nach Positionierung und Reponierungen des Silikonklotzes (Patrize) in der Basismatrize	
	– Messungen vor und nach Positionierung und Reponierungen des Zahnes im Silikonklotz	
	– Reihennmessungen an Zähnen vor und nach gerichteter Objektverschiebung unter dem Meßgerät	
	– Parallelverschiebung der Meßfläche entlang der Zahn längsachse	
	– Verschiebung der Meßfläche senkrecht zur Zahn längsachse	
	– Schärfetest mit dem mikroskopischen Chromameter	
	– Farbringanalyse von VITAPAN classical und VITAPAN 3D-MASTER	
	– Farbmessungen vor und nach forcierter Temperaturbehandlung von Zähnen	
	– Rehydrierungsversuche	
4.3	Ergebnisse der Voruntersuchungen (Material- und Methodenfindung)	72
4.3.1	Gewichtsentwicklung während des De- und Rehydrierungsprozesses	72
4.3.2	Messung der L*-, a*-, b*-Werte mit den Spektralphotometern CM-503c, CM-503i und dem mikroskopischen Chromameter an gekrümmter Zahnfläche – ein Meßgerätevergleich	72
4.3.3	Auswirkung einer definierten und gerichteten Verschiebungen des Objektes unter der Meßapparatur	73
4.3.4	Auswirkung einer definierten und gerichteten Verschiebungen des Objektes unter dem mikroskopischen Chromameter	74
4.3.5	Auswirkung einer definierten und gerichteten Verschiebung des Zahnes im Sinne einer Näherung (–) bzw. Entfernung (+) des Objektes aus der optimalen Objekt-Objektiv-Einstellung unter dem mikroskopischen Chromameter	76
4.3.6	Reihennmessungen und Reponierungsversuche	77

4.3.6.1	L*-Wertereihenmessung mit und ohne Reponierungen der Farbmeßgeräte, des Fixiermassensystems und des Zahnes unter den Farbmeßapparaturen	79
4.3.6.2	a*-Wertereihenmessung mit und ohne Reponierungen der Farbmeßgeräte, des Fixiermassensystems und des Zahnes unter den Farbmeßapparaturen	80
4.3.6.3	b*-Wertereihenmessung mit und ohne Reponierungen der Farbmeßgeräte, des Fixiermassensystems und des Zahnes unter den Farbmeßapparaturen	81
4.3.6.4	C*-Wertereihenmessung mit und ohne Reponierungen der Farbmeßgeräte, des Fixiermassensystems und des Zahnes unter den Farbmeßapparaturen	82
4.3.6.5	h-Wertereihenmessung mit und ohne Reponierungen der Farbmeßgeräte, des Fixiermassensystems und des Zahnes unter den Farbmeßapparaturen	83
4.3.7	Analyse der VITAPAN classical- und VITAPAN 3D-MASTER-Farbringe mit Hilfe der Spektralphotometer CM-503c, CM-503i und dem mikroskopischen Chromameter CR241	84
4.3.7.1	Methodik zur Farbringanalyse	84
4.3.7.2	Ergebnisse der Analyse des VITAPAN classical-Farbringes	85
4.3.7.3	Ergebnisse der Analyse des VITAPAN 3D-MASTER-Farbringes	86
4.3.8	Zahncharakteristische Spektralkurven	88
4.3.9	Farbmessung vor und nach Dehydrierung	89
4.3.10	Rehydrierung völlig trockener Zähne	89
4.3.10.1	Material und Methode	89
4.3.10.2	Ergebnisse	90
4.3.11	Rehydrierung völlig luftgetrockneter Zähne	91
4.3.11.1	Material und Methode	91
4.3.11.2	Ergebnisse	91

5. Hauptstudien dieser Arbeit 92

5.1	Erfassung der Farbdifferenz zwischen flüssigkeitsgesättigten und trockenen Zähnen in Relation zum ihrem Flüssigkeitsgehalt	92
5.1.1	Material und Methodik	92
5.1.2	Ergebnisse	93
5.1.2.1	Ergebnisse der L*-Wertemessung vor und nach Dehydrierungsprozeß	93
5.1.2.2	Ergebnisse der a*-Wertemessung vor und nach Dehydrierungsprozeß	94
5.1.2.3	Ergebnisse der b*-Wertemessung vor und nach Dehydrierungsprozeß	95
5.1.2.4	Ergebnisse der Metamerie-Indizes vor und nach dem Dehydrierungsprozeß	97
5.1.2.5	Zahnfarbraum vor und nach Dehydrierungsprozeß, gemessen mit dem Spektralphotometer CM-503c	98
5.1.2.6	Zahnfarbraum vor und nach Dehydrierungsprozeß, gemessen mit dem Spektralphotometer CM-503i	98
5.1.2.7	Zahnfarbraum vor und nach Dehydrierungsprozeß, gemessen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241	98
5.1.2.8	Subjektive Bestimmung der Zahnfarbe vor und nach Dehydrierung	99
5.1.2.9	Gewicht vor und nach Dehydrierungsprozeß	102
5.1.2.10	Gewichtsverlust während des Dehydrierungsprozesses	103

5.2	Farberfassung einer beschleunigten Trocknungschronologie	104
5.2.1	Material und Methodik	104
5.2.2	Ergebnisse	105
5.2.2.1	Spektralkurven des Spektralphotometers CM-503c von nassen und trockenen Zähnen.	105
5.2.2.2	Beschleunigte Dehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503c	106
5.2.2.3	Beschleunigte Dehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503c	107
5.2.2.4	Beschleunigte Dehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503c	108
5.2.2.5	Beschleunigte Dehydrierung – C*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503c	109
5.2.2.6	Beschleunigte Dehydrierung – h-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503c	110
5.2.2.7	Spektralkurven des Spektralphotometer CM-503i von nassen und trockenen Zähnen	111
5.2.2.8	Beschleunigte Dehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503i	112
5.2.2.9	Beschleunigte Dehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503i	113
5.2.2.10	Beschleunigte Dehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503i	114
5.2.2.11	Beschleunigte Dehydrierung – C*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503i	115
5.2.2.12	Beschleunigte Dehydrierung – h-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM503i	116
5.2.3	Thermogravimetrie	117
5.2.3.1	Ergebnisse der Thermogravimetrie	117
5.2.4.	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die L*a*b*C*h-Werte zu definierten Zeitpunkten der beschleunigten Dehydrierung	117
5.2.4.1	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die L*-Werte zur Zeit 0 der beschleunigten Dehydrierung	118
5.2.4.2	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die a*-Werte zur Zeit 0 der beschleunigten Dehydrierung	119
5.2.4.3	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die b*-Werte zur Zeit 0 der beschleunigten Dehydrierung	120
5.2.4.4	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die C*-Werte	121
5.2.4.5	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die h*-Werte zur Zeit 0 der beschleunigten Dehydrierung	122
5.2.4.6	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die L*-Werte nach 10 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	123
5.2.4.7	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die a*-Werte nach 10 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	124

5.2.4.8	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die b^* -Werte nach 10 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	125
5.2.4.9	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die C^* -Werte nach 10 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	126
5.2.4.10	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die h -Werte nach 10 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	127
5.2.4.11	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die L^* -Werte nach 20 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	128
5.2.4.12	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die a^* -Werte nach 20 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	129
5.2.4.13	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die b^* -Werte nach 20 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	130
5.2.4.14	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die C^* -Werte nach 20 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	131
5.2.4.15	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die h -Werte nach 20 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	132
5.2.4.16	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die L^* -Werte nach 90 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	133
5.2.4.17	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die a^* -Werte nach 90 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	134
5.2.4.18	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die b^* -Werte nach 90 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	135
5.2.4.19	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die C^* -Werte nach 90 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	136
5.2.4.20	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die h -Werte nach 90 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	137
5.2.4.21	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die L^* -Werte nach 161 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	138
5.2.4.22	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die a^* -Werte nach 161 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	139
5.2.4.23	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die b^* -Werte nach 161 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	140
5.2.4.24	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die C^* -Werte nach 161 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	141

5.2.4.25	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die h-Werte nach 161 Minuten des beschleunigten Dehydrierung	142
5.2.4.26	Meßgerätevergleich	143
5.2.4.27	Vergleich der Spektralkurven des Spektralphotometers CM-503c mit denen des Spektralphotometers CM-503i vor und nach Dehydrierung	144
5.2.4.28	Veränderung des Zahnfarbraumes des Spektralphotometers CM-503c mit der Dehydrierungszeit	145
5.2.4.29	Veränderung des Zahnfarbraumes des Spektrophotometers CM-503i mit der Dehydrierungszeit	145
5.2.4.30	Farbräume von nassen und trockenen Zähnen des Spektrophotometers CM-503c und des CM-503i im direkten Vergleich.	146
5.2.5	Ergebnisse der Subjektiven visuellen Farbbewertung	147
5.2.5.1	Methodik zur Auswertung der subjektiven Ergebnisse und zu vergleichenden Untersuchungen	147
5.2.5.2	Vergleich der während des Dehydrierungsprozesses subjektiv erfaßten Farbringproben der VITAPAN classical- und -3D-MASTER-Zahnfarbringe anhand der VITA-Farbmaßzahlen	147
5.2.5.3	Dehydrierungsprozeß – Die subjektive Bestimmung der Zahnfarben mit dem VITAPAN classical- und VITAPAN-3D-MASTER-Farbring in den $L^*a^*b^*$ -Werten der Farbringanalysen der Vorstudie mit Hilfe des Spektralphotometers CM-503c und CM-503i	148
5.2.5.4	Dehydrierungsprozeß – Die subjektive Bestimmung der Zahnfarben mit dem VITAPAN classical- und VITAPAN-3D-MASTER-Farbring in den $L^*a^*b^*$ -Werten der Farbringanalysen der Vorstudie mit Hilfe des mikroskopischen Chromameters CR-241 (0,3 mm)	148
5.2.5.5	Vergleich der subjektiv über Farbringmuster erfaßten $L^*a^*b^*$ -Werte mit apparativ gemessenen Ergebnissen	149
5.2.5.6	Indirekter Meßgerätevergleich anhand der im Dehydrierungsprozeß gewählten Vergleichsproben des VITAPAN classical- und des VITAPAN 3D-MASTER-Farbringes	150
5.3	Farbmetrische Erfassung der Flüssigkeitsabgabe und Aufnahmechronologie luftgetrockneter Zähne	151
5.3.1	Material und Methodik	151
5.3.2	Ergebnisse	152
5.3.2.1	Einfluß von De- und Rehydrierungsprozessen auf die Spektralkurven des Spektralphotometers CM-503c	152
5.3.2.2	De- und Rehydrierung – L^* -Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503c	153
5.3.2.3	De- und Rehydrierung – a^* -Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503c	154
5.3.2.4	De- und Rehydrierung – b^* -Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503c	156
5.3.2.5	De- und Rehydrierung – C^* -Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c	157
5.3.2.6	De- und Rehydrierung – h-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503c	158
5.3.2.7	Einfluß von De- und Rehydrierungsprozessen auf die Spektralkurven des Spektralphotometers CM-503i	160

5.3.2.8	De- und Rehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503i	161
5.3.2.9	De- und Rehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503i	162
5.3.2.10	De- und Rehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503i	163
5.3.2.11	De- und Rehydrierung – C*-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503i	164
5.3.2.12	De- und Rehydrierung – h-Wertemessungen mit dem Spektralphotometer CM-503i	166
5.3.2.13	De- und Rehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 0,3mm Durchmesser	167
5.3.2.14	De- und Rehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 0,3mm Durchmesser	168
5.3.2.15	De- und Rehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 0,3mm Durchmesser	169
5.3.2.16	De- und Rehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 1,8mm Durchmesser	170
5.3.2.17	De- und Rehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 1,8mm Durchmesser	172
5.3.2.18	De- und Rehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 1,8mm Durchmesser	173
5.3.3	Gewichtsentwicklung während des De- und Rehydrierungsprozesses	174
5.3.4	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Farbmeßergebnisse	175
5.3.4.1	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der L*-Werte zum Zeitpunkt 0 des Dehydrierungsprozesses am feuchten Zahn	176
5.3.4.2	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der a*-Werte zum Zeitpunkt 0 des Dehydrierungsprozesses am feuchten Zahn	177
5.3.4.3	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der b*-Werte zum Zeitpunkt 0 des Dehydrierungsprozesses am feuchten Zahn	178
5.3.4.4	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der C*-Werte zum Zeitpunkt 0 des Dehydrierungsprozesses am feuchten Zahn	179
5.3.4.5	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung bzw. der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der h-Werte zum Zeitpunkt 0 des Dehydrierungsprozesses am feuchten Zahn	180

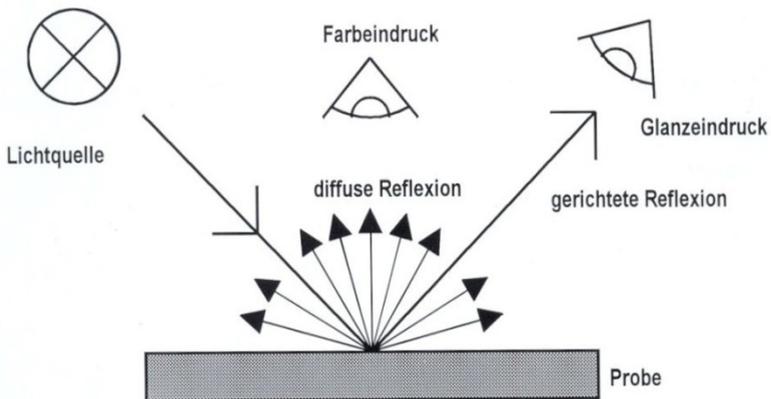
5.3.4.6	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der L*-Werte nach einstündiger Lufttrocknung	181
5.3.4.7	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der a*-Werte nach einstündiger Lufttrocknung	182
5.3.4.8	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der b*-Werte nach einstündiger Lufttrocknung	183
5.3.4.9	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der C*-Werte nach einstündiger Lufttrocknung	184
5.3.4.10	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse h-Werte nach einstündiger Lufttrocknung	185
5.3.4.11	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der L*-Werte nach 3-stündiger Lufttrocknung	186
5.3.4.12	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der a*-Werte nach 3-stündiger Lufttrocknung	187
5.3.4.13	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der b*-Werte nach 3-stündiger Lufttrocknung	188
5.3.4.14	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der C*-Werte nach 3-stündiger Lufttrocknung	189
5.3.4.15	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der h-Werte nach 3-stündiger Lufttrocknung	190
5.3.4.16	Einfluß des Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der L*-Werte nach einstündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	191
5.3.4.17	Einfluß des Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der a*-Werte nach einstündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	192
5.3.4..18	Einfluß des Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der b*-Werte nach einstündiger	

	Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	193
5.3.4.19	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der C*-Werte nach einstündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	194
5.3.4.20	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der h-Werte nach einstündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	195
5.3.4.21	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der L*-Werte nach 3-stündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	196
5.3.4.22	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der a*-Werte nach 3-stündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	197
5.3.4.23	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der b*-Werte nach 3-stündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	198
5.3.4.24	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die C*-Werte Ergebnisse nach 3-stündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	199
5.3.4.25	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der h-Werte nach 3-stündiger Lagerung des Zahnes in Wasser innerhalb des Rehydrierungsprozesses	200
5.3.4.26	Vergleich der Spektralkurven der Spektralphotometer CM-503c und CM-503i.	201
5.3.4.27	Vergleich der Meßgeräte anhand der L*-, a*-, b*-, C*-, h-Werteentwicklung innerhalb des De- und Rehydrierungsprozesses	203
5.3.4.28	Gegenüberstellung der mit den Spektralphotometern CM-503c und CM-503i sowie mit dem mikroskopischen Chromameter erstellten Zahnfarbräume	204
5.3.5	Subjektive Farbringbestimmung	208
5.3.5.1	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in den L*-, a*-, b*-Werten der Fa. VITA innerhalb des De- und Rehydrierungsprozesses	208
5.3.5.2	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in den L*-, a*-, b*-Werten des Spektralphotometers CM-503c	209
5.3.5.3	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in den L*-, a*-, b*-Werten des Spektralphotometers CM-503i	210
5.3.5.4	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in den L*-, a*-, b*-Werten des mikroskopischen Chromameters CR-241	211
5.3.5.5	Vergleich der L*- Farbwertergebnisse der subjektiven Farbbewertungsmethodiken mit den Resultaten der objektiven Messungen	212
5.3.5.6	Vergleich der a*- Farbwertergebnisse der subjektiven Farbbewertungsmethodiken mit den Resultaten der objektiven Messungen	213

5.3.5.7	Vergleich der b*- Farbwertergebnisse der subjektiven Farbbewertungsmethodiken mit den Resultaten der objektiven Messungen	214
5.3.5.8	Die Subjektiv-visuelle Zahnfarbbestimmung in den L*a*b*-Werten der Farbmeßapparaturen und der Fa. VITA	215
6.	Nachuntersuchungen	217
6.1	Langzeitmessungen des Gewichtes – Lufttrocknung	218
6.2	Farbmessungen an der vestibulären Seite der Zahnkrone. – Langzeitmessungen	218
6.3	Farbmessungen an der Inzisalkante der Zahnkrone	226
6.4	Farbmessungen an der approximalen Seite der Zahnkrone	226
6.5	Farbmessungen an der Palatinalseite der Zahnkrone	227
6.6	Farbmessungen an der Wurzel des Zahnes	227
6.7	Erstes Resümee aus den Langzeituntersuchungen	228
7.	Diskussion	228
8.	Zusammenfassung	249
9.	Summary	253
10.	Literaturverzeichnis	257
12.	Anhang	285



Versuchsanordnung von links nach rechts: Mikrowaage MC21S, Sartorius Moisture Analyzer MA100, Lichtkabine, Farbprüfleuchte (oben), Spektralphotometer CM503i, Spektralphotometer CM503c und mikroskopisches Chromameter CR-241.



Die Farbe eines nicht-selbstleuchtenden Körpers entsteht durch die von ihm reflektierten Spektralanteile des auf ihn einstrahlenden Lichts. Die Reflexion kann diffus und ungerichtet oder gerichtet im Sinne einer Spiegelreflexion erfolgen (s. hierzu die Einleitung; Bildquelle: Dr. LANGE 1998).

1. Einleitung

Natürliche Zähne besitzen eine für sie charakteristische Farbe, welche sich aus der anatomischen Struktur und Schichtung der Zahnhartgewebe über dem Pulpengewebe im jeweils auffallenden Licht ergibt. Selektive Absorption und Remission von Frequenzanteilen des Lichtspektrums in der Tiefe des Dentinkerns sowie Interferenzen an oberflächennahen Schichtanteilen des Schmelzes, Lichtbrechung, -reflexion und -transmission im Bereich aller Schichten bestimmen die Zahnkörperfarbe und die Transluzenz. Der große Hydroxylapatitanteil des Zahnes ist ursächlich für seine Trübung verantwortlich. An dessen prismatischen Kristallen entstehen regelmäßig gerichtete Spiegelreflexionen, welche den Lichtausfallwinkel dem Einfallswinkel entsprechen lassen. Bereits an der Schmelzschicht entsteht eine diffuse, nach allen Seiten wandernde Reflexion infolge einer Lichtstreuung und wenig tiefer, an der Schmelz-Dentin-Grenzschicht, beginnt die erste größere Teilabsorption des Lichtes. Faktoren wie die Schichtstärke der einzelnen Zahnhartgewebe, der labial-orale Kronendurchmesser, die Ausdehnung des Pulpenkavums und die Vitalität des Zahnes bzw. ihr Fehlen besitzen ebenfalls einen Einfluß auf die Zahnfarbe (*Lemire* 1979, *Körber* 1985). Bestimmend für die Zahnfarbe allerdings ist die Farbe des Dentins, welche durch den relativ farblosen und transparenten Schmelz hindurchschimmert. Die Dicke jener Schmelzschicht ist verantwortlich für die Schwächung der Intensität der Dentinfarbe. Ein Zahn wird so polychromatisch. 70 % des Lichtes gelangen durch ein 1 mm dickes Schmelzstück. Diese relativ große Lichtdurchlässigkeit ist das Resultat der Ordnung in Form eines geschichteten Kristallaufbaus, welcher eine leiterähnliche Ausbreitung der elektromagnetischen Strahlung bewirkt. Eine Aufhellung fällt inzisal und approximal aufgrund fehlender Dentinunterlagerung auf (*Brockmann* 1988, *McLean* 1978, *Muia* 1982). Dem Schmelz kann so am ehesten die Helligkeit zugeordnet werden (*Muia* 1982). Einen weiteren Effekt erzielen die Perikymatien. Sie bilden hoch glänzende Lamellen im Sinne von endenden Prismenschichten zirkulär um die Zahnkrone herum und streuen auf sie auffallendes Licht in unterschiedliche Richtungen. Zahntypische Form- und Strukturmerkmale bilden ein Reflexionsmuster (*Brockmann* 1988, *Kufner* 1979), hochglanzpolierte Flächen wirken aufgrund der Reflexion eines Großteils des Lichtes in Richtung des Beobachters heller als die das Licht in alle Richtungen streuende aufgeraute Oberfläche (*Shelby* 1976). Die Lichtdurchlässigkeit des Dentins, welches aus nur noch 70 % anorganischem Material besteht, ist bedeutend geringer. Lediglich etwa 30 % des Lichtes gelangen durch einen 1 mm starken Dentinanteil. Diese geringe Lichtdurchlässigkeit bewirkt einen Transluzenzverlust bzw. ein Mehr an Opazität im Vergleich zum Schmelzbereich und führt zu einer Verstärkung der gelb-orange-roten Oberflächenreflexion (*Brockmann* 1988, *McLean* 1978). Die Zusammensetzung des Dentins bestimmt also Farbton und Sättigung (*Muia* 1982). So ist die interprismatische Kittsubstanz des Schmelzes bei dem ausgewachsenen Zahn vollkommen verkalkt, erscheint in der äußersten Schmelzschicht eines Erwachsenen zurückgebildet und ist im Dentin reichhaltiger. Die feuchte Zahnkrone imponiert allgemeinen Beobachtungen zufolge in gelblich-weißer Farbe und gewinnt mit zunehmender Zwischensubstanz an Intensität. Die Farbe eines extrahierten, augenscheinlich trockenen Zahnes ist daher bedeutend heller und weißer (*Pernkopf* 1958).

Die Farbe eines Körpers verändert sich also nun mit seinem Flüssigkeitsgehalt. Dieses Phänomen, welches der Zahnarzt nicht nur an extrahierten und trocken gelagerten Zähnen erkennen kann, sondern auch beobachten, wenn er einen Zahn mit Hilfe eines Kofferdams dem Mundmilieu entzieht, ihn auf diese Weise der sukzessiven Austrocknung unterwirft und dieser aufhellt, jener dann nach Kofferdamentnahme wieder in seine ursprünglich dunklere Farbe zurückzufinden versucht, hat seine Grundlagen in eben dieser Wandlung der Absorption, Transmission, des oben erwähnten Brechungsindex und der daraus resultierenden Änderung der Remission und Reflexion des auf ihn einstrahlenden Lichtes in Abhängigkeit von seinem Flüssigkeitsgehalt.

Schon im Jahre 1929 wurde von Bodecker der Wasserphase im menschlichen Zahn eine wichtige biologische Bedeutung zugesprochen und durch die Wissenschaft der folgenden Jahrzehnte die Rolle der Flüssigkeit in Schmelz, Dentin und Pulpa durch zahlreiche Messungen und Versuche quantifiziert, qualifiziert und konkretisiert.

Bislang existiert weder eine Publikation, welche den Zusammenhang zwischen Wasser- oder Flüssigkeitsgehalt und Farbe von Zähnen bewiesen hat, noch ist es möglich eine Beziehung von De- und Rehydrierungsprozessen mit entsprechender Farbveränderung in Verbindung mit dem Zeitfaktor in eine Chronologie eingebunden der Literatur zu entnehmen.

Da dieser Zusammenhang zwischen Flüssigkeitsgehalt und Farbe der Zähne auch in Verbindung mit dem Zeitfaktor eines Flüssigkeitsabgabe- und Flüssigkeitsaufnahmeprozesses bis zum heutigen Tage durch keine Studie bewiesen und erfaßt wurde, muß sich die nachstehende Literaturübersicht auf die voneinander unabhängigen Themengebiete „Flüssigkeit und Zähne“, „Historische und wissenschaftliche Grundlagen der Farbenlehre und -metrik – höhere Farbmatrik“, „Farbenlehre, Farbmatrik und Zahnmedizin“ beschränken.

Eine Beziehung also zwischen der Farbe und dem Flüssigkeitsgehalt zu schaffen, diese in eine Chronologie eines Flüssigkeitsaufnahme- sowie Flüssigkeitsabgabeprozesses einzubinden könnte es erstmalig denkbar erscheinen lassen, über Messungen in der Zahnmedizin Zahnfarben anderer Hydrierungsgrade zu rekonstruieren und den Rechtsmediziner in die Lage zu versetzen, den Todeszeitpunkt anhand der Farbe des Zahnes als auch seines Speichel- bzw. Flüssigkeitsgehaltes zu ermitteln.

Weiterhin soll der Zahnarzt die Informationen erhalten, bis zu welchem Zeitraum nach Trockenlegung noch eine relativ natürliche Zahnfarbe zum Abgleich vorliegt oder wie lange nach Ende der Trockenlegung gewartet werden muß, um wieder eine natürliche Zahnfarbe bestimmen zu können. Dies kann für den Zahnarzt nach unterlassenem Farbgleich oder zur weiteren Optimierung der Farbgestaltung nach bereits vollzogenem trockenlegendem Eingriff interessant werden.

Es ist weiterhin denkbar, einen kritischen Grenzwert des Flüssigkeitsverlustes bis zu dem die Pulpa keine irreversiblen Schädigungen erfährt, beispielsweise durch behandlungserforderliche Trockenlegung des Zahnes farbmatrikisch zu formulieren. Der Behandler erhielte somit die Möglichkeit während der Behandlung den Vorgang des Flüssigkeitsverlustes zu überwachen und vor Erreichen eines pulpenschädigenden Dehydrierungsgrades des Zahnes die Behandlung abzubrechen.

Mittels farberfassender Apparaturen und über subjektive Bewertung mittels Zahnfarbringpaletten, kombiniert mit thermogravimetrischen und gravimetrischen Apparaturen, sollen diese Ziele erreicht werden.

Farberfassende Apparaturen, aber auch visuelle Farbabweiche, welche in Wissenschaft und Forschung beispielsweise zur Erkundung von Werkstoffen Einsatz finden und in der zahnärztlichen Praxis die Grundlagen zur Farbgestaltung zahnschubstanzersetzender zahnärztlicher und zahntechnischer Arbeiten bilden, bergen jedoch Differenzen in den mit diesen Methoden erlangten Ergebnissen und Erfassungungenauigkeiten in sich, welche auf einer Reihe von Einflußfaktoren basieren, wie beispielsweise dem Umgebungslicht, Normlicht, Metamerie-Effekt, der Art der Meßapparatur, der Meßgeometrie, dem Meßmodus, der Zahnfarbringpalette, dem Anwender, Beobachtungswinkel, der Meßöffnung, Meßfläche, individuellen Kronenkrümmung, Glanzwirkung, Wirkung des Flüssigkeitsgehaltes und den Bewertenden.

Diese und weitere Einflußfaktoren sollen nun in dieser Arbeit gefunden bzw. erkundet, analysiert und quantifiziert sowie deren Ursachen und Grundlagen wie auch diejenigen von auftretenden Phänomenen und Effekten geklärt und erklärt werden (Grundlagenforschung). Ein jeder dieser Einflußfaktoren wird über die hier neu entwickelten und auf den unterschiedlichsten Fragestellungen basierenden Methoden in seiner Wirkung und seinem Ausmaß auf die Ergebnisse einer isolierten Betrachtung auch aus verschiedensten Perspektiven unterzogen.

Mit Wissen um das Wesen und Ausmaß dieser Einflußfaktoren lassen sich metrische Farberfassung und visuelle Farbbewertung in der zahnmedizinischen und rechtsmedizinischen, aber auch medizinischen Praxis, in Wissenschaft und Forschung und so auch innerhalb dieser Arbeit optimieren, Meßergebnisse versierter interpretieren und der Weg zu genaueren, standardisierten Messungen und Probenauswahlen vollziehen, die Ergebnisfindung verfeinern sowie Maßnahmen für eine exaktere Prozeßbewältigung ergreifen. Durch gezielte Veränderungen von Einflußfaktoren

ren wird es möglich sein, eine bessere Übereinstimmung zwischen subjektiver und objektiver Erfassung der Zahnfarbe praxisgerecht zu ermöglichen, und mit Kenntnis um die Entstehung derartiger und weiterer Wirkeffekte können günstige von diesen verstärkt und ungünstige reduziert oder vermieden werden. Hiermit wird auch die Grundlage für die industrielle Weiterentwicklung von dentalen Farbmeßapparaturen sowie Farbringpaletten geschaffen, beispielsweise von den Farbringpaletten, welche zur Todeszeitbestimmung Nutzen finden können. Hierzu liefert die Analyse von Zahnfarbräumen, bestehend aus den am häufigsten vorkommenden Zahnfarben, in Abhängigkeit von dentalen Flüssigkeitsgehalten interessante Beiträge.

Es wird möglich, Aussagen zu treffen über die für die zahnärztliche und rechtsmedizinische Praxis geeignetste Apparatur, Meßgeometrie, Normlichtart, Meßflächengröße, den geeignetsten Normbeobachtungswinkel usw., eingesetzt als Alternative zum visuellen Farbabgleich.

Durch Vermeidung von ergebnisverzerrenden Einflüssen, beispielsweise durch differierende Meßflächen, Meßflächenverschiebungen, Relations-/Winkelveränderungen zwischen Apparatur und Meßobjekt, wird für die Erfassungen ein Präzisionsgewinn hervorgerufen. Dieser ist mit einem eigens für diese Arbeit entwickelten Positionierungssystem zu erzielen, durch das die rechtsmedizinische Todeszeitdiagnostik erst ermöglicht wird. Die isolierte Betrachtung der Auswirkungen der einzelnen Bestandteile jenes Positionierungssystems getrennt voneinander auf die Resultate soll deren Einfluß auf die Meßergebnisse transparent gestalten, dem Leser dieser Arbeit, dem Anwender von farberfassenden Apparaturen, dem Zahnarzt und Rechtsmediziner verdeutlichen, mit welcher einer Präzision gemessen werden kann, und das Gefühl vermitteln, mit welcher hoher Aussagekraft die durch jene Apparaturen gewonnenen Ergebnisse versehen sind, die Sicherheit in der Handhabung jenes Systems ermöglichen und dessen Exaktheit aufzeigen.

Nicht zuletzt sollen auch neue Möglichkeiten des Einsatzes derartiger Farbmeßapparaturen und Technologien anhand der Ergebnisse gefunden und abgeschätzt werden, wie beispielsweise diejenige zur biometrischen Identifikation von Lebewesen.

2. Literaturübersicht

2.1 Flüssigkeit und Zähne

In einer Vielzahl von Untersuchungen, in denen man sich der Chemie des Zahnes widmete, bezogen sich die Ergebnisse mit den Angaben zum Mineralsalzgehalt (Bowes 1935, 1936, *Le Fevre* 1937, 1938, *Bird* 1940, *Rapoport* 1964, *Rowles* 1967, *Weatherell* 1973, *Miller* 1971) und insbesondere zum Kalzium-, Phosphor- (Bowes 1935, *Le Fevre* 1937, *Armstrong* 1937, *Armstrong* 1950, *Burnett* 1958, *Weatherell* 1960, *Johansen* 1963, *Brudevold* 1967, *Naujoks* 1967, *Retief* 1971) Fluorid- (*Little* 1967, *Brudevold* 1958, 1967, *Naujoks* 1967), Natrium-, Kalium-, Chlor- (Bowes 1935, *Harrison* 1937, *Steadman* 1941, *Trautz* 1955, *Calonius* 1965, *Söremark* 1966, *Brudevold* 1967, *Naujoks* 1967, *Retief* 1971) und CO₂-Anteil (*Schmidt* 1948, *Bowes* 1935, *Armstrong* 1937, *Trautz* 1955, *Johansen* 1963, *Asgar* 1956, *Little* 1961, 1966, *Naujoks* 1967, *Brudevold* 1967, *Naujoks* 1967, *Wetherell* 1968, *Le Fevre* 1938, *Brudevold* 1958), Anteilen verschiedener Metalle und Spurenelemente (Bowes 1935, *Murray* 1935, 1936, *Armstrong* 1937, *Le Fevre* 1937, 1940, *Tefi* 1941, *Brudevold* 1955, 1956, 1958, *Trautz* 1955, *Asgar* 1956, *Burnett*, 1958, *Battistone* 1967, *Söremark* 1961, 1964, *Johansen* 1963, *Rapoport* 1964, *Little* 1966, *Retief* 1971, *Weatherell* 1973, *Losee* 1974, *Söremark* 1961, 1964) sowohl auf das Frisch- (*Bowes* 1935, 1936, *Eastoe* 1967, *Brudevold* 1967, *Naujoks* 1967, *Coklica* 1969) als auch vornehmlich auf das Trockengewicht nach Dehydrierung (*Bowes* 1935, *Armstrong* 1937, *Harrison* 1937, *Steadman* 1941, *LeFevre* 1937, 1948, *Schmidt* 1948, *Armstrong* 1950, *Picard* 1952, *Trautz* 1955, *Asgar* 1956, *Burnett* 1958, *Weatherell* 1960, 1968, *Brudevold* 1955, 1956, 1960, *Söremark* 1961, 1962, *Retief* 1961, 1971, *Söremark* 1962, *Johansen* 1963, *Calonius* 1965, *Little* 1966, *Naujoks* 1967, *Little* 1967, *Brudevold* 1967, *Naujoks* 1967, *Retief* 1971, *Rowles* 1967, *Weatherell* 1972, 1973, *Miller* 1971, *Losee* 1974, *Söremark* 1961, 1964) sowie auf das Aschegewicht nach Entzug aller Wasserarten (*Bowes* 1933, 1935, 1936, *Murray* 1936, *Bird* 1940, *Tefi* 1941, *Picard* 1952, *Brudevold* 1960, *Johansen* 1963, *Rapoport* 1964, *Coklica* 1969) (zu den Wasserarten s. u.).

Die stets indirekten Erwähnungen des Wassers bei den chemischen Erkundungen des Zahnes gaben Anlaß, das Wasser selbst, seinen Gehalt, seine Aufgabe in der Zahnschubstanz ebenfalls in den Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses zu rücken. Zahlreiche Studien beschäftigten sich mit dem Wasser der Zähne (*Spreter v. Kreudenstein* 1958, *Stüben* 1955, 1956, *Heikinheimo* 1961). Es wurde der Wassergehalt von Zähnen (*Burnett* 1958), des anorganischen Teils fetaler Zähne (6,81 %) (*LeFevre* 1937), der Milchzähne (*Bird* 1940), permanenter Zähne (*Johansen* 1963, *LeFevre* 1938) quantifiziert, der Art des Wassers (*Little* 1962, *Marguerite* 1966), seiner Rolle (*Bodecker* 1929, *Deakins* 1942, *Atkinson* 1947, *Little* 1966) und Bewegung (*Spreter v. Kreudenstein* 1958, *Stüben* 1955, 1956, *Heikinheimo* 1961, *Bergman* 1962, 1963) im Zahngewebe nachgegangen. Zur Bestimmung des Wassergehaltes bediente man sich thermogravimetrischer und gravimetrischer Analysemethoden, welche schon im Zusammenhang mit der Erfassung des Wassergehaltes einer anderen körpereigenen mineralischen Substanz herangezogen wurden. Bereits 1894 berichtet *Gabriel* von 2,46 % Kristallwasser menschlicher Knochen, welches in Temperaturbereichen zwischen 300 und 350 °C verloren gehen soll (*Gabriel* 1894). *Job und Swanson* trockneten fetale Knochen bei 105 °C und fanden 44,8 % extrazelluläres und 8,3 % intrazelluläres Wasser (*Job und Swanson* 1938). *Eastoe und Eastoe* erhitzen bei 105 °C über 24 Stunden zermahlene Knochen bis zur Gleichgewichtskonstanz und bezifferten den Anteil auf 8 % (*Eastoe und Eastoe* 1954). *Robinson und Elliott* (1957) wählten den Temperaturbereich der Trocknungsprozedur, bei der sie Kortikalis enthaltende Knochen jüngerer und älterer Hunde erhitzen, in vergleichbarer Höhe (100–105 °C). Das Ergebnis der Messungen ergab 73 Vol.-% bzw. 54 Gew.-% für junge und 21 Vol.-% bzw. 10 Gew.-% für ältere Individuen (*Robinson und Elliott* 1957). Die erste überhaupt beschriebene Gewichtsmessung an Zähnen wurde von *Bolk* an über 20.000 Proben durchgeführt. Das Gewicht, aufgeteilt nach Kiefer und Zahnsorte, lag zwischen 0,517 g (mittlere Unterkieferfrontzähne) und 2,285 g (obere Sechsjahrmolaren), die mittlere

ren Oberkiefer-Inzisivi wiegen im Durchschnitt 0,988 g (Bolk 1924, 1925, De Jonge 1958). In einer vergleichbaren Studie von Cremer fällt das Zahngewicht in den Bereich von 0,299 g (mittlerer Unterkieferschneidezahn) bis 3,18 g (Sechsjahrmolar) und liegt insbesondere bei den mittleren Oberkieferfrontzähnen zwischen 0,87 und 1,62 g (Cremer 1958).

Gewichtsmessung unter thermischem Einfluß bildet die Basis zu der Bestimmung des Wasseranteils an Zähnen. So beträgt der Anteil des Wassers frisch extrahierter, pulpenloser menschlicher Zähne, welche von Burnett und Zenewitz bei einer Temperatur von 100 °C sowie bei 197 °C unter Vakuum getrocknet wurden, 8,53 +/- 0,33 bzw. 9,32 +/- 0,37 (Burnett 1958), der Wasseranteil des Schmelzes 2,02 % +/- 0,04 % (Johansen 1963), 2,3 % (1–5 %), des Dentins 13,2 % (10,8–15,7 %) (Le Fevre 1938) und des Dentins aller Zähne 10,0 +/- 0,55 % bei 100 °C vakuumgetrocknet und 12,16 +/- 0,8 % bei 197 °C vakuumgetrocknet (Burnett 1958). 12 Stunden bis zur Gewichtskonstanz auf 105 °C erhitzter Schmelz soll nach Cremer allerdings nur 0,2 Gew.-%, Dentin 10 Gew.-% Wasser enthalten (Cremer 1958). Andere Studien und Publikationen quantifizierten den Wassergehalt des ganzen Zahnes auf 8,79–11,0 Gew.-% (LeFevre 1937), den des Schmelzes auf 2,8 Gew.-% (Bird 1940), 4 Gew.-% bzw. 12 Vol.-% (Manson 1970, Brudevold 1967, mod. nach Cate 1985, Schröder 2000, Buddecke 1994, Benninghoff 1994), den des Dentins auf 11,1 Gew.-% (Bird 1940), 10 Gew.-% oder 25 Vol.-%, und den des Zementes auf 12 Gew.-% bzw. 36 Vol.-% (Manson 1970, Brudevold 1967, mod. nach Cate 1985, Schröder 2000, Buddecke 1994, Benninghoff 1994), den Wassergehalt der Pulpa auf 90 % (Desgerez 1927, Yoon 1965). Burnett und Zenewitz betrachteten den Wassergehalt einzelner Zahnsorten (Schneidezähne, Molaren) sowie von pulverisierter Zahnschmelz (Schmelz und Dentin) in Abhängigkeit von ihrer Partikelgröße, erhitzen sie unter atmosphärischem Druck sowohl auf 100° und auf 61 °C als auch unter Vakuum auf 100 °C und 197 °C bis zu dem Punkt, bei dem der Gewichtsverlust gegen Null tendiert und somit eine Gewichtskonstanz erreicht ist: Die Schneidezähne enthalten 6,4 % (100 °C) bis 6,5 % (61 °C) Wasser ihres Äquilibriumsgewichtes, die Molaren 5,8 % (100 °C) bis 6,0 % (61 °C), pulverisierter Schmelz mit Partikelgrößen < 0,14 mm 0,45 % (100 °C), mit Partikelgrößen von 0,24–0,15 mm 0,17 % (100 °C) und pulverisiertes Dentin mit Partikelgrößen < 0,14 mm 6,3 % (100 °C) sowie einer Partikelgröße von 0,24–0,15 mm 6,1 % (100 °C) Wasser. Unter Vakuum verliert der Schneidezahn maximal 6,7 % (100 °C) bis 8,8 % (197 °C), die Molaren 6,3 % (100 °C) bis 7,6 % (197 °C), pulverisierter Schmelz mit einer Partikelgröße < 0,14 mm 0,52 % (100 °C) bis 0,81 % (197 °C) bzw. einer Partikelgröße von 0,24–0,15 mm 0,3 % (100 °C) bis 0,39 % (197 °C), pulverisiertes Dentin mit einer Partikelgröße von < 0,14 mm 7,3 % (100 °C) bis 8,7 % (197 °C) und Partikelgrößen von 0,24–0,15 mm 6,7 % (100 °C) bis 8,2 % (100 °C) Wasser bis zu seinem änderungsfreien Endgewicht. Die Gleichgewichtskonstanz soll bei Trocknung mit 100 °C und unter Vakuum für ganze Zähne, pulverisierten Schmelz und pulverisiertes Dentin nach 24 Stunden erreicht sein. Die Aufbewahrung des Zahnmaterials unter atmosphärischem Druck bei 28 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 36–49 % erhöht die Trocknungszeit für ganze Zähne ebenso wie für pulverisierten Schmelz auf 7 Tage und für pulverisiertes Dentin auf mehr als 18 Tage erheblich (Burnett 1958). Zudem konnte herausgefunden werden, daß frisch extrahierte Zähne bis zu 1,3 % mehr Wasser enthalten als bei Zimmertemperatur im nassen Milieu aufbewahrte (Burnett 1958) und daß im Vergleich der Wassergehalte von vitalen sowie pulpenlosen Zähnen (Helfer 1972, Papa 1994) pulpenhaltige Zähne nicht signifikant mehr Flüssigkeit in sich tragen als endodontisch behandelte (12,35 % : 12,10 %) (Papa 1994). Festzuhalten bleibt jedenfalls, daß Dentin mehr Wasser enthält als der Schmelz (Leonhardt 1990).

Neben der Ermittlung des Wassergehalts der Zahnschmelz wollte man wissen, welchen Weg das Wasser nimmt und welche Aufgabe es erfüllt. Es wurde ihm eine wichtige Rolle bei der Entwicklung des Zahnschmelzes (Deakins 1942) ebenso wie dem vollständig entwickelten Zahn (Bodecker 1929, Atkinson 1947) zugesprochen. Der Wassergehalt beträgt bei jungen Schmelzschichten während der Amelogenese etwa 50 % und nimmt dann während der Schmelzreife proportional mit der organischen Matrix kontinuierlich ab (Mansson 1970, Deutsch 1982, Robinson 1981). Der größte Anteil des Wassers des ausgereiften Schmelzes ist an Apatitkristallen in Form

einer Hydratationshülle zu finden und nur etwa $\frac{1}{4}$ des Wassergehaltes ist frei in der organischen Matrix verfügbar. Mikroskopischen Beobachtungen zufolge trat nur ein kleiner Anteil des Wassers durch Schmelzsprünge und Lamellen aus, während die Hauptmenge der Flüssigkeit jedoch breitflächig aus dem Schmelz heraustritt. Die Schmelzflüssigkeit wird als ein Transportmedium für Ionen und Moleküle verstanden, die in ihrer Bewegung studiert werden soll (*Bergman* 1963).

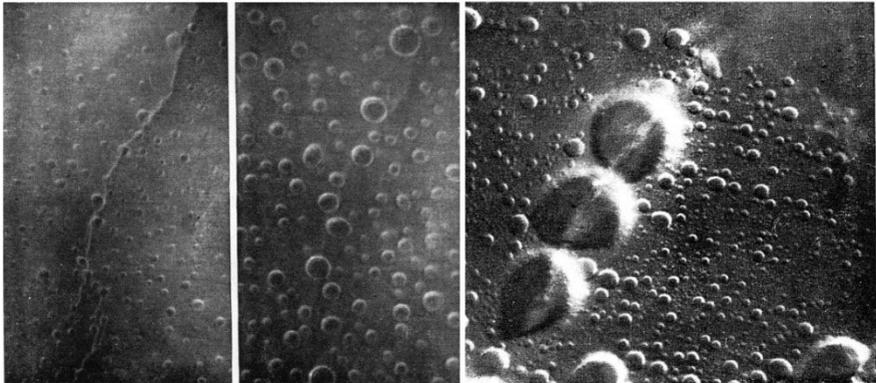


Abb. 2.1.-1 Flüssigkeit auf der Schmelzoberfläche. 3 Stunden (links) und 12 Stunden (Mitte) nach der Applikation von Öl auf die Oberfläche. Schmelzflüssigkeit auf der Oberfläche des Schmelzes nach 15 Stunden (rechts). Die Flüssigkeit des Zahnes tritt durch Trocknung an die Oberfläche und bewirkt die Vergrößerung der Tropfen. Die größten Tropfen haben einen Durchmesser von 20 Mikrometern (*Bergman* 1963).

Bergman und Siljestrand (1963) verbanden Wurzeln kariesfreier junger Prämolare über Glaskapillare, welche sie mit Kochsalzlösung füllten und über Latexröhrchen abdichteten. Der Wasserverlust über den Schmelz konnte so über die Bewegung der Lösung in den Kapillaren beobachtet werden. Sie errechneten die Fließgeschwindigkeit mit 0,1 mm pro Stunde, hatten feststellen können, daß das Vorhandensein der Pulpa keinen Einfluß auf die Bewegungsgeschwindigkeit hat und eine beachtliche Menge von Flüssigkeit (4 mm^3 pro cm^2 Schmelz innerhalb von 24 Stunden) durch den intakten ausgereiften Zahnschmelz hindurchtreten kann, für deren Transport der Schmelz nach Schätzungen von *Little et al.* (1962) und *Carlström et al.* (1962, 1963) Größenordnungen von 2 % seines Volumens bereithält. Die mikroskopischen Betrachtungen von *Spreter von Kreudenstein und Stüben* (1955) und *Heikinheimo* (1961) und ihre Beschränkung auf Dentinflüssigkeiten sowie die Beobachtung und Errechnung der Fließgeschwindigkeit lassen keine Informationen über die Pfade des Wassers erkennen.

Bergman (1963) versuchte mit Hilfe frischgezogener Zähne, die in unterschiedlichen Winkeln zu den Schmelzprismen geschliffen wurden und teilweise eine Isolation von Schmelz und Dentin durch Bohrungen an deren Grenze erhielten, an Erkenntnisse über den Flüssigkeitsstrom durch den Zahn zu gelangen. Zu diesem Zweck beschichtete er die Zähne mit Öl und socketete diese unter einer Vergrößerungslinse. Zunehmend in Zahl und Größe entwickelten sich Tropfen auf der Schmelzoberfläche, welche in Sprüngen und an Lamellen jedoch vor allen Dingen „weitschweifig“, wie er berichtete, verteilt erschienen, allerdings mit Ausnahme der Bereiche, die eine Schmelz-Dentin-Isolation erfahren hatten. Er konnte so zwar ebenfalls die wichtige Beziehung des Flüssigkeitstransportes zwischen Schmelz und Dentin, jedoch nicht dessen genauen Weg bestimmen. Seiner Meinung nach handele es sich bei dem Transportweg nicht ausschließlich um einen Fluß entlang der Lamellen und Prismen, sondern ebenfalls, fußend auf seinen Beobachtungen, um einen jenseits dieser Strukturen von interkristalliner und sogar kristalliner Art (*Bergman* 1962, 1963). Die Permeabilität nimmt mit abnehmender Dentindicke und Molekülgröße zu (*Pashley* 1977, 1978), und eine mit einer Diamantscheibe und Bohrern bearbeitete Dentinoberfläche ist bedeutend weniger durchlässig als eine mit Säure angeätzte Fläche (*Pashley* 1978). Das

Dentin weist eine höhere Permeabilität als der Schmelz auf (*Hellwig* 1999). Neben der Bewegung des Wassers wird die Frage nach seiner Bestimmung und dessen Einbindung an die und in der Kristallstruktur gestellt. *Little et al.* schreiben dem Wasser, das bei dem Verbrennungsprozeß der Zahnschmelzsubstanz frei wird, die Aufgabe einer Brücke zwischen Protein und mineralischer Phase zu, die es zusammenhält und an die es gebunden ist („gebundenes Wasser“) (*Little* 1962). Basierend auf Untersuchungen an veränderten und nicht veränderten Zahnmaterial hatte er versucht, dieser Frage nachzugehen: Substanzbereiche mit braunen und weißen Flecken kariös veränderten Schmelzes enthalten mehr Stickstoff, besitzen aber auch eine geringere Dichte (*Bhussry* 1956, 1958), Radioopazität (*Applebaum* 1932) und einen niedrigeren CO₂-Gehalt (*Coolidge* 1957). Ebenfalls flossen Erkenntnisse, welche über altersabhängige Änderung des Stickstoffgehaltes des Schmelzes (*Savory* 1959) und des CO₂ und ihr Ausbleiben bei der Relation des Ca- und P-Gehaltes (*Little* 1958, 1959) berichteten, in die Suche nach der Rolle des Wassers ein. Der Verlust dieser chemischen Komponenten hat nicht eine sofortige Destruktion zur Folge, sodaß *Little und Casciani* eine Kompensation in einem Ersatz jener durch „verlorenes Wasser“ als Möglichkeit ins Auge faßten. Die von ihnen verwandten frisch extrahierten Zähne von jüngeren (< 30 Jahre) und älteren Patienten (> 30 Jahre) ohne und mit bernsteinfarbigen Flecken, Braun- oder Weißverfärbungen wurden bei 68 °C vakuumgetrocknet, bei 500 °C erhitzt (*Little* 1955, 1958 1959, *Brudevold* 1956) und bei 900 °C (*Little* 1962) verbrannt. Der Betrag des „Total organic and bound water“ (*Deakins* 1942) konnte von ihm durch den Gewichtsverlust zwischen 68 °C Vakuum und 900 °C abzüglich des fliehenden CO₂-Anteils errechnet werden. Zerkleinerte und feucht gelagerte Proben verlieren, der Luft ausgesetzt, schnell in einem Ausmaß von 6–30 % an Gewicht und erleiden weitere Gewichtseinbußen, werden sie bei 68 °C vakuumgetrocknet. Der durchschnittliche Verlust von freiem gebundenen („loosely bound“) Wasser liegt bei Proben mit Flecken in der Größenordnung von 14 %, mit weißen Flecken in der von 20 % und braunen Flecken in der von 12 % und sein Anteil ist bei gesundem Schmelz am höchsten. Den gesamten Verbrennungsprozeß hindurch ist das Verhältnis zwischen Ca und P erstaunlich gleichbleibend (zwischen 68 °C Vakuum und 900 °C) (*Little* 1962, *Kunin* 1958), während jedoch festes Wasser („tightly bound“), welches Ca²⁺ (nach *Little* 1962) im Gitter des Hydroxylapatits ersetzen kann, verloren geht. Der Verlust des Gewichtes begründet sich nicht auf dem des Stickstoffs des Proteins oder dem des CO₂ des Schmelzes, sondern vor allem auf dem des „tightly bound water“, das sich, verbunden mit der Mineralphase des Kristalles, von ihr lösen und zu ihr zurückfinden kann (*Little* 1962). Auf diese Weise wäre es möglich, die Schmelzverbindung zwischen „N-tightly bound water“ einerseits und „mineral-tightly bound water“ andererseits mit Auswirkungen auf die Wasserbindung (*Pimentel* 1960) zu erklären. Auf die Wassermenge im Schmelz sowie die Position und Aufgabe wurden über den Einsatz indirekter Methoden geschlußfolgert (*Little* 1962, *Carlström* 1963, *McConnel* 1938, *Trautz* 1955): Verschiedene Arten von Wasser können differenziert werden – „bound water“ steht im direkten Zusammenhang zur Ca:P-Relation (OH⁻) (*Little* 1962) und ein möglicher Ersatz von Ca durch H₃O⁺-Gruppen wurde in Betracht gezogen. Ein unbekannter, nicht zu beseitigender Rest, der sich im Verhältnis zu der Ca:P-Relation befindet, wird in dem nicht entfernbaren OH⁻ des Apatits gesehen und soll bei 1,59 mol liegen (*Trautz* 1955). Mit der direkten Messung von Wasser und Protonen mittels kernmagnetischer Resonanzspektrometrie (*Bradbury* 1964, *Pople* 1959), chemischer Analytik in Verbindung mit thermogravimetrischer Hochtemperaturanalyse (*Marguerite* 1966), konnten nun auch unmittelbar drei Arten von Wasserstoffprotonen unterschieden werden: 1. Der Wasserverlust bei 100 °C, austauschbar mit D₂O, beträgt 0,6–1 %, ist freies ungebundenes Wasser. 2. Die Menge gebundenen (*Little* 1962), „gefangenen“ Wassers in frei beweglicher Fraktion (*Little* 1966), welches mit dem Ca:P-Verhältnis in Beziehung steht, nicht gegen D₂O (Deuteriumoxid, „schweres Wasser“) austauschbar ist, bei 0,8 mol (1,5 % des Schmelzes) liegt und durch Temperaturen von 100 °C bis 900 °C entferntbar ist, kann Hydronium zum Ersatz der Ca sowie der P-Position spenden (*Little* 1962). 3. Der Wasseranteil, der dem Äquivalent von 2 mol entspricht, bei 900–1.400 °C entferntbar ist und bei 900 °C als freie Wasserfraktion in Größenordnungen von 3,5–3,6 % detektiert werden kann, läßt sich, einmal aus der Zahnschmelzsubstanz entfernt, unter

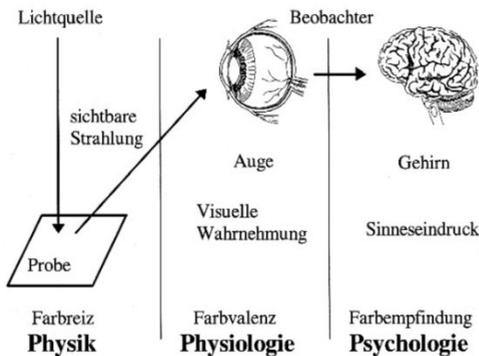
normalen Bedingungen nicht mehr zu einer Rehydratation heranziehen. *Little* sieht nach seinen Untersuchungen des Jahres 1966 im Gegensatz zu vorausgegangenen Publikationen von *Trautz* (1955), *McConnel* (1963, 1965), *Hendricks und Hill* (1942) und früherer Vermutung (*Little* 1962) das H_2O anstatt des H_3O^+ in der Position des CO_2 und anstatt der OH^- in der Ecke der Kristallzelle. In ihren thermogravimetrischen Analysen konnten *Little et al.* den gesamten Gewichtsverlust von isoliertem pulverisiertem Zahnschmelz auf $> 4,5\%$ bzw. $7,5\%$ des Gesamtzahn Gewichtes bei $100\text{ }^\circ\text{C}$ bestimmen (*Little* 1966). Den drei Wasserarten von *Little et al.* (1966) stellten *Le Geros et al.* (1979) als Ergebnis ihrer Studien zwei Wasserfraktionen entgegen. Bei der einen Fraktion handelt es sich um von der Zahnschmelz absorbiertes, lose gebundenes Wasser, welches beim Erhitzen bis $200\text{ }^\circ\text{C}$ ohne Veränderung der Kristallgitterkonstanten entfernbar ist, sodaß jederzeit eine reversible Rehydrierung herbeigeführt werden kann, und bei der anderen um Kristallwasser, welches zwischen 200 und $400\text{ }^\circ\text{C}$ irreversibel ausgetrieben wird. Durch eine Erhitzung über $200\text{ }^\circ\text{C}$ kommt es hierbei zu einer Kontraktion der a-Achse des Kristallgitters. Der Ursprung jenes Kristallgitterwassers ist nicht geklärt, wird aber sowohl in einem $\text{H}_2\text{O-OH}$ als auch in einem $\text{HPO}_4^{2-}\text{-PO}_4^{3-}$ -Austausch gesehen.

Demgegenüber unterscheidet beispielsweise die Mineralogie die im Kristall befindliche Flüssigkeit in eingeschlossene Flüssigkeit („Fluid inclusions“), in an Gitterplätzen über Van-der-Waals-Kräfte nur schwach gebundenes molekulares Kristallwasser, welches bei Erhitzen relativ leicht herausgetrieben wird, in negativ geladene Hydroxylgruppen mit einem festen Platz im Kristallgitter, welche erst bei einigen Hundert Grad Celsius in Form von sogenanntem Konstitutionswasser entweichen, und in freies Wasser, welches sich in Hohlräumen sammelt (Zeolithwasser), in Spalten und Poren durch Kräfte der Oberflächenspannung festgehalten wird und durch leichtes Erhitzen auf $100\text{--}120\text{ }^\circ\text{C}$ entfernbar (Kapillarwasser) ist sowie an der Oberfläche durch schwache Bindungskräfte unabhängig von der Kristallstruktur (Kolloidwasser) anhaftet.

Der größte Teil des Wassers, im ausgereiften Schmelz jedenfalls, ist an Apatitkristalle gebunden (Hydratationsschale) und nur etwa $\frac{1}{4}$ in der organischen Substanz frei verfügbar (*Mansson* 1970, *Deutsch* 1982, *Robinson* 1981). Die die Kristalle umgebenden Hydratationsschalen sind wiederum bedeckt von Proteinen und Lipiden. Der lose gebundene Anteil des Wassers ist hauptsächlich mit organischer Materie assoziiert (*Hellwig* 1999). Nach Ausführungen von *Hellwig* ist der Schmelz befähigt, Wasser aufzunehmen. Er dient als Molekularsieb, welches einen Ionenaustausch erlaube. Jene Ionen können nun mit dem Flüssigkeitsstrom in den und aus dem Schmelz transportiert werden (*Hellwig* 1999).

2.2 Historische und wissenschaftliche Grundlagen der Farbenlehre und Farbmometrik – höhere Farbmometrik

Was ist Farbe? Dieser Frage nähert sich beispielsweise die Deutsche Industrienorm mit folgendem Satz: „Farbe ist diejenige Gesichtsempfindung eines dem Auge strukturlos erscheinenden Teiles des Gesichtsfeldes, durch die sich dieser Teil bei einäugiger Beobachtung mit unbewegtem Auge von einem gleichzeitig gesehenen, ebenfalls strukturlosen angrenzenden Bezirk allein unterscheiden kann“ (*DIN 5033, Teil 1-9*) und Johann Wolfgang von Goethe formulierte es so: „Farben sind Taten des Lichtes“. Jedenfalls sei an dieser Stelle gesagt, daß ohne biologische Voraussetzungen Farbe nicht existiert. Die Farbe als solche wird erst durch die Existenz eines zur Empfindung fähigen lebenden Organismus zur Wirklichkeit. Es bedarf also einer funktionsfähigen Sinneswahrnehmung in Form einer Reizung der Rezeptoren, jener 6 Millionen Zäpfchen der *Macula lutea* und 120 Millionen Stäbchen der Netzhaut des Auges, durch sichtbare elektromagnetische Strahlung von Wellenlängen zwischen 360 und 760 nm, welche sinnesphysiologisch entgegengenommen, über kaskadische biochemische Prozesse zu Nervenimpulsen transduziert (mehrstufiger Zerfall des Sehfärbstoffes zu Metaboliten, welche über die G-Protein-cGMP-Achse eine Abnahme des Natriumleitwertes sowie dadurch eine Hyperpolarisation verursachen), generiert und im nachgeschalteten Nervensystem (Nervus opticus, Chiasma nervi optici, Traktus



opticus) sowie im Gehirn (subkortikale visuelle Zentren, insbesondere Corpus geniculatum laterale, visueller Kortex) zu subjektiver Wahrnehmung aufbereitet und verarbeitet wird (*Grüsser 1995*). Farbe ist ein Sinneseindruck, der durch vom Objekt reflektiertes Licht, das Auge treffend, erzeugt, im Gehirn umgesetzt wird (*Bäuerle 1981*). Betrachten wir einen Gegenstand, so gilt seine Farbe noch vor seiner Form als das wichtigste Merkmal zu seiner Charakterisierung (*Küppers 2000*).

Abb. 2.2.-1 Der Weg zur Existenz von Farbe. Die Wahrnehmung und Verarbeitung von elektromagnetischer Strahlung als eine unbedingte Grundvoraussetzung für das Vorhandensein des Farbbegriffes. Zum Begriff der sichtbaren Strahlung s. Abb. 2.2.-2 (Bildquelle: Dr. LANGE 1998).

Farben in ihrem Charakter zu fühlen, zu erleben, zu erfahren, zu verstehen und sie zu beschreiben, sie begreifbar zu machen, zu katalogisieren, zu normieren, zu messen und sie so reproduzierbar zu gestalten, war zu allen Zeiten Wunsch und das Streben einer Reihe von bekannten Persönlichkeiten der Geschichte und ist auch heute noch Gegenstand mehr oder weniger wissenschaftlicher Zielsetzungen (vgl. [*Silvestrini 1994*]):

Bereits *Platon* (427–348 v. Chr.) schrieb in der „Erklärung der Farben“ im 30. Kapitel von „*Timaios*“ über die Entstehung des Farbeindrucks, welcher durch die Wechselwirkung des vom Auge ausgesendeten Sehstrahls mit den von dem Objekt ausgesandten Teilchen entsteht, erklärte weiterhin das Weiße, das Schwarze, das Rote (Feuer) und das Glänzende (Tränen) zu den Grundfarben, *Aristoteles* (384–322 v. Chr.) sah in seiner Schrift „*De sensu et sensato*“ die lineare Anordnung von Weiß nach Schwarz, verknüpfte über sieben Zwischenfarben eine Farbreihe, die er auch im Tagesverlauf beobachten konnte, aber erst *Pythagoras* (580–500 v. Chr.) entwickelte mit seiner Harmonielehre das vermutlich älteste Farbsystem, welches eine Beziehung zwischen der Tonleiter und der Position der Fixsterne herstellt. Einem Halbkreis mit Planetenzeichnungen

hatte er hierbei eine entsprechende Farbfolge hinzugefügt. In der islamischen Tradition hingegen wird die Farbe in einer Dualität von Licht und Dunkelheit gesehen. Aus ihrer metaphysischen Sichtweise entstammt die Zahl Sieben, die sich aus zwei zusammengehörigen Systemen ergibt: aus den drei Farben Schwarz, Weiß, erdverwandten Farben des Sandelholzes und aus den vier Farben Rot, Gelb, Grün, Blau. Ebenfalls sieben Grundfarben zwischen Weiß („Lux clara“) und Schwarz („Lux obscura“) beschrieb *Robert Grosseteste* (1168 bzw. 1175–1253), Philosoph, Theologe und erster Kanzler der Universität Oxford, in seinem Buch „De colore“ aus dem 13. Jahrhundert. Ihm ist dabei aufgefallen, daß Farben neben ihrer Farbigkeit oder Buntheit ein Weißsein oder eine Helligkeit besitzen, sodaß „prima materia“ zur körperlichen Form des Lichtes wird. Indem Grosseteste die Achse Schwarz (Nigredo) – Weiß (Albedo) um den rechten Winkel drehte und gleichberechtigte Grundfarben hinzufügte, schaffte er eine zweite Dimension – von Lux clara „steigen“ die Farben „herab“ („Nachlassen“, „Remission“) und von Lux obscura „auf“ („Bestreben“, „Intention“). 1510 fand sich bei *Leonardo da Vinci* (1452–1519) ebenfalls eine mit der von Aristoteles vergleichbare lineare Anordnung, allerdings von nur sechs „colori simplici“, eine Reihenfolge von Bundfarben Giallo (gelb), Verde (grün), Azzurro (blau), Rosso (rot). Als Leonardo sich mit der Farbenlehre beschäftigte, war ihm die Anordnung von Gelb, Grün, Blau, Rot an den Ecken eines Rechteckes, daß die Grundfläche eines doppelten Kegels bildet und an dessen Spitzen jeweils die unbunten Extrema angesiedelt sind, welche ihm von seinem Landsmann Leon Battista Alberti (1404–1472) im Jahre 1435 vorgelegt worden war, bekannt. Für ein Abweichen von der antiken Siebenfarbentheorie stand neben Alberti und da Vinci der Dominikaner *Diedrich von Freiberg* bereits im Jahre 1310.

„Wenn man aber den Ursprung und die Beziehung der Farben richtig betrachten will, dann muß man von fünf grundlegenden Mittelfarben ausgehen, die Rot, Blau, Grün, Gelb, Grau, aus Weiß und Schwarz sind, und man muß ihre Abstufung beachten, wenn sie entweder durch ihre Blässe näher an das Weiße rücken oder durch ihre Dunkelheit näher an das Schwarze,“ brachte *Aron Sigfrid Forsius* in „Physica“ seine Überlegungen zu Papier. Der in Finnland geborene Astronom, Priester und Neoplatoniker (gestorben 1637) veröffentlichte im Jahre 1611 in seinem Manuskript das erste dreidimensionale kugelförmige Farbdiagramm, in dem auch er, hier in Anlehnung an da Vinci, Schwarz und Weiß als Primärfarben ansieht, Mittelfarben (vier Buntfarben) hinzufügt und ihnen allen Graustufen zuordnet (*Gage* 1994).

„Man sieht seinem Werke die Ruhe des Klosters an, die bei der Arbeit bis ins einzelste zu gehen weiß“, konnte *Johann Wolfgang von Goethe* (1749–1832) in seiner „Geschichte der Farbenlehre“ (1810, Neuaufgabe 1963) über das von dem Brüsseler Jesuiten *Franciscus Aguilonius* (1567–1617) erschaffene Farbsystem von 1613 berichten – Rot, Gelb und Blau („colores medii“) werden hierbei in linearer Einteilung zwischen den „Colores extremi“ („albus“, „niger“) angesiedelt, deren Mischung sich über den Bogen erkennen läßt (Rundbögen des Farbsystems). Ein Farbkreis aus fünf Farben, darunter zwei Gelbtöne und Schwarz/Weiß, läßt auch bei *Robert Fludd* den Einfluß der Antike, insbesondere durch Aristoteles, auf das erste gedruckte Farbsystem in seinem medizinischen Werk aus den Jahren 1629–1631 erkennen. Der Engländer ging ebenso, wie die islamische Tradition es tat, von der metaphysischen Dualität Licht und Dunkelheit aus, auf die er durch seinen Farbkreis („Colorum Annulus“) jede Farbe zurückführen wollte und stellte fest, daß Farben nicht bloße Zufälle seien – wie es die alten Philosophen sagen –, sondern es sich hierbei um Essenzen handelt, die der Schöpfer seinen Kreaturen eingegeben hat. Die Farben der Dinge sind Teile ihrer elementaren Konstitution (*Godwin* 1979). Ein trichromatisches lineares System mit den Grundfarben Rot, Gelb, Blau und möglichen Mischungen über halbe Kreisbögen läßt sich bei *Athanasius Kircher* (1601–1680) in seinem Werk über Astronomie und Optik (1646) finden, während eine Ergänzung der Grundfarben um die Farbe Grün und deren Positionierung an den Ecken eines Quadrates in *Richard Wallers* „Catalogue of Simple and Mixt Colours“ von 1686 als Farbsystem bekannt geworden ist, bei dem die Mischung der Farben über die Quadratdiagonalen realisiert wird. Die Betrachtung, der zufolge Farben als Modifikation des weißen Lichtes durch Beimengung von Dunkelheit entstehen, wird nun zu Gunsten einer rein physikalischen Denkweise nach *Isaac Newton* (1643–1727), der sich seit 1670 mit

optischen Experimenten (Bauerle 1981, s. Abb. 2.2.-2) befaßte, verworfen. In Newtons zentralem Werk „Opticks“ von 1704 wurden die Farben Rot, Orange, Gelb, Grün, Cyanblau, Ultramarinblau und Violettblau in einem Kreis angeordnet und der Schritt zu einer zweidimensionalen Farbordnung vollzogen (Westfall 1962, Heisenberg 1984).

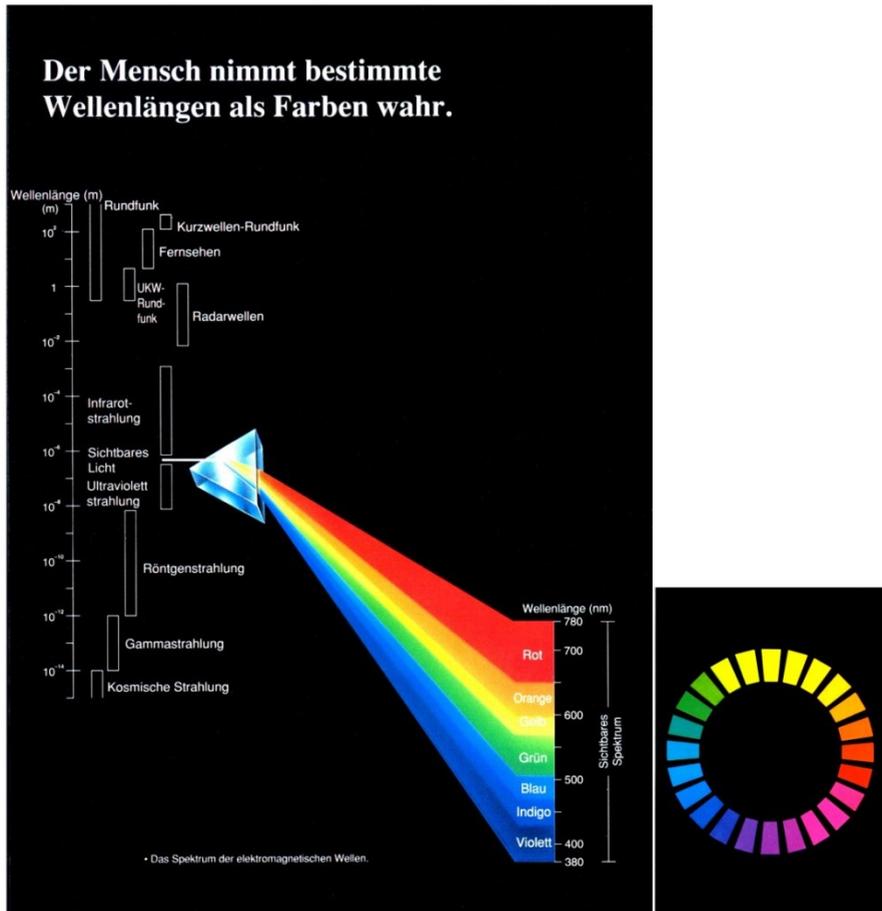


Abb. 2.2.-2 Der Brechungsindex der Lichtanteile hängt maßgeblich von ihrer Wellenlänge ab. Er nimmt vom Roten zum Blauen hin zu, sodaß rotes Licht stärker als das Blaue gebrochen wird. Die Darstellung dieser sogenannten Dispersion nimmt Bezug auf die Dualität, also sowohl auf den Strahlungs- als auch auf den Wellencharakter des Lichtes. Licht ist der durch den Menschen wahrnehmbare Bereich elektromagnetischer Wellen. Ein schwingender Dipol gibt eine solche elektromagnetische Welle, deren beide Feldstärken senkrecht zueinander und quer zur Ausbreitungsrichtung zu liegen kommen, ab. Es wird also eine Kombination aus elektrischem und magnetischem Wechselfeld gleicher Frequenz abgestrahlt. Das Licht erstreckt sich lediglich auf einen beschränkten Bereich dieser elektromagnetischen Strahlung. Der durch den Menschen sichtbare Bereich liegt zwischen den Wellenlängen 380–780 nm. (Fotoquelle linkes Bild: Minolta 1996). Farbkreis nach Newton (rechts; Bildquelle: Richter 1981).

Newtons Versuche belegen, daß die Farben nicht erst an der Oberfläche der bestrahlten Objektfläche entstehen, sondern bereits im Licht enthalten sind (Preston 1980). 1758 versuchte der deutsche Mathematiker *Tobias Mayer* (1723–1762) die Zahl der Farben zu bestimmen, die das Auge exakt unterscheiden kann. Sein Farbdreieck wurde erst 1775 nach seinem Tode auf Anregung von *Johann Heinrich Lambert* (1728–1777) durch den Göttinger Physiker *Georg Christoph Lichtenberg* (1742–1799) veröffentlicht (Mayer 1775). Das Farbdreieck enthält die basalen Farben Zinnober, Königsgelb und Bergblau. Schwarz und Weiß bilden Licht und Finsternis und hellen die Farben auf oder verdunkeln sie. Im gleichen Zeitraum entstanden Farbsysteme von dem Kupferstecher und Entomologe *Moses Harris* (1731–1785), beschrieben in „Natürliches System der Farben“, welches aus einem prismatischen Kreis („prismatic“), aus Primärfarben (Rot, Gelb, Blau) und einem Mischfarbenkreis („compound“) besteht, in deren Zentrum Harris das demonstriert, was wir heute die subtraktive Mischung der Farben nennen: Überlappung der drei Grundfarben Rot, Gelb, Blau zu Schwarz und zu allen anderen Farbtönen nach der Entdeckung Jacques Christopher Le Blons‘ (1667–1741). Von *Ignaz Schiffermüller* (1772) stammt ein in 12 Segmente unterteilter, mit der zusätzlichen Grundfarben Grün versehener Kreis (Orange und Violett fehlen hier aufgrund der Tatsache, daß *Schiffermüller* diese Farben zu schwach erschienen) und von dem Astronom *Johann Heinrich Lambert* (1728–1777) 1772 das erste an *Tobias Mayer* (1723–1762) orientierte dreidimensionale Farbsystem – eine dreieckige Pyramide, welche im Zentrum des Basisdreiecks Schwarz, an den Eckpunkten die Grundfarben trägt und in sieben Etagen nach oben bis zu einer weißen Spitze heller wird (*Silvestrini* 1994).

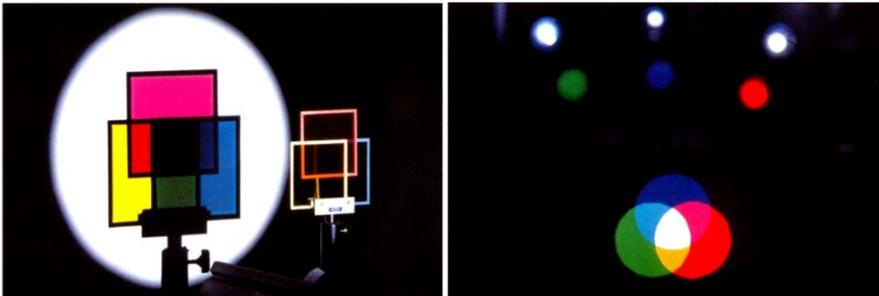


Abb. 2.2.-3 Subtraktive Farbmischung (links) als physikalischer Mechanismus der Farbenentstehung: Zu sehen sind drei Farbscheiben, welche als Filter dienen. Das weiße Licht wird durch die unterschiedlich eingefärbten Gläser in den bestimmten spektralen Bereichen absorbiert, andere spektrale Bereiche werden hindurchgelassen. Der Gelbfilter läßt so oranges, gelbes und grünes Licht, ein Blaufilter grünes, blaues und violettes und der Rotfilter die Rottöne des Lichtes hindurch. Wird mit blauem und gelbem Glas gefiltert, tritt lediglich grünes, wird mit rotem, gelbem und blauem Glas gefiltert, tritt kein nennenswertes Licht mehr hindurch. Dieser Effekt ist bei der Mischung von Farben relevant. Hierbei fungieren die Pigmente der Malfarben als Farbfilter und die spektrale Reflexion ergibt sich aus den nicht absorbierten spektralen Anteilen des zuvor auf die Farbprobe einfallenden Lichtes. Additive Farbmischung (rechts) als physiologischer Mechanismus. Trifft auf eine Netzhautstelle, hier repräsentiert durch eine Leinwand, Licht verschiedener Wellenlängen, so entsteht additive Farbmischung. Ist nun dieses Licht monochromatisch, also ist der Wellenbereich stark eingeschränkt und dieses Licht einer Farbe zuzuordnen, lassen sich durch ihre Mischung Farbtöne erzeugen, welche den Farbtönen eines anderen Wellenlängenbereiches entsprechen. Auch bei der Betrachtung pointillianischer Bilder mit entsprechender Beobachtungsdistanz kommt dieser Effekt zum Tragen (Bildquelle: *Harten* 1993).

Der elsässische Mathematiker und Naturforscher *Johann Heinrich Lambert* gilt unter Physikern als der Begründer der Lehre von der Lichtmessung, die damals noch als „Photometria“ bezeichnet wurde, stellte 1760 die heute nach ihm benannten Entfernungsgesetze der Beleuchtungsstärke auf, behandelte das Reflexionsvermögen und die Durchlässigkeit von Oberflächen.

Später (1809) widmete *James Sowerby* dem großen Sir Isaak Newton ein Werk mit dem vollständigen Titel „Eine neue Erläuterung der Farben, ursprüngliche, prismatische und materielle; Nachweis ihrer Konkordanz in den drei Primärfarben Gelb, Rot, und Blau; und die Wege, sie zu Produzieren, zu messen und zu mischen; mit einigen Beobachtungen über die Genauigkeit von Sir Isaak Newton“; zur gleichen Zeit präsentierte der englische Arzt und Physiker Thomas Young (1773–1829) seine heute bestätigte Theorie („Theorie of trichromatic vision“), der zufolge das Auge durch die Wahrnehmung von nur drei Wellenlängen alle Farben kombinieren kann und die auf den additiven Primärfarben Rot, Grün, Blau basiert und *Johann Wolfgang von Goethe* beschrieb in seiner Schrift „Zur Farbenlehre“ (1810) ein kreisförmiges Diagramm ebenfalls mit den drei Primärfarben Gelb, Blau, Rot (Purpur), ergänzt durch und in Abwechslung mit den drei Sekundärfarben (Orange, Violett, Grün). Der grün-gelb-rote Halbkreis wird als „Plusseite“, das Gegenstück als „Minusseite“ bezeichnet. Goethe versuchte das zerlegende newtonsche System zu überwinden und über die Einsicht in die sinnlich-sittliche Wirkung der Farben die ästhetische Seite aus dem Durcheinander in eine Ordnung und zum Ganzen zu führen. Er begriff das Kolorit in Kategorien des Mächtigen, des Sanften und des Glänzenden (*Sölch* 1999). Er erkannte bereits, daß warme Farben wie Rot oder Gelb emotional den kalten wie Blau oder Grün vorgezogen werden (*Rinn* 1985). In demselben Jahr (1810), wie Goethes Schrift erschienen war, war es dem Maler *Philipp Otto Runge* (1777–1810) noch in seinem Todesjahr möglich, das Werk über eine „Farbkugel“ der Fachwelt vorzustellen: Entlang ihres Äquators trägt die Kugel reine Farben. Ausgangspunkt sind dabei die subtraktiven Primärfarben (Rot, Gelb und Blau), die in gleichen Abständen voneinander gezeichnet sind, in denen jeweils drei Mischfarben erscheinen. Die Pole werden durch Schwarz und Weiß gebildet. Runge suchte und fand einen idealen Farbkörper in der Kugel, um die Harmonie von Farben zu veranschaulichen und eine Ordnung in die Gesamtheit der möglichen Farben zu bringen (*Matile* 1979). Ausgehend von der Theorie *Thomas Youngs* und Überlegungen von *Philipp Otto Runge*, bei denen sich alle Farben aus den Grundfarben mischen lassen, unterscheidet hingegen *Charles Hayter* in seinem scheibenförmigen Kompendium des Jahres 1926 nicht zwischen additiven Mischungen und subtraktiven Mischungen von Pigmenten. Schon *Leonardo da Vinci* hatte bemerkt, daß Farben sich gegeneinander beeinflussen, wenn man sie nebeneinander betrachtet; Goethe war es, der auf diese Farbkontraste aufmerksam machte und der französische Chemiker und Direktor der berühmten Gobelin-Teppichmanufaktur *Michel Eugène Chevreul* (1786–1889) hatte, um ihre Gesetzmäßigkeiten zu erkennen, einen 72-teiligen Farbkreis konstruiert, dessen Radien drei Primärfarben (Rot, Gelb, Blau), drei primäre und sechs sekundäre Mischfarben enthalten. Die Radien werden in zwanzig Abschnitte, die Sektoren weiterhin in fünf Zonen unterteilt. Der auf 1839 datierte Farbkreis sollte helfen, der Ästhetik eine systematische Grundlage zu verleihen. Sein auf Probleme der Färberei bezogenes Werk „De la loi du contrast simultane des couleurs“ behandelt den sogenannten Simultankontrast und erfaßt aus heutiger Sicht die aktive Rolle des Gehirns bei der Entstehung von Farben. Ein Farbkreis wie der von *Chevreul* ist auch Inhalt des Buches von *George Field* (1846). In „Chromatics“ schloß er scheinbar an die Arbeiten von *Jakob Christoph le Blon* an, erklärte allerdings auch Orange, Grün und Purpur zu den Primärfarben. Sekundärfarben und Tertiärfarben entstehen durch ihre kontinuierliche Mischung. Um die Begreifbarkeit der Farben bemüht, verband der englische Chemiker *George Field* (1777–1854) Farben mit Bedeutungen: Heiß und kalt sowie das Vorrücken und Zurückziehen stehen sich als Gegensätze unversöhnlich gegenüber; Zusammenhänge, die er zwischen Farben und Tönen sah, erläuterte er in seinem Frühwerk, einem Essay über die „Analogie und Harmonie der Farben“ aus dem Jahre 1817. 1835 folgte eine zweite Abhandlung über „Farben und Pigmente“ („Chromography“) und schließlich 1850 die „Grammatik der Farbgebung“ („A Grammar of Colouring“).

Den Grundstein der Farbmessung (Colorimetrie) und des subjektiven Farbvergleichs legte allerdings erst der schottische Physiker *James Clerk Maxwell* (1831–1879) in seiner „Theorie des Farbsehens“. Er zeigte, daß alle Farben durch Mischungen der drei Spektralfarben zustande kommen können, charakterisierte die Lichtausbreitung und wies auf die Existenz elektromagnetischer Wellen hin (s. Abb. 2.2.-2). Sein Farbdreieck, an den Ecken versehen mit den Spektralfarben (Rot, Grün, Blau) und im Zentrum Weiß, läßt die Mischungen zwischen den Extrema bestimmen oder vorhersagen. In einem Versuch zur Farbmessung (colour box) hatte Maxwell Probanden Farben mit Farbmischungen aus diesen Grundfarben vergleichen lassen („colour match“) (*Maxwell* 1855–57, 1860). *Maxwells* Fortschritt gegenüber Newton war es, daß er eine geometrische Beziehung knüpfte, bei der die Abstände zwischen den Farben in seinem Dreieck eine auf psychophysikalischen Messungen basierende Bedeutung besitzen und daß er zudem die Farbcharakteristika Farbton („Hue“), Farbsättigung („tint“) und Helligkeit („shade“) einführt und charakterisierte (s. *Everitt* 1975). In Anlehnung an Thomas Young vertrat auch der Naturwissenschaftler *Hermann von Helmholtz* (1821–1894) die Dreifarben-theorie, wich jedoch von *Maxwells* gleichzeitigem Konstrukt aufgrund seiner Auffassung, daß die Spektralfarben unterschiedliche Abstände vom Weiß haben müßten (Zentrum des Farbdreiecks), ab. Er versuchte zunächst die Spektralfarben auf einer gebogenen Linie und später in Anlehnung an Newton und Young in ein Kreis-Dreieck-System einzuordnen. In seinem berühmten „Handbuch der physiologischen Optik“ von 1860 fanden ebenfalls die noch heute gültigen Variablen Farbton, Sättigung und Helligkeit Erwähnung. Farbton und Sättigung sind ein Ausdruck der Farbqualität, die Helligkeit steht für die quantitative Komponente. Nicht zuletzt von Mayer, Runge und Chevreul beeinflusst, sah der Architekt *William Benson* 1868 im 7. Kapitel seiner „Principles of the Science of Color“ im Würfel das „Natürliche System der Farben“. In einem Kubus sollen additive und subtraktive Farbmischung in einem Farbsystem vereinigt werden. Ein Farbkegel, dessen Grundkreis in 12 unterschiedlich große Segmente eingeteilt ist, wurde 1874 in „Farblehre“ mit Blick auf die Kunst und das Kunstgewerbe von dem Münchener Meteorologieprofessor *Wilhelm von Betzold* (1837–1907) vorgeschlagen und *Ewald Hering* (1834–1918) ergänzte 1878 in der „Lehre vom Lichtsinn“ die elementaren Farben der Dreifarben-theorie durch das Gelb, begründete die Vierfarben- und Opponententheorie, die er als „das natürliche System der Farbempfindung“ bezeichnete, welches 1966 neurophysiologisch bestätigt wurde. *Herings* Konstrukt besteht aus vier einander überschneidenden, opponierten Elementarfarben, deren Farben sich an den kongruenten Stellen der Ringe mischen (*Hering* 1878). Auf den Gesetzen des Simultankontrastes von *M. E. Chevreul* und Vorstellungen der optischen Mischung nach Eugene Delacroix basieren die sechs in einem Kreis befindlichen Dreiecke (1879) des französischen Kunstschriftstellers *Charles Blanc* (1813–1882), in denen sich die additiven Primärfarben mit Sekundärfarben (Orange, Grün, Violett) abwechseln und den Kontrast der Farben für den Künstler sichtbar werden lassen sollen (1879). Hingegen verfolgte in „Modern Chromatics“ von 1879 *Nicholas Odgen Rood* (1831–1902) neben einem aus eher künstlerischer Sicht begründeten Ansatz in Form eines Doppelkegels auch einen aus wissenschaftlich-technischer Sicht auf James C. Maxwell fußenden Aussagen und auf Farbscheiben-Versuchen (kreisförmiges Farbsystem) basierenden Ansatz (*Silvestrini* 1994).

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts hielt die Psychologie in die Wissenschaft Einzug. Mit der „Physiologischen Psychologie“ verbinden sich Namen wie *Wilhelm Wundt* (1832–1920) mit seiner Farbenkugel von 1874 und seinem Farbkegel von 1893 sowie Alois Höfer (1853–1928), ein österreichischer Philosoph und Pädagoge, der, um eine Verbindung zwischen dem Sehen von Farben und ihrer psychologischen Wirkung zu erkennen, zwischen 1883 und 1897 zwei Doppelpyramiden schuf, die in viele Lehrbüchern der Psychologie übernommen wurden. Eine vergleichbare Doppelpyramide des Psychologen *Hermann Ebbinghaus* gewann zu Beginn des 20. Jahrhundert zunehmend an Anhängerschaft.

Ein sehr weitverbreitetes und heute noch insbesondere in angelsächsischen Ländern genutztes Farbsystem wurde zwischen 1905 und 1916 von dem amerikanischen Maler *Albert Henry Munsell* (1858–1918) entwickelt. Zunächst noch unter dem Einfluß von *N. O. Roods*, veröffentlichte

Munsell 1905 in „A Color Notation“ eine Farbkugel, später erschien aufgrund seines Bestrebens, jeder Farbabstand müsse mit jedem benachbarten gleich groß wirken, 1915 in seinem „Color Atlas“ der von ihm sogenannte „Color tree“ („Farbbaum“).

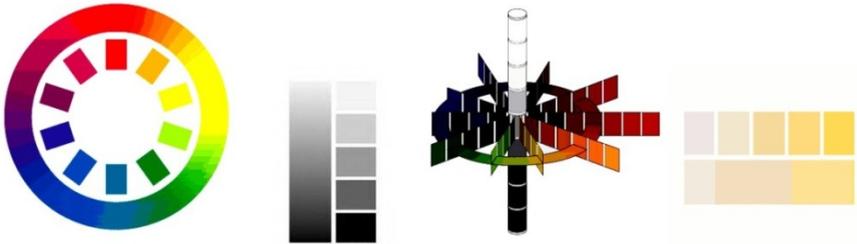
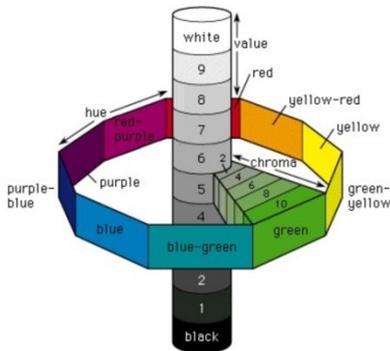


Abb. 2.2.-4 Hue (links) und Value (linke Mitte) nach „The Munsell System of Color Notation“. Farbraum (rechte Mitte) und Chroma (rechts) nach Munsell.

Bei diesem Farbbaum wird der Stamm durch die verschiedenen Graustufen gebildet. Das von Munsell geschaffene System besteht aus einem zehnteiligen Kreis auf, dessen Farben in gleichen Abständen angeordnet sind und bei dem gegenüberliegende Paare sich zu Unbunt mischen lassen (Kompensativität). Die Parameter des „Baumes“ werden von Munsell als „Hue“ (der Farbton), „Value“ (der Index für die Helligkeit) und „Chroma“ (die Stufen der Sättigung) bezeichnet (Munsell 1966).



©1994 Encyclopaedia Britannica, Inc.



Abb. 2.2.-5 Munsell Color Solid (links) und der Munsell-Farbraum (Bildquelle rechts, X-Rite 2000).

Die senkrechte Value-Skala enthält zwischen Schwarz und Weiß zehn Stufenschritte, die Munsell mit einem selbstkonstruierten Photometer, durch das er die Reflexion erfaßte, festlegte. Munsell positionierte nun um den „Stamm“ Farbproben Rot (Red, R), Gelb (Yellow, Y), Grün (Green, G), Blau (Blue, B) und Purpur (Purple, P) von einem Grauton seines Wertes gleich weit entfernt und stellte fünf Mischungen hinzu (Gelbrot, Grüngelb, Blaugrün, Purpurblau, Rotpurpur). Allen 10 Hauptfarben wurde Chroma 5 in der nach oben offenen Chromaskala zugewiesen. Nach Munsells Tod im Jahre 1929 erschien die heute noch gültige Fassung „Munsell Book of Color“, die 1942 von der Organisation „American Standards“ zur Farbspezifikation von Oberflächen empfohlen wurde (Munsell 1966). Das System von Munsell fand in unzähligen Veröffentli-

chungen Erwähnung. Beispielsweise wird für zahnmedizinische Zwecke die Farbkugel bei *Mc Lean* (1978) beschrieben und in Form eines Zylinders mit einer Vielzahl aufeinandergereihter Wagenräder von *Sproull* (1973) modifiziert. Der Farbton wäre hierbei um die Felgen angeordnet, die Sättigung verändert sich entlang der Speichen, die Achse bestimmt die Helligkeit. Auf einer Reise 1905 durch die USA lernte der spätere Chemie-Nobelpreisträger und Professor an der Universität Leipzig Wilhelm Ostwald (1853–1932) Munsell kennen und ließ sich von dem Maler für die Farbenlehre begeistern. Er war davon überzeugt, daß Farbharmonie und die angenehme Empfindung bei einer Farbmischung immer im Zusammenhang mit einer Farbordnung stehen, und schlug 1916/17 in seiner Farbfibel eine Doppelpyramide vor. Ostwald wählte im Gegensatz zu Munsell die Farbparameter Farbgehalt, Weißgehalt und Schwarzgehalt und führte den Ausdruck „Vollfarbe“ ein. Ostwald entwarf einen Farbkreis mit 24 Vollfarben, jeweils durch Grautöne abgestuft, und formuliert seine Farbenlehre wie folgt: „Die allgemeinste Mischung ist die Mischung aus Vollfarbe Weiß und Schwarz und jede Pigmentfarbe läßt sich durch Angabe von Farbgehalt, Weißgehalt und Schwarzgehalt charakterisieren“ (*Ostwald* 1923–1924, 1963, *Hönl* 1954). Er unterscheidet zwischen bunten und unbunten Farben.

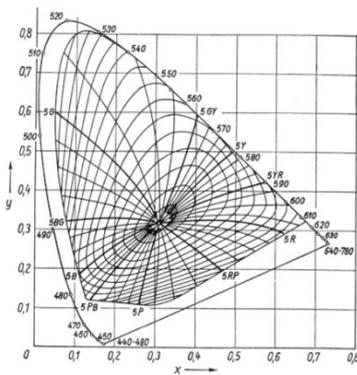


Abb. 2.2.-6 Buntton-(Hue-)Linien und Buntheits-(Chroma-)Linien des Munsell-Farbsystems in der Farbtafelenebene für Value 5 nach „Book of colors“ (Richter 1981).

Demgegenüber zeichnete der kanadische Maler *Michel Jacobs* in „Die Farbe der Kunst“ (1923) und von dem *W. v. Bezold* des Jahres 1873 inspiriert einen Farbkreis mit den Farben Rot, Grün und Blauviolett, und die Physiker *R. Luther* und *N. D. Nyberg* versuchten, das letzte subjektive Moment abzuschaffen und durch ein mathematisch objekti-

ves System zu ersetzen, und publizierten in den Jahren 1927 und 1928 mit dem Blick auf die Frage, welcher Körper entsteht, wenn man Pigmentfarben in ein theoretisches Konstrukt („Farbraum“) einbringt, den sogenannten „Farbenbaum“ (*Nyberg* 1928, 1933). Indem Farben durch Zahlen gekennzeichnet, Farben zueinander in Beziehung gesetzt und so meßbar werden, begründeten sie die Farbmeterik im engeren Sinne. Luther und Nyberg bildeten eine kreisförmige Ebene über die zwei Dimensionen – sogenannter Farbmomente – und spannten den Farbraum mit der dritten Dimension, einer senkrecht zur Ebene verlaufenden Koordinatenachse, welche den Hellbezugswert L^* (Schwarz/Weiß) trägt, auf. Die Farbmomente kennzeichnen technisch nachweisbar die unterschiedlichen Farbarten, der Hellbezugswert L^* charakterisiert die Helligkeit der Körper. Aus den Jahren 1924 und 1929 stammen ein Farbkörper von *Arthur Pope* (1880–1974), einem amerikanischen Farbentheoretiker, gebildet aus Dreiecken in Form eines Doppelkegels, und ein aufgrund phänomenologischer Analysen entstandenes doppelpyramidiges System von *Edwin G. Boring* (1929). Der amerikanische Psychologe *Boring* setzte an die Spitzen der Pyramiden Schwarz und Weiß und versah die Eckpunkte des Pyramidenbodens mit den vier Urfarben. Optimalfarben sind theoretische Konstrukte: Läßt ein Körper bei vorgegebener Wellenlänge alles Licht hindurch oder hält alles Licht fest (Transmission) oder reflektiert alles Licht (Remission), so besitzt er eine Optimalfarbe. Kein Pigment oder Farbstoff kann diese Optimalfarbe erreichen. Der sogenannte „Farbenberg“ des Physikers *Siegfried Rösch* des Jahres 1928, welcher im „Inneren“ der Grenzen die realisierbaren Farben enthält, entsteht, wenn man über den Farborten senkrecht der CIE-Normtafel (s. u.) die Hellbezugswerte der entsprechenden Optimalfarben aufträgt (*Silvestrini* 1994).

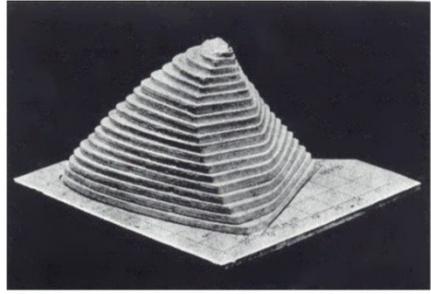
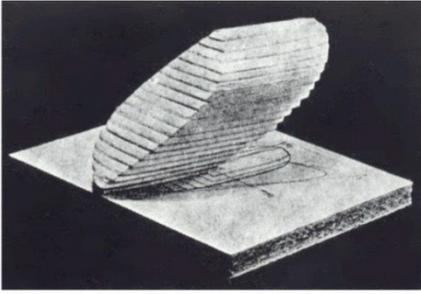


Abb. 2.2.-7 Farbkörper nach Luther und Nyberg (links) waagerechte Koordinaten $M1=X'-Y'$; $M2=Y'-X'$, senkrecht Optimalfarben-Hellbezugswert A. Farbkörper nach Rösch (rechts) Koordinaten waagerecht x, y ; senkrecht A. (Richter 1981).

Man kann festhalten, daß Optimalfarben unter den Farbvalenzen jeweils der gleichen Farbart die hellsten und unter den Farbvalenzen von jeweils gleicher Helligkeit die gesättigten sind. Um nun auch die Farbe einer objektiveren Auswahl und Beschreibung zuführen zu können, waren mehrere Entwicklungen hilfreich: Bereits zum Ende des 19. Jahrhunderts konstruierte Joseph Lovibond, ein Bierbrauer aus England und Begründer der Firma Tintometer 1885 (heute einer der führenden Hersteller von Farbmeßgeräten) und der Lovibond®-Farbskala, den Tintometer, eine einfache Apparatur, basierend auf subtraktiver Farbmischung, bei der eine Vergleichsfarbe durch Hintereinanderschaltung von Farbgläsern mit unterschiedlichen Bunttönen und systematisch abgestufter Dichte durch subjektiven Vergleich eine Farbmessung ermöglicht. Nicht zuletzt Wilhelm Ostwald (s. o.) gab dem jungen Carl Pulfrich von Carl Zeiss Jena (1923) den Anstoß zu dem Stufenphotometer, welches urkundlich als Referenzgerät gilt, mit welchem 1927 in Deutschland die RAL-Farbkarte für Fahrzeuganstriche gemessen worden ist. Anfang der 30er-Jahre des 20. Jahrhunderts kam ein Meßgerät auf den Markt, mit dessen Hilfe man durch additive Mischung dreier Farbvalenzen der zu erfassenden Farbe subjektiv nahekommen sollte (Dreifarbenmeßgerät nach *Guild-Beckstein-Richter*) (Beck 1958). Die Apparaturen nach Lovibond und Guild-Beckstein-Richter sind dem Gleichheitsverfahren zuzuordnen, bei dem die zu bewertenden Proben mit Farbreferenzen visuell verglichen werden (vgl. Abgleich zwischen Standardfarbmustern und zu bewertender Farbprobe in Form der Farbringenanwendung in der Zahnmedizin und *Maxwells color-match*). Das erste und noch heute vielfach verwendete registrierende Spektralphotometer, von A. C. Hardy (1929) entworfen (Hardy 1936) und seinerzeit von General Electric vertrieben, war Ausgangspunkt zahlreicher späterer Entwicklungen bei Unternehmungen wie Bausch & Lomb (Rochester, N. Y./USA), Meß-Instrumenten-Technik (München/Deutschland), Pretema (Birmensdorf bei Zürich), C. Zeiss (Oberkochen/Deutschland), Dacolor (Dietlikon bei Zürich/Schweiz), Lerès (Paris/Frankreich), Dr. Lange, Diano Corporation, Minolta und vielen anderen. Beispielsweise entwickelte E. Rohmer in der Schweiz (Patent 1959) das industrielle Farbmeßgerät „Spektromat FS2“ für die Firma Pretema AG. Hier muß allerdings zwischen dem Dreibereichsverfahren (Tristimulus-Methode), bei dem das von einer Probe reflektierte Licht über drei der Augenempfindlichkeit angepaßte Farbfilter in seine Rot-, Grün-, Blauanteile zerlegt und die jeweilige Intensität mit Photoelementen gemessen wird (Meßsignal je nach Farbfilter X, Y, Z, die Reflexionsgrade R_x, R_y, R_z), und dem Spektralverfahren, bei dem das zu registrierende Licht mittels Konkavgitters in seine spektralen Anteile zerlegt und der Reflexionsgrad der Probe im Wellenlängenbereich von 380 bis 720 nm, je nach Auflösung des optischen Systems in 10 nm oder 20 nm schrittweise gemessen wird, unterschieden werden (Richter 1981).

$$\begin{aligned} X &= a \cdot R_x + b \cdot R_z \\ Y &= R_y \\ Z &= c \cdot R_z \end{aligned}$$

(2.2.-1) Als Meßsignal aus den Photoelementen des Dreibereichsverfahrens erhält man die Reflexionsgrade R_x , R_y und R_z . Hieraus lassen sich die Normfarbwerte errechnen.

$$\begin{aligned} X &= k * \int_{\lambda=380}^{720} S(\lambda) * \bar{x}(\lambda) * \beta(\lambda) * d\lambda & Y &= k * \int_{\lambda=380}^{720} S(\lambda) * \bar{y}(\lambda) * \beta(\lambda) * d\lambda \\ Z &= k * \int_{\lambda=380}^{720} S(\lambda) * \bar{z}(\lambda) * \beta(\lambda) * d\lambda & k &= \frac{100}{\int_{\lambda=380}^{720} S(\lambda) * \bar{y}(\lambda) * d\lambda} \end{aligned}$$

(2.2.-2) Beim Spektralverfahren lassen sich X, Y, Z aus der Normlichtart S, den Normspektralwertfunktionen \bar{x} , \bar{y} und \bar{z} und den gemessenen Reflexionsgraden (β) errechnen. Der Faktor k dient der Normierung des Normfarbwertes Y für Idealweiß (Dr. LANGE 1998).

Die ersten serienmäßigen Entwicklungen von Meßinstrumenten, welche dem Dreibereichsverfahren zugeordnet werden können, sind der Colormaster von der Manufacturers Engineering and Equipment Corp. (Hatboro, PA/USA), Apparaturen von Gardner (Bethesda, Maryland /USA), von Neotec Instruments (Rockwell, Maryland/USA), von der Canadian Research Corporation (Ottawa, Ontario/Kanada), Meßgeräte wie der RFC 3 (C. Zeiss, Oberkochen/Deutschland), der Color Eye (Kollmorgen I.D.L. Division, Attleboro, Mass./USA), der Momcolor (Ung. Opt. Werke, Budapest/Ungarn), die Hunter-Apparatur (Hunter 1958; Hunter Associates Laboratory, Fairfax Virg./USA). Allerdings sei an dieser Stelle angemerkt, daß das Spektralverfahren aufgrund der höheren Anzahl der Meßpunkte (35 Einzelreflexionswerte) im Vergleich zu den drei Werten (R_x , R_y , R_z) des Dreibereichsverfahren als das Überlegene gilt und wegen der Möglichkeit zur Spektralanalyse und zur Verarbeitung der Ergebnisse unter verschiedenen Normlichtarten und Beobachtungswinkeln in der Fachwelt ein höheres Ansehen genießt. Farbsysteme beispielsweise nach Albert Henry Munsell oder Wilhelm Ostwald oder mathematische Konstrukte zeigten nun ihre Grenzen und als dann der Wunsch der Fachwelt in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts nach weitergehender und höherer Präzision und Objektivierbarkeit laut wurde, sollte ein Rahmen für Farbmessungen (Colorimetrie) diese Genauigkeit erzielen, indem ein Farbdigramm geschaffen wurde, daß auf sinnesphysiologischen Messungen beruht. Eine solche „Normtafel“ oder „Standard Valenz System“ wurde 1931 auf internationaler Ebene von der *Commission Internationale de l'Éclairage (CIE)* vereinbart. Sie stellt eine Farbkennzeichnung auf Basis der additiven Lichtmischung dar und geht auf Maxwells Farbmessungen und Dreieckskonstruktion zurück. Grundlage des Systems war der indirekte subjektive Vergleich einer Farbe mit der Mischung dreier Elementarfarben (Dreifarbenwert „tristimulus value“) durch einen Probanden (colour match). Man fand heraus, welche Anteile des Lichtes bei einer bestimmten Wellenlänge wahrnehmbar sind. Versuche dieser Art wurden vor allem in England der 20er-Jahre des letzten Jahrhunderts von W. D. Wright und J. Gould durchgeführt, in welchen man auf diese Weise Spektralwertkurven („Colour matching functions“) erstellte, indem normal-sichtige Personen monochromatisches Licht von immer der gleichen Energie einer Primärfarbe zuordnen sollten (vgl. [Terstiege 1968]). Mittelwerte eines „Standardbeobachters“ aus den sich ergebenden Dreifarbenwerten (R, G, B bzw. X, Y, Z), aufgetragen auf die Wellenlängen, ergaben so die Spektralkurven. Der Helligkeitswert Y gibt das Verhältnis zwischen zurückgeworfenem und einfallendem Licht in Prozent an (eine Weißplatte hat 100 % Reflexion) (Wright 1927/28, 1969, Richter 1981).

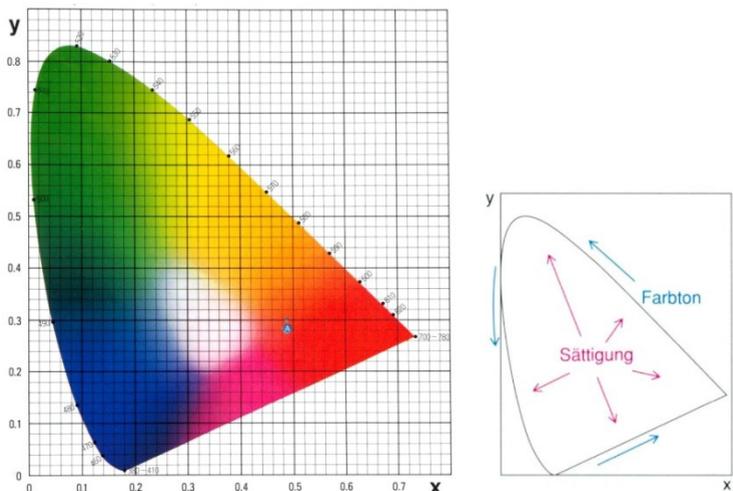


Abb. 2. 2.-8 x, y-Normtafel nach CIE 1931 (Bildquelle: Minolta 1996).

Jeder Farbton verändert sich, wird er bei unterschiedlichem Licht oder variierender Lichtintensität betrachtet (Farbverzerrung). So kann es sein, daß zwei in ihrer spektralen Reflexionskurve völlig verschiedene Körper aufgrund deren Integrale, die sich jeweils unter einer bestimmten Lichtart zu gleichen Werten aufaddieren, unter der einen Lichtart gleichfarbig und unter einer anderen aufgrund differenter Integralsummation unterschiedlich in der Farbe erscheinen (Metamerie). Metamerie wird durch den Metamerie-Index (M) nach *DIN 6172* repräsentiert, welcher den Farbabstand zwischen zwei Proben, der durch Lichtartenwechsel entsteht, beschreiben hilft. Je kleiner der Metamerie-Index, desto besser ist die Farbübereinstimmung der Proben. Nach *CIE* sollen Farbproben so unter durchschnittlicher Tagesbeleuchtung (C – 6.774 Kelvin ohne ultraviolette Strahlung, bläuliche Farbe), künstlicher Lichtquelle (100-Watt-Glühlampe, Normlicht A – 2.856 Kelvin, Glühlampe mit gelboranger Farbe, 380–770 nm), Sonnenlicht am Mittag (B – 4.870 Kelvin) oder bei mittlerem Tageslicht nach *DIN 6173 Teil 2* betrachtet werden. Heutzutage ist das durchschnittliche Tageslicht nach *CIE 1931* zu Gunsten der Anwendung des Normlichtes D65 („daylight“ mit einer Farbtemperatur von 6504 Kelvin einschließlich der im nahen UV-Bereich, bei Wellenlängen von 300–400 nm und einer dem natürlichen Sonnenlicht entsprechenden ultravioletten Strahlungsintensität; 300–830 nm, *DIN 6173*) in Europa und des Normlichtes D75 in Amerika (*Küppers* 2000) verdrängt worden. Die Zahlen in Kelvin geben die Temperaturen an, die mit dem Licht, welches ein erhitzter schwarzer Körper abstrahlt, verknüpft sind. Niedrige Temperaturen, wie z. B. 2.400 K, entsprechen dem Rot, höhere Temperaturen, wie 3.000 K, dem Gelb und 9.300 K entsprechen dem Blau, und die Temperatur von neutralem Weiß liegt bei 6.504 K (entsprechend Normlicht D65). Preston erkannte hier die Gegensätzlichkeit zwischen der Lichttemperatur und der Farbemotion, welche eher die Farben Rot und Gelb mit wärmeren Temperaturen aufgrund jahrtausendelanger Erfahrungen (Feuer = angenehme Wärme) und die Farbe Blau mit Eis und Kälte assoziieren läßt (*Preston* 1980). Um nun eine leicht erfaßbare Farbkarte zu erstellen, mußte die *CIE* dem Farbraum die dritte Dimension nehmen: Die drei seinerzeit standardisiert mittels Lichtart C und Normbeobachter 2° gemessenen Werte X, Y, Z werden so zu x, y, z (*CIE 1931*), jede Zahl kann durch die Summe aus allen Parametern geteilt werden ($x = X / (X + Y + Z)$) und die Summe aller Farbgewichte ergibt Eins ($x + y + z = 1$). Die waagerechte Achse verleiht sich so die Werte für x ein und die senkrechte Achse nimmt die Werte für y auf. Das Standarddiagramm entsteht durch die Linie, welche die Punkte der umgerechneten Dreifarbenwerte „tristimulus values“ für die verschiedenen Wellenlängen verbindet.

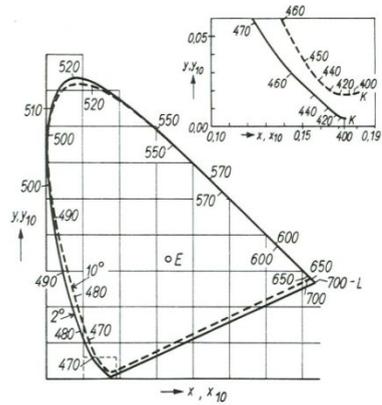
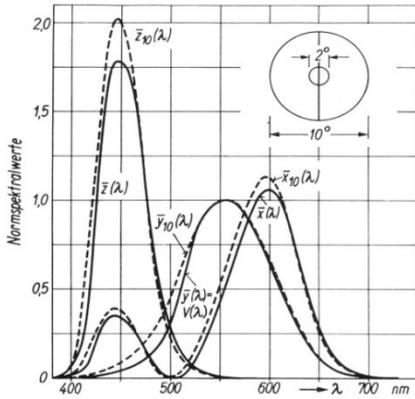


Abb. 2.2.-9 Abhängigkeit der Farbwarnnehmung von dem Normbeobachtungswinkel und der daraus resultierenden Rezeptionsfläche. 2°-Beobachtungswinkel bedeutet Rezeption im Sinne von photopischem und 10°-Beobachtung im Sinne von skotopischem Sehen. In den Normbeobachtungswinkeln begründete Variation der Spektralwerte und der Normfarbtafel. Die Normfarbtafel für den 2°-Normbeobachter ist durchgezogen, die des 10°-Normbeobachters gestrichelt gedruckt (Bildquelle: Richter 1981).

$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

(2.2.-3) Formeln als Basis der Normfarbtafel CIE 1931.

(Spektrallinienzug des sichtbaren Lichtes zwischen den Endpunkten 770 nm und 450 nm). Mischt man das Licht der Endpunkte der Spektrallinie miteinander, so entsteht Purpur. Die Verbindung der Endpunkte wird auch Purpurlinie bezeichnet (Adams 1942).

Ein weiteres System, welches die vom Farbton abhängige subjektive Empfindung der Farbstände zueinander berücksichtigt und dem später (1976) veröffentlichten CIELAB-System ähnelt, entwickelte R. S. Hunter bereits im Jahre 1948. Eine Unterscheidung von kalten und warmen Farben nahm der amerikanische Kunsthistoriker *Faber Birren* (1900–1988) in seinem einen Farbenkreis (1934) vor und versah 1937 Farbendreiecke mit Zahlenpaaren; unterdessen erforschte der schwedische Physiker Tryggve Johansson die Sinneswahrnehmung und schuf einen Farbenkörper, der sich auf *Hering* bezog: einen modifizierten Zylinder mit den Grundfarben Gelb, Grün, Blau, Rot. Die zu Helmholtz' Zeiten notwendige Gesichtsfeldgröße, welche ein rein foveales, von den Stäbchenzellen, den hell-dunkel-empfindlichen Rezeptoren der Netzhaut für das Sehen von Schwarz, Weiß und Grautönen des dunkeladaptierten Auges unbeeinflusstes Farbensehen ermöglichen sollte, wurde bei 2° (CIE 1931) festgelegt und war auch in den Apparaturen, die *Guild* und *Wright* 1931 zur Spektralwertbestimmung nutzten, fest eingebaut. Die Tatsache, daß wir einen Körper oder eine Fläche in der Praxis selten unter einem so kleinen Gesichtsfeld betrachten, war später von der CIE zum Anlaß genommen worden, im Jahre 1964 ein zweites Normvalenzsystem vorzustellen, das auf Spektralmessungen von *W. S. Stiles* und *N. I. Speranskaja* beruht, die unter einem Gesichtsfeld von 10° („farbmetrischer Großfeld-Normalbeobachter 1964“ – Großfeldvalenznormsystem) entstanden sind (Speranskaja 1959). In *DIN 5033, Teil 2* wird die spektrale Empfindlichkeit der drei Zapfenarten (Rot-, Grün- und Blauempfindlichkeit) des helladaptierten Auges eines „farbmetrischen Normalbeobachters“ definiert und kann in Normwertspektralfunktionen zahlenmäßig als X, Y und Z angegeben werden. Durch die Vergrößerung des Gesichtsfeldes und der damit vergrößerten Rezeptionsfläche werden neben den in der Fovea gehäuft auftretenden, für das photopische Sehen zuständigen Zapfenzellen (Rezeptoren

des Farbsehens eines helladaptierten Auges bei Tage) in zunehmendem Maße peripher des Sehzentrums liegende Stäbchenzellen, also die Rezeptoren des skotopischen Sehens (Schwarz-/Weiß-, Nachtsehen, Sehen bei geringen Leuchtdichten) der Netzhaut angesprochen. Dies führt zu einer Änderung der Normspektalwerte in Beziehung zu den Wellenlängen und ruft somit anderen Farbmeßwerte hervor (Richter 1981). Der 2°-Normalbeobachter bewertet eine Farbfläche in der Größenordnung einer Münze in 50 cm Entfernung, während der 10°-Normalbeobachter in derselben Entfernung eine Postkartengröße einer farblichen Beurteilung zuführen kann und somit davon auszugehen ist, daß ein Zahn bei seiner Größe unter einem Winkel von 2° physiologisch betrachtet und somit optimaler beschrieben wird.

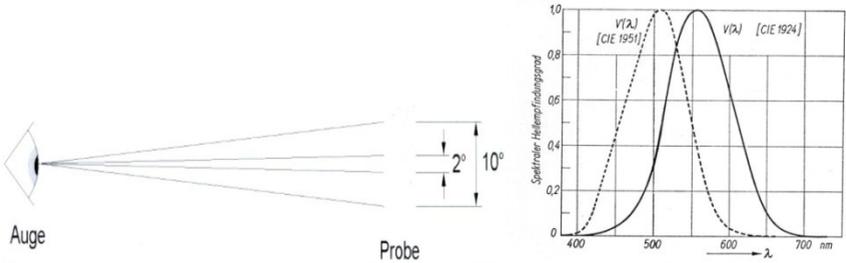


Abb. 2.2.-10 Darstellung des 2°- und 10°-Normbeobachters (links, Dr. Lange). Spektrale Empfindlichkeit für vornehmliches Tages- und Nachtsehen (rechts, Bildquelle: Richter 1981).

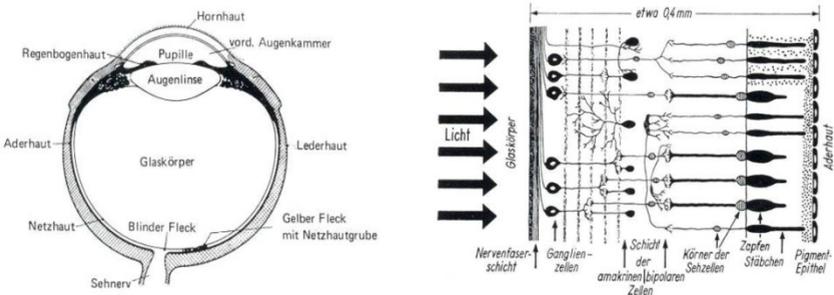


Abb. 2.2.-11 Augenmodell (links) und Querschnitt durch die Netzhaut (rechts); Die spektrale Empfindlichkeit der Stäbchenrezeptoren der Netzhaut entspricht der spektralen Absorption des Sehpurpurs. Die Absolutempfindlichkeit der Stäbchen ist so hoch, daß bereits wenige einfallende Lichtquanten einen Reiz zu formulieren in der Lage sind. Die Zapfenzellen der Netzhaut hingegen besitzen eine weitaus geringere Empfindlichkeit und erlangen erst bei größerer Helligkeit reizaufnehmende Fähigkeiten. Entsprechend ihrer differierenden Sehfärbstoffe und der sich hieraus ergebenden spektralen Absorption entsprechender Energieanteile bzw. Wellenlängenbereiche des Lichtes, welche ihren Zerfall verursachen, lassen sich drei Zapfchen mit entsprechenden Empfindlichkeiten für definierte Farbbereiche unterscheidenden (Bildquelle: Richter 1981).

In seiner 1944 erschienenen „Uniform Chromaticity Scale“ (UCS), basierend auf dem CIE-Normsystem, versuchte der damalige Vorsitzende der „Optical Society of America“ D. L. Mac Adam, welcher sich schon früher mit der Effizienz der menschlichen Farbwahrnehmung beschäftigte (1935), die Farbvalenzen so zu verteilen, daß ihr Abstand zueinander dem Empfindungsunterschied proportional ist und Farbunterschiede, die als gleich empfunden werden, auch durch gleiche Abstände voneinander repräsentiert sind, und so Farbunterschiede grafisch sichtbar machte (vergl. Veröffentlichung 1964, 1970, 1981, Brown 1949, Yonemura 1960). Das „Linien-

element“ (1946) von *Walter S. Stiles* hilft jenen Farbempfindungsunterschied, den zwei beliebige Elemente aus der dreidimensionalen Farbmännigfaltigkeit im Auge des Betrachters hervorrufen, beschreiben (*Stiles* 1946, 1955). Der Farbtheoretiker *Aemilius Müller* entwarf 1951 einen Dreifarbenwürfel und schuf durch den Einfluß seines Vorbildes *W. Ostwald* in seinem Buch „Eine Ästhetik der Farbe in natürlichen Harmonien“ neben 200 Farbtafeln auch ein Farbsystem in Form eines Doppelkegels (1965), um den bisher üblichen Farbskalen die ihnen innewohnende Monotonie zu nehmen und die fundamentale Verwandtschaft zwischen den Farben zu veranschaulichen (*Spillmann* 1984). 1953 konkretisierte der Schwede *Sven Hesselgren* in seinem „Farbatlas“ den Farbkörper von *Tryggve Johansson*. Dem System, einem 24-teiligen Farbkreis, liegt zugrunde, daß jeder Farbeindruck durch die sechs elementaren Empfindungen zustande kommt: Weiß, Schwarz und die vier Grundfarben Gelb, Rot, Grün, Blau. Eine zusätzliche Ordnung wird durch den Farbton, Sättigung, Helligkeit, Intensität (Farbstärke) und Klarheit (Verhüllung) erzielt (*Hesselgren* 1953, 1984).

Das System nach *Wilhelm Ostwald* (1853–1932), das seit dem Ersten Weltkrieg im Gebrauch war, wurde vom Deutschen Institut für Normung (DIN) schon in den 30er-Jahren des letzten Jahrhunderts als nicht praktikabel erachtet. Aber erst 1953 lagen dem Institut Ergebnisse zu einem neuen Farbsystem vor. Farbton (DIN-Farbtone T), Sättigung (DIN-Sättigungsstufe S) und Helligkeit (DIN-Dunkelstufe D) stellen die Koordinaten; die Halbebenen repräsentieren Flächen konstanter T-Werte; Flächen gleicher S-Werte durch den Kegel und gleicher D-Werte durch die Kugel sind veranschaulicht in *DIN 5033, Teil 2, DIN 6176*. Der Schnittpunkt aller drei Flächen bestimmt die Farbe. 1960–62 wurde zudem eine DIN-Farbkarte 6164 (nach *Manfred Richter*) mit 600 Farbmustern festgelegt (*Richter* 1931, 1950, 1951, 1952/53, 1953, 1981). Für die objektive Farbmessung an glatten Flächen gilt seit 1933 die Vorschrift nach *DIN 5033* (AOCs Cc 13a-43, FAC Standard color), an transparenten Flüssigkeiten neuerdings die EN 15557 (Europäische Norm). Das Deutsche Institut für Normung beschreibt in seinen Vorschriften die Grundbegriffe der Farbmetrik (*DIN 5033, Teil 1*), Normvalenzsysteme (*DIN 5033, Teil 2*), Farbmaßzahlen (*DIN 5033, Teil 3*), das Spektralverfahren (*DIN 5033, Teil 4*), das Gleichheitsverfahren (*DIN 5033, Teil 5*), das Dreibereichsverfahren (*DIN 5033, Teil 6*), die Meßbedingungen für Körperfarben (*DIN 5033, Teil 7*), Meßbedingungen für Lichtquellen (*DIN 5033, Teil 8*) und den Weißstandard für Farbmessungen und Photometrie (*DIN 5033, Teil 9*), eine Farbveränderung (Vergilbung) von nahezu weißen oder farblosen Materialien (*DIN 6167*), die Farbwiedergabe (*DIN 6169*), den Metamerie-Index von Probepaaren bei Lichtartwechsel (*DIN 6172*), die allgemeinen Farbarmusterungsbedingungen (*DIN 6173 Teil, 1*), die Beleuchtungsbedingungen für künstliches mittleres Tageslicht (*DIN 6173, Teil 2*), die farbmetrische Bestimmung von Körperfarben nach der CIELAB-Formel (*DIN 6174*), die Farbtoleranzen (*DIN 6175*), einen Entwurf zur farbmetrischen Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der DIN-99-Formel (*DIN 6176*), eine Forderung an die Qualitätssicherung von Meßmitteln (*DIN EN ISO 10012*), eine Prüfung von Farbmitteln, Meß- und Auswertungsbedingungen zur Bestimmung von Farbunterschieden (*DIN 53236*) und eine Bestimmung der Signifikanz von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel (*DIN 55600*).

1955 hat auf Anregung des National Bureau of Standards (NBS) das Inter-Society-Color-Council (ISCC) Farbnamen vorgeschlagen. Farbnamen sollen selbst eine Ordnung darstellen. Das Ziel des Farbsystems besteht darin, das Munsell-System in kleine Blöcke zu zerlegen. So werden die Blöcke mit Adjektiven wie *vivid* (lebhaft), *brilliant*, *strong* (stark), *deep* (tief), *light* (hell), *dark* (dunkel) und *pale* (blaß) benannt. Die Amerikaner *K. L. Kelly* und *Deane B. Judd* haben sich dieser Aufgabe der Zerlegung der Farben in immer kleinere Blöcke gewidmet. Die Farbblöcke wurden nach den von *Munsell* eingeführten Hue, Value und Chroma definiert. Es fällt hierbei auf, daß Hell und Dunkel nur nahe der Schwarz-Weiß-Achse und nicht in Bereichen stärkerer Sättigung zu finden sind (*Kelly und Judd* 1956, 1976, *Simon* 1980). Dieses generische System fand aufgrund der unkalkulierbaren Größen der äußeren Bedingungen des Betrachters und dessen Erfahrungen und der daraus entstehenden Subjektivität wenig Akzeptanz. Hingegen geht das amerikanische OSA-System der Optical Society of America (OSA) von 1960 auf Gün-

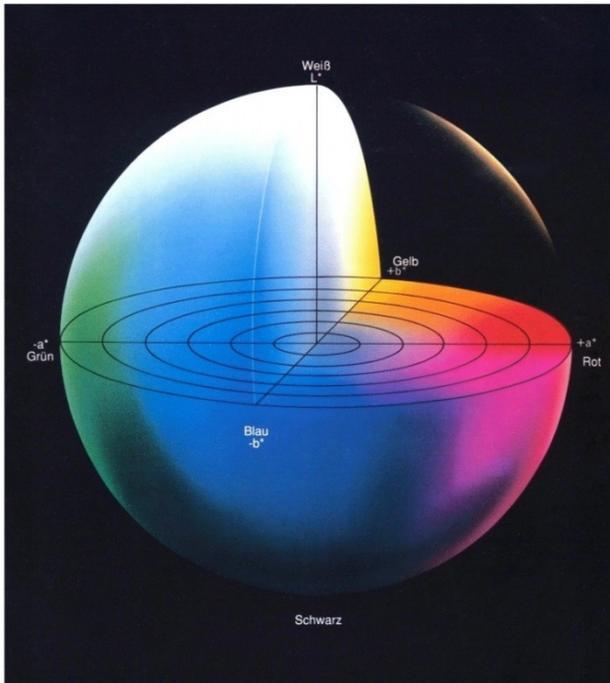
ther Wyszecki zurück, der die empfindungsgemäße Gleichabständigkeit zu Gunsten eines regelmäßigen Rhomboeder-Farbsystems verwarf, indem er das Raumgitter in einen Farbraum eingebettet hat, der nach Farbton, Helligkeit und Sättigung geordnet ist (*Wyszecki* 1962, 1967 1982). Hue (Farbton), im speziellen Falle Luminance bzw. Intensity (Helligkeit), und Saturation (Sättigung) sind auch bei dem entsprechend nach diesen Parametern abgekürzten HLS- bzw. HIS-System zu finden. Das System bietet die Möglichkeit, die durch Fernsehbildschirme erzeugten Farben zu bewerten. Der Farbton wird als Winkel ($0-360^\circ$), die Intensität (Luminance) und Sättigung in einer in 100 Einheiten unterteilten Skala von Schwarz nach Weiß und von Grau bis zur vollen Farbe vermaß- und ablesbar. Auch an dieser Stelle findet sich die Problematik einer Vermittlung zwischen der metrischen und der psychologischen Skala (*Editrice il Rostro* 1981, *Travis* 1991).

Ein weiteres System, welches sich den Bildschirmfarben widmet, ist das RGB-System. Hierbei ist es notwendig zu wissen, daß Farben von Bildschirmen durch eine Spezialform der additiven Lichtmischung eine sog. partitive Mischung bilden. Kleinste Bildpunkte von nicht mehr als 0,2 mm, erfüllt mit phosphoreszierenden Molekülen, welche nach Anregung durch Elektronenstrahlen, also nach Energieaufnahme rotes, grünes und blaues Licht aussenden, können durch die Limitierung des Auflösungsvermögens des Auges nicht mehr einzeln wahrgenommen werden. Triaden aus roten, grünen und blauen Flecken werden also nur noch im Verband und so in einer entsprechenden Mischung erfaßt. Die Helligkeit wird hierbei durch die Intensität der die Phosphoreszenz auslösenden Elektronenstrahlen geregelt. Das würfelförmige Farbsystem hat eine 16-fach geteilte und von 1 bis 15 nummerierte Skalierung an seinen Kanten und die Eckpunkte enthalten neben Rot, Grün und Blau auch die subtraktiven Farben Magenta (M), Gelb (Y, Yellow) und Cyan (C) sowie die unbunten Farben Weiß (W) und Schwarz (BK, Black). Zwei Untergruppen sind zu unterscheiden: Die eine enthält die Farben, welche um das Weiße, die andere diejenigen, welche um das Schwarze kreisen. Das Schwarze enthält alle Kantenausgangswerte (0, 0, 0), das Weiße alle höchsten Werte (15, 15, 15) (s. *Editrice il Rostro* 1981, *Travis* 1991).

Ohne Farbmuster und Farbvergleich will das 1968/69 von den Schweden Anders Hard und Lars Svik vorgestellte NCS-„System der natürlichen Farben“ („Natural Colour System“) auskommen. Der dreidimensionale Raum, gebildet durch einen Doppelkegel, wird durch elementare Farbempfindung definiert (*Hard* 1965, 1966, 1975, 1978, *Tonnquist* 1986). Das System lehnt sich an die Primärfarben von da Vinci und die Opponenten-Theorie *Ewald Herings* an.

Ein modifizierter Zylinder, begründet auf „psychometrischen Skalen“, das sogenannte Farbsystem „Coloroid“, wurde seit 1962 an der Technischen Universität von Budapest unter der Leitung von *Antal Nemcsics* entwickelt und 1974 zum ersten Mal vorgestellt: Ein 48-teiliger Farbtonekreis bildet die Basis des Zylinders, dessen Höhe die Helligkeit bildet (*Nemcsics* 1980, 1987). Eine Beziehung zum *CIE*-System kann über Umrechnungsfaktoren realisiert werden. Um eine Ordnung nach Gesetzen der Farbempfindung bemühte sich auch der Holländer J. Frans Gerritsen (1975), der aufgrund der Vorstellung der phylogenetischen (stammesgeschichtlichen) Entstehung der Farbempfindlichkeit und den Überlegungen des Physikers *Erwin Schrödinger* („Über den Ursprung der Empfindlichkeitskurven des Auges“ 1924), ein Farbsystem in Form eines modifizierten Zylinders verwirklichte. Das bereits erwähnte *CIE*-System sieht es nicht vor, den Betrachter Farbunterschiede (Buntheitsdifferenzen) als Abstände im Schaubild erkennen zu lassen. Die berechtigte Kritik der Fachwelt an jenem System, es sei die Farbe Grün überrepräsentiert und rote, violette und blaue Farbtöne der Ecken würden nicht ausreichend gewürdigt, hat die *Commission Internationale d'Eclairage* bewogen, ein neues System, das CIELAB – CIEL*a*, b* (*DIN 5033, DIN 6174*) zu beschließen, welches 1976 eingeführt wurde. Es handelt sich bei dieser mit Hilfe der *Adams-Nickerson-Kubikwurzel-Formel* (s. 2.2.- 4) errechneten, empfindungsgemäß gleichabständigen Darstellung, einem auf der Gegenfarbtheorie basierenden „Psychometrischen Farbdigramm“, um eine modifizierte Kubus-Kugel, die über eine transversale Achse (+a*/-a; Rot/Grün), eine sagittale Achse (+b*/-b*; Gelb/Blau) und eine Vertikalachse („psychometrische Helligkeit“, „Leichtigkeit“, „lightness“ – von idealem Schwarz/Nero/0 nach idealem Weiß/Bianco/100 aufsteigend – L*) aufgespannt wird. Die Umrechnung vom alten *CIE*-

System ist problemlos möglich (McLaren 1976). Ebenfalls auf der Gegenfarbentheorie, welche besagt, eine Farbe könne niemals gleichzeitig Rot oder Grün oder niemals gleichzeitig Gelb oder Blau sein, fußt das CIELCH-System (L*a*b*-System) der CIE aus dem gleichen Jahre:



$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - 16$$

$$a^* = 500 \cdot \left\{ \sqrt[3]{\frac{X}{X_n}} - \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} \right\}$$

$$b^* = 200 \cdot \left\{ \sqrt[3]{\frac{Y}{Y_n}} - \sqrt[3]{\frac{Z}{Z_n}} \right\}$$

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

$$h_{ab}^* = \arctan \frac{b^*}{a^*}$$

(2.2.-4) Formeln zur Errechnung von L*, a*, b*, C*, h* (Bildquelle: Dr. LANGE 1998) und modifizierter CIELAB-Raum (Minolta 1996).

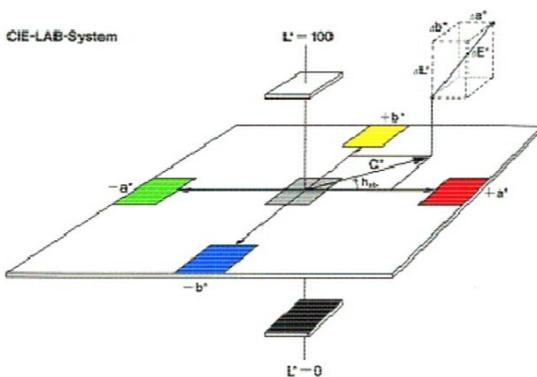


Abb. 2.2.-12 L*a*b*-Farbraum (Bild oben: Minolta 1996) und Darstellung von C* und h (Bildquelle: Dr. LANGE 1998).

Den Farborten, kreisförmig um die L^* -Achse angeordnet, sind die gleiche Buntheit C^* (Chroma), jedoch unterschiedliche Buntonwinkel h zu eigen. Farborte, die auf einem von der L^* -Achse ausgehenden Radiusstrahl liegen, besitzen den gleichen Bunton h , jedoch steigende Buntheit. Der Farbabstand ΔE gibt die Farbdifferenz zwischen zwei Proben in einer Zahl an und berechnet sich aus den Differenzen der L^* -, a^* -, b^* -Werte (*DIN 6174, DIN 6176, DIN 55600, DIN 55981* und *ISO 787-25*).

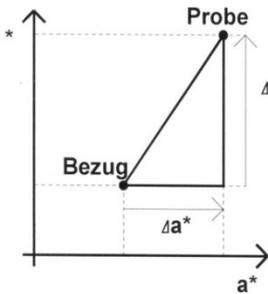


Abb. 2.2.-13 Farbmaabstand zwischen Probenfarbmazahlen und Farbwerten einer Bezugsmessung (Bildquelle: Dr. LANGE 1998).

$$\Delta L^* = L_p^* - L_B^*$$

$$\Delta a^* = a_p^* - a_B^*$$

$$\Delta b^* = b_p^* - b_B^*$$

$$\Delta E^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

(2.2.-5) Der Farbabstand (ΔE) und die Differenzen von Helligkeit (L^*) der Farbmazahlen a^* und b^* (von oben nach unten, *DIN 6174*) (*Dr. LANGE 1998*).

$$\Delta E^*_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*_{ab})^2 + (\Delta H^*_{ab})^2}$$

(2.2.-6) Für bunte Farben definiert *DIN 6174* eine Aufspaltung des Gesamtfarbmaabstandes nach Helligkeits- (ΔL^*), Buntheits- (ΔC^*) und Buntonunterschied (ΔH^*) (*Dr. LANGE 1998*).

$$\Delta C^*_{ab} = C^*_{ab,p} - C^*_{ab,B} = \sqrt{a^{*2}_p + b^{*2}_B} - \sqrt{a^{*2}_B + b^{*2}_p}$$

$$\Delta H^*_{ab} = s \cdot \sqrt{(\Delta E^*_{ab})^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C^*_{ab})^2}$$

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{S_L k_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{S_C k_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{S_H k_H}\right)^2}$$

(2.2.-7) Eine Empfehlung der *CIE 1994* ist es, die Komponenten ΔC^*_{ab} , ΔH^*_{ab} und ΔL^*_{ab} der *CIELAB*-Formel durch Zusatzfaktoren zu modifizieren. S ist die Konstante für die ausgleichende Gewichtung der inneren Ungleichförmigkeit der *CIELAB*-Formel. Treten bei der Schaufgabe Parameter auf, welche die Erkennbarkeit von Farbunterschieden beeinträchtigen, helfen hier ausgleichende Konstanten k . Hierbei ist $S_L=1$, $S_C=1+0,045C^*_{ab}$, $S_H=1+0,015C^*_{ab}$, $k_L=k_C=k_H$ (für die Standardbedingungen). Für spezielle Anwendungen, beispielsweise in der Textilindustrie, wird $k_L=2$ und $k_C=k_H=1$ empfohlen (*Dr. LANGE 1998*).

Ziel dieses einheitlichen Farbraumes („uniform color space“), dessen psychologische Grundfarben der Opponententheorie *Edwald Herings* entlehnt wurden, war es, Farbunterschiede numerisch bestimmen zu können, um so die Farbmessung genauer werden und Farbton, Helligkeit und Sättigung entsprechend einfließen zu lassen.

In der Farbenlehre charakterisiert der Farbton eine bestimmte Wellenform der Strahlungsenergie und bezeichnet die Farbsorte (z. B. Rot, Grün, Blau, Gelb usw.), beschreibt die Sättigung die Reinheit oder Stärke eines Farbtones und gibt die Helligkeit Auskunft über den Schwarzanteil und so auch über die Reflexionsfähigkeit der Farbe (*McLean 1978, Preston 1980*). Die Anwendung des *CIELAB*-Systems in der Farbmessung hat sich in Europa im Gegensatz zu den Vereinigten Staaten von Amerika, in denen das *Munsell*-System sowie das *Hunter-Lab*-System (1960), welches ebenfalls wie das *CIELAB*-System auf den Normfarbwerten X , Y , Z ,