

André Hoffmann

**Über das Wesen der  
Zahnfarbe,  
Zahnfarbmessung  
und dentaloptischer Phänomene**

*NEUE THEORIEN,  
WISSENSCHAFTLICHE ERKENNTNISSE  
UND NEUARTIGE METHODEN*



André Hoffmann

**Über das Wesen der  
Zahnfarbe,  
Zahnfarbmessung  
und dentaloptischer Phänomene**

*NEUE THEORIEN,*

*WISSENSCHAFTLICHE ERKENNTNISSE*

*UND NEUARTIGE METHODEN*



ATHENEMEDIA

## **Über das Wesen der Zahnfarbe, Zahnfarbmessung und dentaloptischer Phänomene**

*Neue Theorien, wissenschaftliche Erkenntnisse und neuartige Methoden*

© 2000-2004 André Hoffmann, Dammweg 16, 46535 Dinslaken/Germany

© 2010-2011 André Hoffmann, Dammweg 16, 46535 Dinslaken/Germany

AtheneMEDIA Verlagsgesellschaft ([www.athene-media.de](http://www.athene-media.de))

### **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 benützt 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 hier 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.

Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek

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

**Alle aktuellen Informationen finden Sie im Internet unter der Adresse:**

**<http://www.athene-media.de>**

# Vorwort

Jeden Tag werden Entdeckungen gemacht und gibt es Innovationen für den Fortschritt und zum Wohle der Gesellschaft.

Es kann aber auch sehr schnell der allgemeine Eindruck entstehen, dass alle grundlegenden Dinge der Welt bereits weitgehend erklärt sind und das Rad nicht mehr völlig neu erfunden werden kann.

Andererseits wird vieles als bekannt und erforscht vorausgesetzt, was bislang unerforscht blieb.

Seit 1999 widme ich mich nun schon der Erforschung von Interaktionen elektromagnetischer Strahlenarten mit Materialien und Körpergeweben – insbesondere der Interaktion von Licht mit dentalem Material. Ich hatte mir nicht vorstellen können, dass noch fundamentale, naturwissenschaftliche Phänomene und Effekte am Zahngewebe wissenschaftlich erschlossen werden könnten, und wurde während meiner Arbeit an diesem Thema eines Besseren belehrt.

Durch das systematische, vernetzende und analytische Vorgehen unter Verwendung von Hochpräzisionssystemen konnten eine Vielzahl neuer Erkenntnisse gewonnen werden. Mit der Veröffentlichung eines bescheidenen Teils dieser Forschung in Form dieser Publikation möchte ich mich herzlich für das Interesse an meinem Wirken bedanken und dem an mich aus Forschung und Industrie herangetragenen Wunsch nach mehr Informationen entsprechen.

Vielleicht werden Sie schon mit Studium dieses Buches den Zahn, seine Farbentstehung, messtechnische Erscheinung und visuelle Farbwirkung mit ganz neuen Augen sehen – ebenso wie es mir seinerzeit erging; vielleicht werden Sie durch diesen kleinen Band neugierig auf weitere, hierauf aufbauende Publikationen, die – ich bin mir sicher – Ihr dentobiologisches und dento-(patho-)physiologisches naturwissenschaftliches Verständnis am Ende mehr oder weniger verändern könnten, so wie meine bislang teils noch unveröffentlichten Studien der letzten 10 Jahre auch mein Denken bereits jetzt grundlegend verändert haben.

Nun ist die hier begründete Zahnfarbästhetik ein sehr umfangreiches Gebiet. Das liegt insbesondere auch daran, dass die dentale Farbe durch sehr komplexe Vorgänge, Effekte, Phänomene zustandekommt und durch mannigfaltige Faktoren beeinflusst wird. Es gibt

selbst für einen Fachmann eine nahezu unüberschaubare Anzahl von Einflussfaktoren auf die Farbentstehung bzw. auf deren Wahrnehmung und Messung. In langjähriger, wissenschaftlicher Kleinarbeit ist es gelungen, technologieseitige Einflussfaktoren, eine Vielzahl naturwissenschaftlicher Phänomene und Effekte eindeutig zu isolieren und systematisch zu erfassen – die Zahnfarbe in ihrem Wesen sukzessive zu analysieren.

*„Forschung ist der Weg zu neuem Wissen, Kreativität der Schlüssel für Innovation und Konzeption das Tor zur Zukunft“.* Dieser Satz ist Motto und verinnerlichte Philosophie. Deshalb lassen Sie sich mit diesem hier vorliegenden Buch mitnehmen auf eine Reise durch den ersten Forschungsteil, auf einen Weg – beginnend beim aktuellen Stand der Technik (und des Wissens) über hier angeschnittene neue Erkenntnisse und Theorien, phänomenologische Beschreibungen und naturwissenschaftliche, dentalbasierte Grundlagen bis zu neuartigen Konzepten, Methoden und Verfahren.

Dieses Buch möchte einen ersten Eindruck zu einer vielleicht völlig neuen Wahrnehmung sowohl von Dentalwissenschaftlern, Farbprofis als auch von Studenten, Zahnärzten und Zahntechnikern vermitteln. Es kann aber ebenso auch für Biologen, Physiker und Ingenieure sowie für jeden an Farbe, an biophysiologicalen Prozessen und an Wissenschaft Interessierten eine hoffentlich spannende Lektüre sein. Ich würde mich sehr freuen, wenn Sie von der Materie ebenso fasziniert und gefangen genommen werden, wie ich es wurde und bin.

André Hoffmann

# Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Literaturübersicht	5
2.1	Flüssigkeit und Zähne	5
2.2	Wissenschaftliche Grundlagen der Farbenlehre und -metrik – höhere Farbmatrik	13
2.3	Farbenlehre, Farbmatrik, Spektralphotometrie und Zahnmedizin	27
3.	Material und Methode	33
3.1	Verwendete Zähne und Instrumente	33
3.2	Umgebungsbedingungen	46
3.3	Messvorrichtung und Versuchsaufbau	49
3.4	Messgrößen, Normlicht, Weißabgleich, Farbringenanwendung	51
3.5	Statistik, Boxplot und Percentile Plot	53
3.6	Methode und Vorgehen	54
4.	Voruntersuchungen	56
	In vivo- und in vitro - Systemanalysen	
	Analyse der VITAPAN classical und -3D-MASTER- Farbringe	
5	Hauptstudien dieser Arbeit	72
<b>5.1</b>	<b>Farbe flüssigkeitsgesättigter und trockener Zähne in Relation zu ihrem Flüssigkeitsgehalt</b>	<b>72</b>
5.1.1	Material und Methode	72
5.1.2	Ergebnisse	74
5.1.2.1	Ergebnisse vor und nach Dehydrierungsprozess	74
5.1.2.2	Zahnfarbraum vor und nach Dehydrierungsprozess	79
5.1.2.3	Subjektive Bestimmung der Zahnfarbe – Methode zum Subjektiv-objektivvergleich	82
5.1.2.4	Gewichtsverlust durch beschleunigte Trocknung	85
<b>5.2</b>	<b>Farberfassung einer beschleunigten Trocknungschronologie</b>	<b>86</b>
5.2.1	Material und Methode	87
5.2.2	Ergebnisse	88
5.2.2.1	Spektralkurven	88
5.2.2.2	L*a*b*C*h-Wertmessungen mit den Spektralphotometern CM-503c und CM-503i	89
5.2.2.3	Ergebnisse der Thermogravimetrie	98
5.2.2.4	Einflüsse von Messapparatur, Messgeometrie, Normbeobachtungswinkel, Lichtart	100
5.2.2.4.1	Einfluss auf die Ergebnisse zur Zeit 0 der beschleunigten Dehydrierung	101
5.2.2.4.2	Einfluss auf die Ergebnisse nach 10 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	106
5.2.2.4.3	Einfluss auf die Ergebnisse nach 20 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	108
5.2.2.4.4	Einfluss auf die Ergebnisse nach 90 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	110
5.2.2.4.5	Einfluss auf die Ergebnisse nach 161 Minuten der beschleunigten Dehydrierung	112
5.2.2.4.6	Messgerätevergleich	114
5.2.2.5	Veränderung des Zahnfarbraumes mit der Dehydrierungszeit	117
5.2.2.6	Ergebnisse der subjektiven visuellen Farbbewertung	122
5.2.2.6.1	Methodik zur Auswertung subjektiver Ergebnisse – Vergleichsuntersuchung	122

5.2.2.6.2	Farbwertevergleich der während Dehydrierung subjektiv erfassten Farbringproben	123
5.2.2.6.3	Vergleich visuell bestimmter Werte mit objektiv gemessenen Werten	124
5.2.2.6.4	Indirekter Messgerätevergleich anhand im Dehydrierungsprozess gewählter Farbringproben	127
<b>5.3</b>	<b>Farbmetrische Erfassung dentaler Lufttrocknung und Flüssigkeitsaufnahme</b>	<b>131</b>
5.3.1	Material und Methode	132
5.3.2	Ergebnisse	134
5.3.2.1	Entwicklung der initialen Trocknung	134
5.3.2.2	De- und Rehydrierung - Ergebnisse des Spektralphotometers CM-503c	136
5.3.2.3	De- und Rehydrierung - Ergebnisse des Spektralphotometers CM-503i	148
5.3.2.4	De- und Rehydrierung - Ergebnisse des mikroskopischen Chromameters CR-241	158
5.3.2.5	Gewichtsentwicklung während des De- und Rehydrierungsprozesses	164
5.3.2.6	Einfluss von Messapparatur, Messgeometrie, Messöffnung/-fläche, Normbeobachtungswinkel, Lichtart	167
5.3.2.6.1	Einfluss zum Zeitpunkt 0 des Dehydrierungsprozesses am feuchten Zahn	168
5.3.2.6.2	Einfluss auf die Messwerte nach 1-stündiger Lufttrocknung	174
5.3.2.6.3	Einfluss auf die Messwerte nach 3-stündiger Lufttrocknung	180
5.3.2.6.4	Einfluss auf die Messwerte nach 1-stündigem Rehydrierungsprozess	185
5.3.2.6.5	Einfluss auf die Messwerte nach 3-stündigem Rehydrierungsprozess	190
5.3.2.7	Vergleich der Messgeräte innerhalb des De- und Rehydrierungsprozesses	194
5.3.2.8	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in Werten von VITA	198
5.3.2.9.1	Vergleich subjektiver Farbbewertung mit objektiven Messungen (L*).	202
5.3.2.9.2	Vergleich subjektiver Farbbewertung mit objektiven Messungen (a*).	204
5.3.2.9.3	Vergleich subjektiver Farbbewertung mit objektiven Messungen (b*).	206
5.3.2.9.4	Subjektiv-visuelle Zahnfarbestimmung in metrischen Werten	211
5.3.2.10	Vergleich der Spektralkuren der Spektrophotometer CM503c und i	218
6	Nachuntersuchungen	220
6.1	Langzeitmessungen des Gewichts – Lufttrocknung	221
6.2	Farbmessungen – Langzeitmessungen	223
7.	<b>Neue Erkenntnisse und Theorien, neuartige Methoden und Verfahren</b>	<b>232</b>
8.	Zusammenfassung	277
9.	Literatur	283

# 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 ergeben dürfte. Werden allgemeinoptische Vorgänge zugrunde gelegt, so dürften selektive Absorption und Remission von Frequenzanteilen des Lichtspektrums in der Tiefe des Dentinkernes sowie Interferenzen an oberflächennahen Schichtanteilen des Schmelzes, Lichtbrechung, Lichtreflexion und -transmission im Bereich aller Schichten die Zahnkörperfarbe und die Transluzenz bestimmen. Der große Hydroxylapatitanteil des Zahnes wäre ursächlich für seine Trübung. An dessen prismatischen Kristallen entstünden Spiegelreflexionen, welche den Lichtausfallswinkel dem Einfallswinkel entsprechen lassen. Bereits an der Schmelzschicht würde eine nach allen Seiten wandernde diffuse Reflexion infolge einer Lichtstreuung und wenig tiefer – an der Schmelz-Dentin-Grenzschicht beginnend – die erste größere Teilabsorption des Lichtes entstehen (vgl. [77]).

Faktoren, wie die Schichtstärke der einzelnen Zahnhartgewebe, der labial-orale Kronendurchmesser, die Ausdehnung des Pulpenkavums und die Vitalität des Zahnes bzw. ihr Fehlen, dürften ebenfalls einen Einfluss auf die Zahnfarbe besitzen (vgl. [77, 88]). Bestimmend für die Zahnfarbe 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.

70 % des Lichtes gelangen durch ein 1 mm dickes Schmelzstück. Diese relativ große Lichtdurchlässigkeit ist das Resultat der Ordnung in Form eines geschichteten Kristallaufbaues, welcher eine lichtleiterähnliche Ausbreitung der elektromagnetischen Strahlung bewirkt. Eine Aufhellung fällt inzisal und approximal aufgrund fehlender Dentinunterlagerung auf [19, 103, 104]. Dem Schmelz könnte so am ehesten die Helligkeit zugeordnet werden [103, 104]. Einen weiteren Effekt erzielen die Perikymatien. Sie bilden hochglänzende Lamellen und streuen auf sie auffallendes Licht in unterschiedliche Richtungen. Zahntypische Form und Strukturmerkmale bilden ein Reflexionsmuster (vgl. [19]).

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 [19, 101]. Die Zusammensetzung des Dentins bestimmt so Farbton und Sättigung [103, 104]. Und die feuchte Zahnkrone imponiert in gelblich-weißer Farbe und gewinnt mit zunehmender Zwischensubstanz an Intensität [115].

**Doch was ist das Wesen der Zahnfarbe eigentlich wirklich?** Die Beantwortung dieser Frage ist gar nicht so einfach, wie man zunächst glauben mag. Sicherlich könnten Sie versuchen, diese Frage allein über allgemein bekannte physikalische Grundlagen theoretisch zu beantworten. Und im Grunde werden Sie da auch nicht völlig falsch liegen. Doch Zahnfarbe ist mehr. Sie entsteht aufgrund sehr komplexer Vorgänge und wird durch nahezu unüberschaubar viele Faktoren beeinflusst.

Aber wie verhält es sich mit dem Zusammenspiel dieser Einflussfaktoren? Und wie verhalten sich diese Einflussfaktoren innerhalb von Prozessen des dentalen Zustandswandels, während der Trocknung und der Flüssigkeitsaufnahme? Und wie beeinflussen die Trocknungs- und Flüssigkeitsaufnahmeprozesse selber die Zahnfarbe und ihre Einflussfaktoren und Phänomene (Einfluss im Einfluss)?

Beispielsweise werden die Zahnfarbe und insbesondere die dentale Helligkeit durch Behandlung beeinflusst. So sind dentale Farbveränderungen durch 15 Minuten der Kofferdam-Applikation und bis zu 30 Minuten nach Kofferdam-Entnahme zu einem quasi reversiblen Farbzustand erfasst worden [124]. Aus diesem Grunde sollte ein Farbabgleich zu einer suffizienten Farbbestimmung und zum Erzielen einer akzeptablen farblichen Anpassung des die Zahnschmelz ersetzenden Materials an die natürlichen Zähne am feuchten Zahn vor Präparation bzw. Behandlung erfolgen [70, 118, 119, 145].

Zusammenhänge zwischen dentalem Flüssigkeitsgehalt und der komplexen Farbentstehung von Zähnen, insbesondere in Verbindung mit Trocknungs-, Flüssigkeitsaufnahme- und Farbveränderungspro-

zessen sowie dem Zeitfaktor entsprechender Änderungschronologien, sollten nicht nur unmittelbar bewiesen und erforscht, neue Erkenntnisse der Studien des Autors vor dem Hintergrund physikalischer, biologischer und (patho-)physiologischer Aspekte eingeordnet werden, sondern die kontrollierte Führung dieser Prozesse diene auch einem weiteren wesentlichen Zweck: der Isolierung einzelner Effekte, Phänomene, Einflussfaktoren und der Analyse der Zahnfarbentstehung.

Mittels diverser farberfassender Apparaturen, spektralphotometrischer Systeme und über subjektive Bewertungen mittels Zahnfarbringpaletten, kombiniert mit thermogravimetrischen und gravimetrischen Apparaturen, sollten diese Ziele erreicht werden.

Ergebnisse farberfassender Apparaturen, welche in Wissenschaft und Forschung beispielsweise zur Erkundung von Werkstoffen Einsatz finden und in der zahnärztlichen Praxis die Grundlagen zur Zahnfarbbestimmung bilden, sowie die subjektiv visuelle Farbbestimmung können durch diverse Faktoren beeinflusst werden. Einige Faktoren wurden in der Literatur erwähnt, konnten jedoch nicht isoliert und damit eindeutig quantifiziert werden.

Mögliche Einflussfaktoren wie Umgebungslicht, Normlicht, Metamerie-Effekt, Art der Messapparatur, Messgeometrie, Messmodus, Anwender, Wahrnehmung, Beobachtungswinkel, Messöffnung/-fläche, individuelle Kronenkrümmung, Glanzwirkung, Wirkung des Flüssigkeitsgehaltes, Trocknung und Flüssigkeitsaufnahme sollten nun gefunden bzw. erkundet, analysiert, isoliert und quantifiziert sowie deren Ursachen und Grundlagen geklärt sowie auftretende Phänomene und Effekte im Sinne einer Grundlagenforschung erklärt werden. Ein jeder dieser Einflussfaktoren wird über die hierfür eigens entwickelten und auf unterschiedlichsten Fragestellungen basierenden Methoden in seiner Wirkung und seinem Ausmaß auf die Ergebnisse isolierten Betrachtungen aus den verschiedensten Perspektiven unterzogen.

Diverse Einflussfaktoren, Effekte und Phänomene wirken sich sehr komplex – vielleicht bisher zu komplex, um isoliert erfasst werden zu können – auf die visuelle Erscheinung der Zahnfarbe, auf die Messungen und auf die Ergebnisse aus. Aber erst eine Analyse, Isolierung und damit isolierte Quantifizierung und das Unserfassbarmachen der vielen individuellen Einflussfaktoren, Effekte und Phäno-

mene dürfte uns dem Wesen der Zahnfarbe und einer effektiveren visuellen sowie messtechnischen Zahnfarbbestimmung und der Realisierung einer naturähnlichen Zahnfarbästhetik ein bedeutendes Stück näherbringen. Nicht zuletzt sollen über gewonnene neue Erkenntnisse neue Möglichkeiten des Einsatzes derartiger Farbmessapparaturen und Technologien sowie innovative Methoden und Lösungsansätze anhand der Ergebnisse gefunden, entwickelt und eingeschätzt werden.

Alles in allem erhält der Leser dieser Lektüre einen ersten Einblick in jahrelange Forschung und in das Wesen der Zahnfarbe und dessen Entstehung sowie konkrete Kenntnis über einzelne Faktoren, die die Zahnfarbe ausmachen und beeinflussen, was für ein professionelles Farbmanagement sowie zur Optimierung zu einer naturästhetischen Farbgestaltung von essenzieller Bedeutung ist.

## 2. Literaturübersicht

### 2.1 Flüssigkeit und Zähne

Für einen Teil der Zahnfarbanalysen sind dentale Prozesse ein bedeutender Schlüssel. Entlang beispielsweise eines Trocknungsprozesses oder Flüssigkeitsaufnahmeprinzips wirken nicht alle der vielen farbbeeinflussenden Faktoren, Effekte und Phänomene gleichzeitig und gleich stark. Für das Verständnis des Teils der Analysen, der sich dieser Prozesse bedient, scheint es an dieser Stelle sinnvoll zu sein, zunächst zu wissen, was am Zahn physikalisch und chemisch im Zusammenhang mit Flüssigkeit und Feuchte geschieht: In Untersuchungen, in denen man sich der Chemie des Zahnes widmete, bezogen sich die Ergebnisse mit den Angaben zum Mineralsalzgehalt [16, 83, 84] und insbesondere zum Calcium-, Phosphor- [21, 26, 92], Fluorid- [21] und Kohlendioxid-Anteil [21, 83, 91, 92], zu den Anteilen verschiedener Metalle und Spurenelemente [5, 20, 26, 84, 94] sowohl auf das Frisch- [21, 47] als auch auf das Trockengewicht nach Dehydrierung [20, 21, 26, 83, 84, 94] sowie auf das Aschegewicht nach Entzug aller Wasserarten [16, 92]. Zu den Wasserarten s. unten.

Im Zuge der chemischen Erkundung des Zahnes rückten in verschiedenen Studien das Wasser, sein Gehalt und seine Aufgabe in der Zahnschicht in den Mittelpunkt des wissenschaftlichen Interesses. Zahlreiche Studien beschäftigten sich mit dem Wasser der Zähne [79, 138]. Es wurde der Wassergehalt von Zähnen [26], des anorganischen Teils fetaler Zähne [84], der Milchzähne [16] sowie der permanenter Zähne [83] quantifiziert und der Art des Wassers [92, 97], seiner Rolle, Aufgabe [4, 36, 93, 94] und Bewegung [11, 12, 79, 138] der flüssigen Phase 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. *Job und Swanson* [72] trockneten fetale Knochen bei 105 °C und fanden 44,8 % extrazelluläres und 8,3 % intrazelluläres Wasser. *Eastoe und*

*Eastoe* [48] erhitzen bei 105 °C über 24 Stunden zermahlene Knochen bis zur Gleichgewichtskonstanz und bezifferten den Anteil auf 8 %. *Elliott und Robinson* [49] wählten den Temperaturbereich der Trocknungsprozedur, indem sie Kortikalis enthaltende Knochen jüngerer und älterer Hunde in vergleichbarer Höhe (100–105 °C) erhitzen. Das Ergebnis der Messungen ergab 73 Vol.-% und 54 Gew.-% für junge und 21 Vol.-% und 10 Gew.-% für ältere Individuen.

Die erste überhaupt beschriebene Gewichtsmessung an Zähnen wurde von *Bolk* [17] 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 mittleren Oberkieferinzisivi wogen im Durchschnitt 0,988 g. In einer vergleichbaren Studie von *Cremer* [35] fiel das Zahngewicht in den Bereich von 0,299 g (mittlerer Unterkieferschneidezahn) bis 3,18 g (Sechsjahrmolar) und lag insbesondere bei den mittleren Oberkieferfrontzähnen zwischen 0,87 und 1,62 g.

Gewichtsmessung unter thermischem Einfluss bildet die Basis für die Bestimmung des Wasseranteils in Zähnen. So betrug der Anteil des Wassers frisch extrahierter pulpenloser menschlicher Zähne, welche von *Burnett und Zenewitz* [26] bei einer Temperatur von 100 °C sowie bei 197 °C unter Vakuum getrocknet worden waren, 8,53 +/- 0,33 % bzw. 9,32 +/- 0,37 %. Der Wasseranteil des Schmelzes betrug 2,3 % (1–5 %), des Dentins 13,2 % (10,8–15,7 %) [83] und des Dentins aller Zähne 10,0 +/- 0,55 (bei 100 °C vakuum-erhitzt) und 12,16 +/- 0,8 % (bei 197 °C vakuum-erhitzt) [26]. 12 Stunden bis zur Gewichtskonstanz auf 105 °C erhitzter Schmelz soll nach *Cremer* [35] allerdings nur 0,2 Gew.-% und Dentin 10 Gew.-% Wasser enthalten. Weitere Autoren quantifizierten den Wassergehalt des ganzen Zahnes auf 8,79–11,0 Gew.-% [84], den des Schmelzes auf 2,8 Gew.-% [16], 4 Gew.-% bzw. 12 Vol.-% [2, 9, 21, 25, 129], den des Dentins auf 11,1 Gew.-% [16], 10 Gew.-% oder 25 Vol.-%, den des Zements auf 12 Gew.-% bzw. 36 Vol.-% [2, 9, 21, 25, 129] und den Wassergehalt der Pulpa auf Vol.-%90 [153]. *Burnett und Zenewitz* [26] betrachteten den Wassergehalt einzelner Zahnsorten (Schneidezähne, Molaren) sowie den von pulverisierter Zahnschmelz (Schmelz und Dentin) in Abhängigkeit von ihrer Partikelgröße,

erhitzten sie unter atmosphärischem Druck sowohl auf 100 °C als auch auf 61 °C sowie sowohl unter Vakuum auf 100 °C als auch auf 197 °C bis zu dem Punkt, bei dem der Gewichtsverlust gegen null tendierte und somit eine Gewichtskonstanz erreicht war: Die Schneidezähne enthielten 6,4 % (100 °C) bis 6,5 % (61 °C) und die Molaren 5,8 % (100 °C) bis 6,0 % (61 °C) Wasser ihres Äquilibriumsgewichtes. Hingegen enthielten in Gew.-% pulverisierter Schmelz 0,45 % (Partikelgrößen < 0,14 mm), 0,17 % (Partikelgrößen 0,24–0,15 mm) und pulverisiertes Dentin 6,3 % (Partikelgrößen < 0,14 mm) sowie 6,1 % (Partikelgröße 0,24–0,15 mm) Wasser, das durch Erhitzen auf 100 °C herausgetrieben wurde. Unter Vakuum verlor 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 0,52 % (100 °C) bis 0,81 % (197 °C) (Partikelgröße < 0,14 mm) bzw. 0,3 % (100 °C) bis 0,39 % (197 °C) (Partikelgröße 0,24–0,15 mm), pulverisiertes Dentin 7,3 % (100 °C) bis 8,7 % (197 °C) (Partikelgröße < 0,14 mm) und 6,7 % (100 °C) bis 8,2 % (197 °C) (Partikelgrößen 0,24–0,15 mm) Wasser bis zu seinem änderungsfreien Endgewicht. Die Gleichgewichtskonstanz soll durch Trocknung bei 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 sowohl für ganze Zähne als auch für pulverisierten Schmelz auf 7 Tage und für pulverisiertes Dentin auf mehr als 18 Tage erheblich. Zudem konnte herausgefunden werden, dass frisch extrahierte Zähne bis zu 1,3 % mehr Wasser enthalten als bei Zimmertemperatur im nassen Milieu aufbewahrte [26] und dass im Vergleich der Wassergehalte von vitalen sowie pulpenlosen Zähnen pulpenhaltige Zähne nicht signifikant mehr Flüssigkeit in sich tragen als endodontisch behandelte (12,35 : 12,10 %) [111]. Festzuhalten bleibt jedenfalls, dass Dentin mehr Wasser enthält als der Schmelz [89].

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 [36] ebenso wie dem vollständig entwickelten Zahn

[4] zugesprochen. Der Wassergehalt betrug bei jungen Schmelzschichten während der Amelogenese etwa 50 % und nahm dann während der Schmelzreife proportional mit der organischen Matrix kontinuierlich ab [38, 122]. Der größte Anteil des Wassers des ausgereiften Schmelzes war an Apatitkristalle in Form einer Hydratationshülle zu finden und nur etwa ein Viertel des Wassers war frei in der organischen Matrix verfügbar. Mikroskopischen Beobachtungen zufolge trat nur ein kleiner Anteil des Wassers durch Schmelzsprünge und Lamellen, während die Hauptmenge der Flüssigkeit jedoch breitflächig aus dem Schmelz heraustrat. Die Schmelzflüssigkeit wird als ein Transportmedium für Ionen und Moleküle verstanden [11, 12].

*Bergmann und Siljestrand* [12] verbanden Wurzeln kariesfreier junger Prämolaren über Glaskapillaren, welche sie mit Kochsalzlösung füllten und über Latextröhrchen abdichteten. Der Wasserverlust über den Schmelz konnte so über die Bewegung der Lösung in den Kapillaren beobachtet werden. Er errechnete die Fließgeschwindigkeit von 0,1 mm pro Stunde, wobei das Vorhandensein der Pulpa keinen Einfluss auf die Bewegungsgeschwindigkeit haben sollte und eine beachtliche Menge von Flüssigkeit (4 mm<sup>3</sup> pro Quadratzentimeter Schmelz innerhalb von 24 Stunden) durch den intakten ausgereiften Zahnschmelz hindurchtrat [11], für deren Transport der Schmelz nach Schätzungen von *Little et al.* [92] sowie *Carlström et al.* und *Carlström* [27, 28] Größenordnungen von 2 % seines Volumens bereithielt. Die mikroskopischen Betrachtungen von *Spreter von Kreudenstein und Stuben* [135] und ihre Beschränkung auf Dentinflüssigkeiten sowie die Beobachtung und Errechnung der Fließgeschwindigkeit ließen keine Informationen über die Pfade des Wassers erkennen.

*Bergmann* [11] versuchte mithilfe frisch gezogener Zähne, die in unterschiedlichen Winkeln zu den Schmelzprismen geschliffen worden waren 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 beschichteten sie die Zähne mit Öl und socketen 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“ verteilt er-

schienen, wie sie berichteten – allerdings mit Ausnahme der Bereiche, die eine Schmelz-Dentin-Isolation erfahren hatten. *Bergmann* [11] konnte so zwar ebenfalls die wichtige Beziehung des Flüssigkeitstransportes zwischen Schmelz und Dentin, jedoch nicht dessen genauen Weg bestimmen. Seiner Meinung nach handelte 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 gar kristalliner Art.

Die Permeabilität nahm mit abnehmender Dentindicke und Molekülgröße zu [112–114]. Darüber hinaus war eine mit einer Diamantscheibe und Bohrern bearbeitete Dentinoberfläche bedeutend weniger durchlässig als eine mit Säure angeätzte Fläche [113, 114]. Das Dentin wies eine höhere Permeabilität als der Schmelz auf [63].

Neben der Bewegung des Wassers wird die Frage nach seiner Bestimmung und dessen Einbindung an und in der Kristallstruktur gestellt. *Little und Casciani* [93] schrieben dem Wasser, das bei dem Verbrennungsprozess der Zahnschmelz frei wird, die Aufgabe einer Brücke zwischen Protein und mineralischer Phase zu, die es zusammenhält und an die es gebunden ist („gebundenes Wasser“). Basierend auf Untersuchungen an verändertem und nicht verändertem Zahnmaterial hatten sie versucht, dieser Frage nachzugehen: Substanzbereiche mit braunen und weißen Flecken sowie kariös veränderten Schmelzen enthalten mehr Stickstoff, besitzen aber auch eine geringere Dichte [13–15], geringere Radioopazität [3] und einen niedrigeren CO<sub>2</sub>-Gehalt [34]. Ebenfalls flossen Erkenntnisse, welche über altersabhängige Änderung des Stickstoffgehaltes des Schmelzes [127] und Gehalts an CO<sub>2</sub> und welche über ihr Ausbleiben bei der Relation des Calcium- und Phosphorgehaltes [91, 95] 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* [93] eine Kompensation in einem Ersatz jener durch „verlorenes Wasser“ als Möglichkeit ins Auge fassten.

Die verwandten frisch extrahierten Zähne von jüngeren (< 30 Jahre) und älteren Patienten (> 30 Jahre) ohne und mit bernsteinfarbige(n) Flecken, Braun- oder Weißverfärbungen wurden bei 68 °C vakuumgetrocknet, bei 500 °C erhitzt [20, 23, 91, 95] und 900 °C

[92, 93] verbrannt. Der Betrag des „total organic and bound water“ [36] konnte durch den Gewichtsverlust zwischen 68 °C im Vakuum und 900 °C abzüglich des fliehenden CO<sub>2</sub>-Anteils errechnet werden. Zerkleinerte und feucht gelagerte Proben verloren, der Luft ausgesetzt, schnell in einem Ausmaß von 6–30 % an Gewicht und erlitten weitere Gewichtseinbußen bei 68 °C Vakuumtrocknung. Der durchschnittliche Verlust von freiem gebundenen („loosely bound“) Wasser lag bei Proben mit Flecken in der Größenordnung von 14 %, mit weißen Flecken in der von 20 % und braunen Flecken in der von 12 % und war bei gesundem Schmelz am höchsten. Über den gesamten Verbrennungsprozess hinweg war das Verhältnis zwischen Calcium und Phosphor erstaunlich gleichbleibend (zwischen 68 °C Vakuum und 900 °C) [80, 92, 93], während jedoch festes Wasser („tightly water“), welches Calciumionen (Ca<sup>2+</sup>) (nach [92, 93]) im Gitter des Hydroxylapatits ersetzen kann, verloren ging. Der Verlust des Gewichtes soll sich nicht auf dem des Stickstoffs (N), des Proteins oder dem des CO<sub>2</sub> des Schmelzes begründen, sondern vor allem auf dem des „tightly bound water“, das sich, verbunden mit der Mineralphase des Kristalls, von ihr lösen und zu ihr zurückfinden soll [92, 93]. Auf diese Weise wäre es möglich, die Schmelzverbindung zwischen „N – tightly bound water“ einerseits und „mineral – tightly bound water“ mit Auswirkungen auf die Wasserbindung [116] zu erklären. Auf die Wassermenge im Schmelz sowie auf die Position und auf die Aufgabe wurde über den Einsatz indirekter Methoden geschlussfolgert [27, 92, 98, 142].

Verschiedene Arten von Wasser können differenziert werden: „Bound water“ steht im direkten Zusammenhang zur Calcium-Phosphor-Relation (OH<sup>-</sup>-Gruppe, Hydroxygruppe) [92]; und ein möglicher Ersatz von Ca<sup>2+</sup>-Ionen durch H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>-Gruppen (Oxoniumion-Gruppen) wurde in Betracht gezogen. Ein unbekannter nicht zu beseitigender Rest, der sich im Verhältnis zu der Calcium-Phosphor-Relation befindet, wird in dem nicht entfernbaren OH<sup>-</sup> des Apatits gesehen und soll bei 1,59 mol liegen [142].

Mit direkten Messungen von Wasser und Protonen mittels kernmagnetischer Resonanzspektrometrie (vgl. auch [18, 117]) und chemischer Analytik in Verbindung mit thermogravimetrischer Hoch-

temperaturanalyse [97] konnten unmittelbar drei Arten von Wasserstoffprotonen unterschieden werden:

1. Der Verlust des Wassers bei 100 °C, austauschbar mit schwerem Wasser (Deuteriumoxid, D<sub>2</sub>O), beträgt 0,6–1 %, ist freies ungebundenes Wasser.
2. Die Menge gebundenen [92] („gefangenen“) Wassers in frei beweglicher Fraktion [93, 94, 97], welches mit dem Calcium-Phosphor-Verhältnis in Beziehung steht, ist nicht gegen D<sub>2</sub>O austauschbar, liegt bei 0,8 mol (1,5 % des Schmelzes) und ist durch Temperaturen von 100–900 °C entfernbare und kann Hydroniumion zum Ersatz der Calcium- sowie der Phosphor-Position spenden [92].
3. Der Wasseranteil, der dem Äquivalent von 2 mol entspricht, bei 900–1400 °C entfernbare ist und bei 900 °C als freie Wasserfraktion in Größenordnungen von 3,5–3,6 % detektiert werden kann, lässt sich unter normalen Bedingungen nicht mehr zu einer Rehydratation heranziehen, wenn er einmal aus der Zahnschmelz entfernt wurde.

*Little und Casciani* sowie *Little und Steadman* [93, 94] sahen nach ihren Untersuchungen in den Jahren 1962 und 1966 im Gegensatz zu vorausgegangenen Publikationen von *Trautz* [142], *McConnell* [99], *Hendricks und Hill* [64] und nach der früheren Vermutung von *Little und Cueto* [92], dass sich Wasser (H<sub>2</sub>O) anstatt des Oxoniumions (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) in der Position des CO<sub>2</sub> und anstatt der OH<sup>-</sup>-Gruppe in der Ecke der Kristallzelle befindet. In ihren thermogravimetrischen Analysen konnten sie den gesamten Gewichtsverlust von isoliertem pulverisierten Zahnschmelz auf > 4,5 % bzw. 7,5 % des Gesamtgewichtes bei 100 °C bestimmen [93, 94].

Den drei Wasserarten von *Little und Casciani* [93] stellten *Le Geros et al.* [85] als Ergebnis ihrer Studien zwei Wasserfraktionen entgegen. Bei der einen Fraktion handelte es sich um von der Zahnschmelz absorbiertes lose gebundenes Wasser, welches beim Erhitzen bis 200 °C ohne Veränderung der Kristallgitterkonstanten entfernbare ist,

sodass jederzeit eine reversible Rehydrierung herbeigeführt werden kann, und bei der anderen um Kristallwasser, welches zwischen 200 und 400 °C irreversibel ausgetrieben wird. Durch eine Erhitzung über 200 °C kommt es hierbei zu einer Kontraktion der a-Achse des Kristallgitters. Der Ursprung jenes Kristallgitterwassers ist nicht geklärt, wird aber sowohl in einem  $\text{H}_2\text{O}-\text{OH}^-$  - als auch in einem  $(\text{HPO}_4)^{2-}$  - und  $(\text{PO}_4)^{3-}$  -Austausch gesehen.

Demgegenüber wird beispielsweise in der Mineralogie die im Kristall befindliche Flüssigkeit unterschieden (a) in eingeschlossene Flüssigkeit („fluid inclusions“), (b) in an Gitterplätzen über Van-der-Waals-Kräfte nur schwach gebundenes molekulares Kristallwasser, welches beim Erhitzen relativ leicht herausgetrieben wird, (c) in negativ geladene Hydroxylgruppen mit einem festen Platz im Kristallgitter, welche erst bei einigen hundert Grad Celsius in Form von sogenanntem Konstitutionswasser entweicht, und (d) in freies Wasser, welches sich in Hohlräumen sammelt (Zeolithwasser), in Spalten und Poren durch Kräfte der Oberflächenspannung festgehalten wird und durch leichtes Erhitzen bei 100–120 °C entfernbare (Kapillarwasser) ist, sowie (e) in Kolloidwasser, das an der Oberfläche durch schwache Bindungskräfte unabhängig von der Kristallstruktur anhaftet.

Der größte Teil des Wassers, im ausgereiften Schmelz jedenfalls, ist an Apatitkristalle gebunden (Hydratationsschale) und nur etwa ein Viertel ist in der organischen Substanz frei verfügbar [2, 38, 122]. Die die Kristalle umgebenden Hydratationsschalen sind wiederum bedeckt von Proteinen und Lipiden. Der lose gebundene Anteil des Wassers ist hauptsächlich mit organischer Materie assoziiert. Der Schmelz ist befähigt, Wasser aufzunehmen. Er dient als Molekularsieb, welches einen Ionenaustausch erlaubt. Jene Ionen können nun mit dem Flüssigkeitsstrom in den und aus dem Schmelz transportiert werden [63].

## 2.2 Wissenschaftliche Grundlagen der Farbenlehre und Farbmessung – höhere Farbmatrik

Was ist Farbe? Dieser Frage nähert sich beispielsweise die Deutsche Industrienorm (DIN) 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“ [39]. Und *Johann Wolfgang von Goethe* formulierte es so: „Farben sind Taten des Lichtes.“

Es 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 über eine Reizung der Rezeptoren, jener 6 Millionen Zapfen 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 dem Metaboliten, welcher über die G-Protein-cGMP-Achse eine Abnahme des Natriumleitwertes sowie dadurch eine Hyperpolarisation verursacht), generiert und im nachgeschalteten Nervensystem (Nervus opticus, Chiasma nervi optici, Tractus opticus) sowie im Gehirn (subkortikale visuelle Zentren insbesondere der Corpus geniculatum laterale, visueller Cortex) zur subjektiven Wahrnehmung aufbereitet und verarbeitet wird [57]. Nachdem von einem Objekt reflektiertes Licht das Auge getroffen hat, wird die Farbe als ein Sinneseindruck im Gehirn erzeugt und umgesetzt [6]. Betrachtet man einen Gegenstand, so gilt seine Farbe noch vor seiner Form als das wichtigste Merkmal seiner Charakterisierung [81].

*Sir Isaak Newton* (1643–1727) war es, der sich ab 1670, auf physikalische Denkweisen stützend, optischen Experimenten, welche die Zerlegung des weißen Lichtes mithilfe von Prismen in seine Spektralfarben zur Grundlage hatten, widmete und in Folge den Wellencharakter des Lichtes erkannte [6]. In *Newtons* zentralem Werk

„Opticks“ von 1704 wurden diese derartig ermittelten Farben (Rot, Orange, Gelb, Grün, Cyanblau, Ultramarinblau und Violettblau) in einem Kreis angeordnet und der Schritt wurde zu einer zweidimensionalen Farbordnung vollzogen [62, 146]. Heute weiß man, dass der Brechungsindex der Lichtanteile maßgeblich von ihrer Wellenlänge abhängt. Er nimmt vom Roten zum Blauen hin zu, sodass rotes Licht stärker als das Blaue gebrochen wird. Diese sogenannte 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, dessen 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 und 780 nm (vgl. [121, 141]. Newtons Versuche belegten, dass die Farben nicht erst an der Oberfläche der bestrahlten Objektfläche entstehen, sondern bereits im Licht enthalten sind [118, 119].

Die heute bestätigte Theorie („theory of trichromatic vision“) von *Thomas Young* (1773–1829), der zufolge das Auge durch die Wahrnehmung von nur drei Wellenlängen alle Farben kombinieren kann, fußte auf den additiven Primärfarben Rot, Grün, Blau und stellte den Ausgangspunkt zu der oben beschriebenen Sinneswahrnehmung dar. Den Grundstein der Farbmeterik (Kolorimetrie) und des subjektiven Farbvergleichs legte der schottische Physiker *James Clerck Maxwell* (1831–1879) in seiner „Theorie des Farbensehens“. Er zeigte, dass alle Farben durch Mischungen der drei Spektralfarben zustande kommen können, charakterisierte die Lichtausbreitung und wies auf die Existenz elektromagnetischer Wellen hin. In einem Versuch zur Farbmessung („colour box“) hatte *Maxwell* Probanden Farben mit Farbmischungen aus diesen sog. Grundfarben vergleichen lassen („colour match“). *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“) einführte und charakterisierte [50]. Schließlich versuchten die Physiker *Robert Luther* und *N. D. Nyberg*, das letzte subjektive Moment abzuschaffen und durch ein mathematisch objektives System (Farbsystem) zu ersetzen. So publizierten sie in den Jahren 1927 und 1928 mit dem Blick auf die Frage gerichtet, welch ein Körper entsteht, wenn man Pigmentfarben in ein theoretisches Konstrukt („Farbkörper) einbringt, den sog. „color solid“. Indem sie Farben durch Zahlen gekennzeichnet und Farben zueinander in Beziehung gesetzt hatten und so Farben messbar wurden, begründeten sie die Farbmeterik im engeren Sinne [96, 106].

Ein sehr weit verbreitetes und heute noch insbesondere in angelsächsischen Ländern genutztes Farbsystem, welches ebenfalls Zahlen nutzt, wurde zwischen 1905 und 1916 von dem amerikanischen Maler *Albert Henry Munsell* (1858–1918) entwickelt. Zunächst noch unter dem Einfluss von *Odgen N. Roods* veröffentlichte *Munsell* 1905 in „A Color Notation“ eine Farbkugel, später, durch sein Bestreben, jeder Farbabstand müsse mit jedem benachbarten gleich groß wirken, erschien 1915 in seinem „Color Atlas“ der von ihm so benannte „color tree“ („Farbbaum“). Nach *Munsells* Tod im Jahre 1929 erschien die heute noch gültige Fassung „Munsell Book of Color“, die 1942 von der Organisation „American Standards“ in seiner Verwendung zur Farbspezifikation von Oberflächen empfohlen wurde [105].

Das System von *Munsell* fand in unzähligen Veröffentlichungen Erwähnung. Beispielsweise wurde für zahnmedizinische Zwecke die Farbkugel von *McLean* [101] beschrieben und in Form eines Zylinders mit einer Vielzahl aufeinandergereihter Wagenräder von *Sproull* [136, 137] modifiziert.

Um nun auch die Farbe einer objektiveren Auswahl und Beschreibung zuführen zu können, verhalfen mehrere apparative Entwicklungen seit Ende des 19. Jahrhunderts. So konstruierte *Joseph Lovibond* 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 ermöglichte. 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 nahe kommen sollte (Dreifarbennmessgerät nach Guild-Beckstein-Richter). Die Apparaturen nach Lovibond und Guild-Beckstein-Richter sind dem Gleichheitsverfahren zuzuordnen, bei dem die zu bewertenden Proben mit Farbreferenzen visuell verglichen werden [8] (vgl. Abgleich zwischen Standardfarbmuster 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) war Ausgangspunkt zahlreicher späterer Entwicklungen [121].

Es muss bei heutigen Apparaturen grundsätzlich zwischen einerseits dem Dreibereichsverfahren (Tristimulus-Methode), bei dem das von einer Probe reflektierte Licht über drei an die Augenempfindlichkeit angepasste Farbfilter in seine Rot-, Grün- und Blauanteile zerlegt und die jeweilige Intensität mit Photoelementen gemessen (Messsignal je nach Farbfilter X, Y, Z, die Reflexionsgrade  $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) wird, und andererseits dem Spektralverfahren, bei dem das zu registrierende Licht mittels Konkavgitters in seine spektralen Anteile zerlegt und der Reflexionsgrad der Probe im Wellenlängenbereich von 380–720 nm je nach Auflösung des optischen Systems in 10 nm oder 20 nm schrittweise gemessen wird, unterschieden werden.

Allerdings sei an dieser Stelle angemerkt, dass das Spektralverfahren aufgrund der höheren Anzahl der Messpunkte im Vergleich zu den drei Werten ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) des Dreibereichsverfahrens und wegen der Möglichkeit zur Spektralanalyse und zur Verarbeitung der Ergebnisse unter verschiedenen Normlichtarten und Beobachtungswinkeln in der Fachwelt ein höheres Ansehen genießt.

$$X = a \cdot R_x + b \cdot R_z$$

$$Y = R_y$$

$$Z = c \cdot R_z$$

*(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.*

$$X = k * \int_{\lambda=380}^{720} S(\lambda) * \bar{x}(\lambda) * \beta(\lambda) * d\lambda$$

$$Y = k * \int_{\lambda=380}^{720} S(\lambda) * \bar{y}(\lambda) * \beta(\lambda) * d\lambda$$

$$Z = k * \int_{\lambda=380}^{720} S(\lambda) * \bar{z}(\lambda) * \beta(\lambda) * d\lambda$$

$$k = \frac{100}{\int_{\lambda=380}^{720} S(\lambda) * \bar{y}(\lambda) * d\lambda}$$

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

Farbsysteme beispielsweise nach *Munsell* oder *Ostwald* oder mathematische Konstrukte zeigten nun ihre Grenzen; und als der Wunsch der Fachwelt in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts nach weitergehender und höherer Objektivierbarkeit laut wurde, sollte ein Rahmen für Farbmessungen (Kolorimetrie) diese Genauigkeit erzielen, indem ein Farbdigramm geschaffen wurde, das auf sinnesphysiologischen Messungen beruht. Eine solche „Normentafel“ oder „Standardvalenzsystem“ 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 seiner Dreiecks-konstruktion 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. Guild*, in welchen man auf diese Weise Spektralwertkurven („colour matching functions“) erstellte, durchgeführt, indem normalsichtige Personen monochromatisches Licht von immer der gleichen Energie einer Primärfarbe zuordnen sollten [121, 140]. Mittelwerte eines „Standardbeobachters“ aus den sich ergebenden Dreifarbenwerten (R, G, B bzw. X, Y, Z), aufgetragen zu den Wellenlängen, ergaben so die Spektralkurven. Der Helligkeitswert Y gibt das Verhältnis zwischen zurückgeworfenem und einfallendem Licht in Prozent an; so hat eine Weißplatte 100 % Reflexion [149, 150].

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 ihrer Integrale, die sich jeweils unter einer bestimmten Lichtart zu gleichen Werten aufaddieren, unter der einen Lichtart gleichfarbig und unter einer anderen – aufgrund differenter Integralsummatation – unterschiedlich in der Farbe erscheinen (Metamerie). Metamerie wird durch den Metamerie-Index (M) (DIN 6172) [42] repräsentiert, welcher den Farbabstand zwischen zwei Proben, der durch Lichtartenwechsel entsteht, beschreibt. Je kleiner der Metamerie-Index, desto besser ist die Farbübereinstimmung der Proben.

Nach *CIE* sollen Farbproben so bei durchschnittlicher Tagesbeleuchtung (C – 6.774 K ohne ultraviolette [UV-] Strahlung, bläuliche Farbe), bei künstlicher Lichtquelle (100-Watt-Glühbirne, Normlicht A – 2.856 K, Glühlampe mit gelboranger Farbe, 380–770 nm), bei Sonnenlicht am Mittag (B – 4.870 K) oder bei mittlerem Tageslicht nach DIN 6173 Teil 2 betrachtet werden [43]. Heutzutage ist das durchschnittliche Tageslicht C (*CIE* 1931) zugunsten der Anwendung des Normlichts D65 („daylight“ mit einer Farbtemperatur von 6.504 K einschließlich der im nahen UV-Bereich, bei Wellenlängen von 300–400 nm und eine dem natürlichen Sonnenlicht entsprechende ultraviolette Strahlungsintensität von 300–830 nm, DIN 6173) in Europa und des Normlichtes D75 in Amerika verdrängt worden [81]. Die Zahlen in Kelvin (K) 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 Gelben und 9.300 K entsprechen dem Blau. Die Temperatur von neutralem Weiß liegt bei 6.504 K (entsprechend Normlicht D65).

*Preston und Bergen* sowie *Preston* erkannten hier die Gegensätzlichkeit zwischen der Lichttemperatur und der Farbemtion, welche eher die Farben Rot und Gelb mit wärmeren Temperaturen aufgrund jahrtausendlanger Erfahrungen (Feuer = angenehme Wärme) und die Farbe Blau mit Eis und Kälte assoziieren lässt [118, 119].

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 2°-Normbeobachtungswinkel gemessenen Werte X, Y, Z wurden so zu x, y, z (*CIE* 1931) (s. Formel 2.2.-3); 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. (Spektrallinienzug des sichtbaren Lichtes zwischen den Endpunkten 770 nm und 450 nm).

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

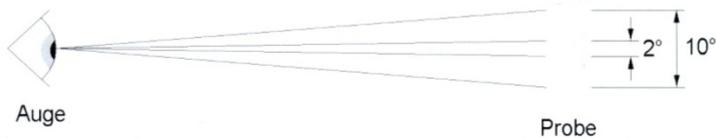
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (2.2.-3)$$

Die zu *Hermann von Helmholtz'* Zeiten notwendige Gesichtsfeldgröße, welche ein rein foveales, von den Stäbchenzellen und von den hell-dunkel-empfindlichen Rezeptoren der Netzhaut für das Sehen von Schwarz, Weiß und Grautönen des dunkeladaptierten Auges unbeeinflusstes Farbsehen ermöglichen sollte, wurde bei 2° (*CIE* 1931) festgelegt und war auch in den Apparaturen, die *Guild* und *Wright* 1931 zu 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* beruhte, die unter einem Gesichtsfeld von  $10^\circ$  („farbmetrischer Großfeld-Normalbeobachter 1964“ – Großfeldvalenznormsystem) entstanden sind [121, 134]. In DIN 5033 Teil 2 [39] ist 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 bei Tage eines hell adaptierten Auges) in zunehmendem Maße peripher des Sehentrums liegende Stäbchenzellen, also die Rezeptoren des skotopischen Sehens (Schwarzweiß-, Nachtsehen, Sehen bei geringen Leuchtdichten), der Netzhaut angesprochen. Dies führt zu einer Änderung der Normspektralwerte in Beziehung zu den Wellenlängen und ruft somit andere Farbmesswerte hervor. Der  $2^\circ$ -Normbeobachter bewertet eine Farbfläche in der Größenordnung einer Münze in 50 cm Entfernung, während der  $10^\circ$ -Normbeobachter 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  $2^\circ$  physiologisch betrachtet und somit optimaler beschrieben wird. Es besteht resultierend, aufgrund von differierenden Rezeptionsflächen und deren Ausdehnung, ein Unterschied in der Wahrnehmung bzw. bezüglich der Messwerte. Die Abhängigkeit der Farbwahrnehmung vom Normbeobachtungswinkel und der daraus resultierenden Rezeptionsfläche ist verständlich, da ein  $2^\circ$ -Beobachtungswinkel Rezeption im Sinne eher photopischen und bei  $10^\circ$ -Beobachtung im Sinne eher skotopischen Sehens bedeutet.

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 reiz-aufnehmende Fähigkeiten. Entsprechend ihrer differierenden Sehfarbstoffe und der sich hieraus ergebenden spektralen Absorption entsprechender Energieanteile bzw. Wellenlängenbereiche des Lichtes, welche ihren Zerfall verursachen, lassen sich drei Zapfen mit entsprechenden Empfindlichkeiten für definierte Farbbereiche unterscheiden. Die Normbeobachtungswinkel begründen auf diese Weise die Variation der Spektralwerte und der Normfarbtafel.



**Abb. 2.2.-1** Darstellung eines Sichtfeldes eines  $2^\circ$ - und eines  $10^\circ$ -Normbeobachters; spektrale Empfindlichkeit für vornehmlich Tages- und Nachtsehen (Bildquelle: [121]).

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-Farbton-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 und sind veranschaulicht in DIN 5033 Teil 2 [39]. Der Schnittpunkt aller drei Flächen bestimmt die Farbe. 1960–1962 wurde zudem eine DIN-Farbenkarte (DIN 6164) festgelegt [121]. Für die objektive Farbmessung an glatten Flächen gilt seit 1933 die Vorschrift nach DIN 5033 (AOCS Cc 13a-43, FAC Standard Color) [39]. Das Deutsche Institut für Normung beschreibt in seinen Vorschriften die Grundbegriffe der Farbmeterik (DIN 5033 Teil 1), Normvalenzsysteme (DIN5033 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), die Farbwiedergabe (DIN 6169), den Metamerie-Index von Probe-paaren bei Lichtartwechsel (DIN 6172), die allgemeinen Farbabmustersbedingungen (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) und eine Bestimmung der Signifikanz von Farb-abständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel (DIN 55600) [39–44].

Das bereits erwähnte *CIE*-System sieht es nicht vor, den Betrach-ter Farbunterschiede (Buntheitsdifferenzen) als Abstände im Schau-bild erkennen zu lassen. Die berechtigte Kritik der Fachwelt an je-nem System, es sei die Farbe Grün überrepräsentiert und rote, viole-te und blaue Farbtöne der Ecken nicht ausreichend gewürdigt, hat die *Commission Internationale d'Eclairage* bewogen, ein neues System, das *CIELAB – CIE L\*a\*b\** (DIN 5033, DIN 6174), zu beschließen, welches 1976 eingeführt wurde (s. Abb. 2.2.3). Es handelt sich bei diesem (mithilfe der Adams-Nickerson-Kubikwurzel-Formel [s. 2.2.-4] errechneten, empfindungsgemäß gleichabständigen Darstellung, auf der Gegenfarbtheorie basierenden „psychometrischen Farbdiag-ramm“) um eine modifizierte Kubus-Kugel, die über eine transversale Achse (+a\*/-a\*; Rot/Grün), sagittale Achse (+b\*/-b\*; Gelb/Blau) und Vertikalachse (L\*; „psychometrische Helligkeit“, „Leichtigkeit“, „lightness“ – von idealem Schwarz/Nero/0 nach idealem Weiß/Bianco/100 aufsteigend) aufgespannt wird. Die Umrechnung vom alten *CIE*-System ist problemlos möglich [39, 44]. Ebenfalls auf der Gegenfarbentheorie, welche besagt, eine Farbe könne nie-mals weder gleichzeitig Rot und Grün noch gleichzeitig Gelb und Blau sein, fußt das *CIELCH*-System (L\*C\*h) der *CIE* aus dem glei-chen Jahre, 1976: Den Farborten, kreisförmig um die L\*-Achse ange-ordnet, sind die gleiche Buntheit C\* (Chroma), jedoch unter-schiedliche Bunttöne h zueigen. Farborte, die auf einem von der L\*-Achse ausgehenden Radiusstrahl liegen, besitzen den gleichen Bunt-ton h, jedoch steigende Buntheit C\*.