André Hoffmann

Erforschung der Entstehung von Farben und Reflexionsspektren an geschichteten und komplex aufgebauten Materialien

Grundlagenforschung an Zähnen

André Hoffmann

Erforschung der Entstehung von Farben und Reflexionsspektren an geschichteten und komplex aufgebauten Materialien

Grundlagenforschung an Zähnen

© 2000 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.

Inhalt

1.	**Vorwort und Einleitung**	1
2.	**Literaturübersicht**	4
3.	**Material und Methodik**	12
3.1	Verwendete Zähne	12
3.2	Instrumente und Apparaturen	13
3.2.1	Elektronisches Hygro-Thermometer (Thies Clima)	13
3.2.2	Spektrophotometer CM-503c	14
3.2.2.1	Meßprinzip	15
3.2.2.2	Blockdiagramm	17
3.2.2.3	Ablauf einer Messung	18
3.2.2.4	Vormessung	18
3.2.2.5	Technische Daten	19
3.2.2.6	Kalibrierstandard CM-A82	20
3.2.3	Spektrophotometer CM-503i	21
3.2.3.1	Meßprinzip, Beleuchtungs- und Betrachtungssystem	22
3.2.3.2	Blockdiagramm	24
3.2.3.3	Ablauf einer Messung	24
3.2.3.4	Vormessung	25
3.2.3.5	Technische Daten	25
3.2.3.6	Kalibrierstandart CM-A21	26
3.2.4	Meßgerätehalterung CM-A3 (Minolta)	27
3.2.5	Mikroskopisches Chromameter CR-241	28
3.2.5.1	Technische Daten	29
3.2.5.2	Weißreflektor CR-A43	29
3.2.6	Farbringe	30
3.2.7	Flüssigkeitsmeßgerät MA100 (Sartorius)	32
3.2.7.1	Technische Daten	35
3.2.8	Mikrowaage MC21S (Sartorius)	36
3.2.8.1	Technische Daten	40
3.2.9	PJC/CVL 3 Pantone-Lichtkabine (JUST NORMLICHT)	40
3.2.9.1	Technische Daten	41
3.2.10	CC/FS 2-AY-2/36 Farbprüfleuchte (JUST NORMLICHT)	41
3.2.10.1	Technische Daten	41
3.3	Meßvorrichtung und Versuchsaufbau	42
3.4	Umgebungsbedingungen	49
3.5	Meßgrößen, Normlicht, Weißabgleich	49
4.	**Voruntersuchungen – über Trial und Error zur Hochpräzisionsmethodik**	**51**
4.1	Einleitung zu den Voruntersuchungen: In-vivo- und In-vitro-Testung von Spektrophotometern verschiedener Hersteller und die Suche nach einem geeigneten Feuchtigkeitsmeßgerät	51
4.2	Art der Voruntersuchungen	53
4.3	**Ergebnisse der Voruntersuchungen**	**54**
4.3.1	Gewichtsentwicklung während des De- und Rehydrierungsprozesses	54
4.3.2	Auswirkung einer definierten und gerichteten Verschiebungen des Objektes unter der Meßapparatur	56

4.3.3 Auswirkung einer definierten und gerichteten Verschiebungen des Objektes unter dem mikroskopischen Chromameter 58
4.3.4 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 62
4.3.5 Analyse der VITAPAN classical- und VITAPAN-3D-MASTER-Farbringe mit Hilfe der Spektrophotometer CM-503c, CM-503i und dem mikroskopischen Chromameter CR-241 64
4.3.5.1 Methodik zur Farbringanalyse 64
4.3.5.2 Ergebnisse der Analyse des VITAPAN classicals-Farbrings 65
4.3.5.3 Ergebnisse der Analyse des VITAPAN 3D-MASTER-Farbrings 65
4.3.6 Zahncharakteristische Spektralkurven 66
4.3.7 Farbmessung vor und nach Dehydrierung 68
4.3.8 Rehydrierung völlig trockener Zähne 70
4.3.8.1 Material und Methode 70
4.3.8.2 Ergebnisse 70
4.3.9 Rehydrierung völlig luftgetrockneter Zähne 71
4.3.9.1 Material und Methode 71
4.3.9.2 Ergebnisse 71

5. Studien dieser Arbeit 73

5.1 Erfassung der Farbdifferenz zwischen flüssigkeitsgesättigten und trockenen Zähnen in Relation zu ihrem Flüssigkeitsgehalt 73

5.1.1 Material und Methodik 73

5.1.2 Ergebnisse 74

5.1.2.1 Ergebnisse der L*-Wertemessung vor und nach Dehydrierungsprozeß 74
5.1.2.2 Ergebnisse der a*-Wertemessung vor und nach Dehydrierungsprozeß 74
5.1.2.3 Ergebnisse der b*-Wertemessung vor und nach Dehydrierungsprozeß 75
5.1.2.4 Ergebnisse der Metamerieindizes vor und nach dem Dehydrierungsprozeß 75
5.1.2.5 Zahnfarbraum vor und nach Dehydrierungsprozeß – gemessen mit dem Spektrophotometer CM-503c 76
5.1.2.6 Zahnfarbraum vor und nach Dehydrierungsprozeß – gemessen mit dem Spektrophotometer CM-503i 77
5.1.2.7 Zahnfarbraum vor und nach Dehydrierungsprozeß – gemessen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 78
5.1.2.8 Subjektive Bestimmung der Zahnfarbe vor und nach Dehydrierung 79
5.1.2.9 Gewicht vor und nach Dehydrierungsprozeß 89
5.1.2.10 Gewichtsverlust während des Dehydrierungsprozesses 89

5.2 Farberfassung einer beschleunigten Trocknungschronologie 90
5.2.1 Material und Methodik 90
5.2.2 Ergebnisse 91
5.2.2.1 Spektralkurven des Spektrophotometers CM-503c von nassen und trockenen Zähnen. 91
5.2.2.2 Beschleunigte Dehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 93

5.2.2.3 Beschleunigte Dehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 93
5.2.2.4 Beschleunigte Dehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 94
5.2.2.5 Beschleunigte Dehydrierung – C*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 94
5.2.2.6 Beschleunigte Dehydrierung – h-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 95
5.2.2.7 Spektralkurven des Spektrophotometers CM-503i von nassen und trockenen Zähnen 95
5.2.2.8 Beschleunigte Dehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 97
5.2.2.9 Beschleunigte Dehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 97
5.2.2.10 Beschleunigte Dehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 98
5.2.2.11 Beschleunigte Dehydrierung – C*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 98
5.2.2.12 Beschleunigte Dehydrierung – h-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 99
5.2.2.13 Ergebnisse der Thermogravimetrie 100
5.2.2.14 Meßgerätevergleich 101
5.2.2.15 Vergleich der Spektralkurven des Spektrophotometers CM-503c mit denen des Spektrophotometers CM-503i vor Dehydrierung 103
5.2.2.16 Vergleich der Spektralkurven des Spektrophotometers CM-503c mit denen des Spektrophotometers CM-503i nach Dehydrierung 104
5.2.2.17 Veränderung des Zahnfarbraumes des Spektrophotometers CM-503c mit der Dehydrierungszeit 105
5.2.2.18 Veränderung des Zahnfarbraumes des Spektrophotometrers CM-503i mit der Dehydrierungszeit 106
5.2.2.19 Farbräume von nassen und trockenen Zähnen der Spektrphotometer CM-503c und CM-503i im direkten Vergleich 107

5.2.2.20 Ergebnisse der subjektiv-visuellen Farbbewertung 108
5.2.2.20.1 Neue Methodik zur Auswertung der subjektiven Ergebnisse und zu vergleichenden Untersuchungen 108
5.2.2.20.2 Vergleich der während des Dehydrierungsprozesses subjektiv erfaßten Farbringproben der VITAPAN classical- und -3D-MASTER-Zahnfarbringe anhand der VITA-Farbmaßzahlen 109
5.2.2.20.3 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 Spektrophotometers CM-503c 110
5.2.2.20.4 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 Spektrophotometers CM-503i 111
5.2.2.20.5 Dehydrierungsprozeß – die subjektive Bestimmung der Zahnfarben mit dem VITAPAN classical und 3D-MASTER-Farbring in den L*a*b*-Werten der Farbringanalysen der Vorstudie mit Hilfe des mikroskopischen Chromameters CR-241 (0,3 mm) 112

5.2.2.20.6 Vergleich der subjektiv über Farbringmuster erfaßten L*-Werte mit apparativ gemessenen Ergebnissen 113
5.2.2.20.7 Vergleich der über Farbringe subjektiv erfaßten a*-Werte mit apparativ gemessenen Ergebnissen 114
5.2.2.20.8 Vergleich der subjektiv über Farbringmuster erfaßten b*-Werte mit apparativ gemessenen Ergebnissen 115
5.2.2.20.9 Indirekter Meßgerätevergleich anhand der im Dehydrierungsprozeß gewählten Vergleichsproben des VITAPAN classical- und des VITAPAN 3D-MASTER-Farbringes 116

5.3 Farbmetrische Erfassung der Flüssigkeitsabgabe- und Flüssigkeitswiederaufnahmechronologie luftgetrockneter Zähne 119

5.3.1 Material und Methodik 119

5.3.2 Ergebnisse 120
5.3.2.1 Einfluß von De- und Rehydrierungsprozessen auf die Spektralkurven des Spektrophotometers CM-503c 120
5.3.2.2 De- und Rehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 122
5.3.2.3 De- und Rehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 123
5.3.2.4 De- und Rehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 124
5.3.2.5 De- und Rehydrierung – C*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 125
5.3.2.6 De- und Rehydrierung – h-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503c 126
5.3.2.7 Einfluß von De- und Rehydrierungsprozessen auf die Spektralkurven des Spektrophotometers CM-503i 127
5.3.2.8 De- und Rehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 129
5.3.2.9 De- und Rehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 130
5.3.2.10 De- und Rehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 131
5.3.2.11 De- und Rehydrierung – C*-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 132
5.3.2.12 De- und Rehydrierung – h-Wertemessungen mit dem Spektrophotometer CM-503i 133
5.3.2.13 De- und Rehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 0,3 mm im Durchmesser 134
5.3.2.14 De- und Rehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 0,3 mm im Durchmesser 135
5.3.2.15 De- und Rehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 0,3 mm im Durchmesser 136

5.3.2.16	De- und Rehydrierung – L*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 1,8 mm im Durchmesser	137
5.3.2.17	De- und Rehydrierung – a*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 1,8 mm im Durchmesser	138
5.3.2.18	De- und Rehydrierung – b*-Wertemessungen mit dem mikroskopischen Chromameter CR-241 auf einer Fläche von 1,8 mm im Durchmesser	139
5.3.2.19	Gewichtsentwicklung während des De- und Rehydrierungsprozesses	140
5.3.2.20	Vergleich der Spektralkurven der Spektrophotometer CM-503c und CM-503i.	142
5.3.2.21	Vergleich der Meßgeräte anhand der L*-, a*-, b*-, C*-, h-Werteentwicklung innerhalb des De- und Rehydrierungsprozesses	144
5.3.2.22	Gegenüberstellung der mit den Spektrophotometern CM-503c und CM-503i sowie mit dem mikroskopischen Chromameter erstellten Zahnfarbräume	149
5.3.2.23	**Subjektive Farbringbestimmung**	**154**
5.3.2.23.1	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in den L*-, a*-, b*-Werten von VITA innerhalb des De- und Rehydrierungsprozesses	154
5.3.2.23.2	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in den L*-, a*-, b*-Werten des Spektrophotometers CM-503c	157
5.3.2.23.3	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in den L*-, a*-, b*-Werten des Spektrophotometers CM-503i	160
5.3.2.23.4	Subjektive Erfassung des De- und Rehydrierungsprozesses in den L*-, a*-, b*-Werten des mikroskopischen Chromameters CR-241	163
5.3.2.23.5	Vergleich der L*-Farbwertergebnisse der subjektiven Farbbewertungsmethodiken mit den Resultaten der objektiven Messungen	166
5.3.2.23.6	Vergleich der a*-Farbwertergebnisse der subjektiven Farbbewertungsmethodiken mit den Resultaten der objektiven Messungen	168
5.3.2.23.7	Vergleich der b*-Farbwertergebnisse der subjektiven Farbbewertungsmethodiken mit den Resultaten der objektiven Messungen	170
5.3.2.23.8	Die subjektiv-visuelle Zahnfarbbestimmung in den L*-Werten der Farbmeßapparaturen und von VITA	172
5.3.2.23.9	Die subjektiv-visuelle Zahnfarbbestimmung in den a*-Werten der Farbmeßapparaturen und von VITA	174
5.3.2.23.10	Die subjektiv-visuelle Zahnfarbbestimmung in den b*-Werten der Farbmeßapparaturen und von VITA	176
6.	**Nachuntersuchungen**	**178**
6.1	Langzeitmessungen des Gewichtes – Lufttrocknung	179
6.2	Farbmessungen an der vestibulären Seite der Zahnkrone. – Langzeitmessungen	181
7.	**Diskussion**	**192**
8.	**Zusammenfassung**	**210**
10.	**Literaturverzeichnis**	**214**

Abb. 1 Versuchsanordnung von links nach rechts: Mikrowaage MC21S, Sartorius Moisture Analyzer MA100, Lichtkabine, Farbprüfleuchte (oben), Spektrophotometer CM-503i, Spektrophotometer CM-503c und mikroskopisches Chromameter CR-241.

1. Vorwort und Einleitung

Farben bestimmen das Leben jedes Menschen. Sie machen das Leben, wie wir es kennen, erst möglich. Würde die Menschheit keine Farben kennen, dann würde die Welt optisch nicht erfahrbar, würden Objekte von der Umgebung optisch nicht zu unterscheiden sein, würde es im Wesentlichen keine beschreibende Sprache und keine orientierende Bewegung geben – der Mensch wäre kein Mensch. Und Farben wecken Emotionen, beeinflussen Gefühle und besitzen eine eigene Ästhetik. In der Zahnmedizin stellt nach Ansicht des Autors die von ihm sogenannte Zahnfarbästhetik – die Wortschöpfung aus Zahnfarbe und Ästhetik – eine von zwei Säulen der dentalen Ästhetik und zugleich die entscheidendere für eine gelungene Restauration. Denn Abweichungen in der dentalen Farbe werden noch vor Abweichungen in der Zahnform wahrgenommen und gegebenenfalls als störend empfunden, wie dieser anhand seiner Erfahrung zu berichten weiß.

Die Zahnmedizin insgesamt hingegen läßt sich in Funktion (Kaufunktion, Gesundheit) und Ästhetik gliedern. Nichts lag näher, als die Entstehung der Zahnfarbe insgesamt – als System aus mannigfaltig zusammenwirkenden Einflußfaktoren – verstehen zu wollen. Lediglich einen einzelnen Aspekt zu behandeln oder einer einzelnen Fragestellung nachzugehen, war nicht zielführend. Es galt die Zahnfarbe systematisch zu analysieren und mit Hochpräzisionsmeßsystemen zu erforschen, um ihr das Geheimnis des orchestralen Zusammenspiels der sie ausmachenden Faktoren zu entlocken.

Bisher gab es im Wesentlichen 44 meßtechnische Studien. Davon basierten 19 auf Spektralphotometermessungen (vgl. [Bolt et al. 1994, el-Sayed et al. 1994, Fay et al. 1999, Groh et al. 1992, Horn et al. 1998, Ichesco et al. 1991, Ishikawa-Nagai et al. 1992, 1994, Kleber et al. 1998, Koertge et al. 1998, Leard und Addy 1997, O'Brien and Groh 1990, 1989, 1997, Takeda et al. 1996, van der Burgt et al. 1990, White und O'Brien 1989, Zhu et al. 1998]) und 25 (vgl. [Belli et al. 1997, Douglas 1997, Goldstein und Schmitt 1993, Goodkind und Schwabacher 1987, Johnston und Kao 1989, Kowitz et al. 1994, Lenhard 1996, Lu und Zhao Y. 1993, Ma et al. 1999, Manly 1947, Matis et al. 1998, Matis 1998, Millstein et al. 1988, Nakamura et al. 1993, Nathoo et al. 1994, Nissan et al. 1992, O'Brien et al. 1989, Okubo et al. 1998, Ouellet et al. 1992, Rosenstiel et al. 1991, Rosenstiel et al. 1996, Rosenstiel et al. 1989, Rustogi und Curtis 1994, Seghi et al. 1990, Seghi et al. 1989]) wurden mit einfacheren Farbmeßgeräten durchgeführt. Sie befaßten sich zumeist mit der Farbe von zahntechnischem Material oder spezifischen Fragestellungen, wie beispielsweise den Auswirkungen von Zahnpasta und dem Bleichen oder dem Einfluß bestimmter Stoffe, wie Chlorhexidin, Fluoridgele, Kaffee oder Tee.

Bolt et al. (1994) konnten zwar einen interessanten Effekt in Bezug auf die Meßöffnungsgröße erwähnen (Spektralphotometer mit „Fenstern“ von 3, 4 und 5 mm). Jedoch dürfte dieser Einfluß beispielsweise durch Trocknungsprozesse nach Lagerung in besonders flüchtiger Flüssigkeit (Formalin) und während der Zeit der Montage und des Wechsels der „Fenster“ erheblich beeinflußt und damit dieser Einflußfaktor nicht eindeutig isoliert worden sein. Tatsächlich gibt es auch einen doppelten Effekt in dieser Studie. Das auf die Probe gerichtete Meßlicht und das von der Probe reflektierte Licht müssen durch die Meßöffnung geleitet werden und wurden durch die Fenstergröße beeinflußt. In den gegenwärtigen Studien wurde der Effekt jedoch derart analysiert, daß das verwendete mikroskopische Chromameter nur das reflektierte Licht durch die Meßöffnung passieren läßt und das Umschalten von 1,8 mm auf 0,3 mm Meßöffnungsgröße und umgekehrt im Bruchteil einer Sekunde über den vorgesehenen Schalter erfolgte. Messungen auf zwei verschiedenen Meßflächengrößen efolgte deshalb ohne wesentlichen Zeitverzug und ohne wesentliche Trocknungsbeeinflussung. Das emittierte Licht wurde nur bei den Kontaktverfahren auch durch eine Öffnung gesendet. Darüber hinaus konnten bei den Analysen andere Einflußfaktoren, wie beispielsweise das Trocknen, quantifiziert und damit berücksichtigt werden.

Positionierung, also die Objekt-System-Relation hat Einfluß auf die Werte und deren Reproduzierbarkeit. Die Präzision in vitro mit Jig (vgl. Douglas 1997), also einem intraoralen Positionierungssystem, war zwar bereits schon gut, aber nicht ausreichend für eine Grundlagenfor-

schung mit höchster Präzision, sodaß die Entscheidung zugunsten der vorliegenden In-vitro-Studien mit Hochleistungspräzisionssystemen (High-End-Systeme[1] für diesen speziellen Zweck – Zahnfarbmessung mit Hochpräzisionspositionierung) und mit neuartigen hochpräzisen Positionierungsystemen getroffen wurde – Eigenentwicklungen.

Die Präzision und Wiederholbarkeit, die von Douglas (1997), Goldstein und Schmitt (1993) erreicht wurden, konnten für die gegenwärtigen Studien sehr deutlich bis fundamental über Hochpräzisionsmeßsysteme und Hochpräzisionspositionierung erhöht werden. Das war eine der Voraussetzungen für die Isolierung einzelner Einflußfaktoren und Erfassung des zeitlichen Ausmaßes der Trocknung und die Beantwortung der Frage: Wie lange trocknet ein Zahn optisch meßbar (> 1 Woche)?

Es ist ein weithin beobachtetes Phänomen, daß Zähne, die mit Kofferdam oder Watterollen trockengelegt oder die extrahiert sind, heller erscheinen. Eine Reihe von Lehrbüchern hat dieses Phänomen indirekt im Zusammenhang mit Zahnfarbbestimmung erwähnt. Einen wissenschaftlichen Beweis gab es hierfür nicht. Dieser wäre nur möglich, wenn sowohl die Helligkeit oder Farbe bzw. Farbwerte sowie das Gewicht bzw. der Gewichtsverlust als Ausdruck der Trocknung gemessen und die resultierenden Kurven zur Deckung gebracht werden könnten und Meßwertekurven Besonderheiten aufweisen, die nur mit einer Trocknung zu erklären wären.

Während es im Laufe des 20. Jahrhunderts zahlreiche Veröffentlichungen zum Wasser und Wassergehalt in Zähnen und in ihren Hartgeweben gab, ist es erstaunlich, daß bisher keine Untersuchung dieses grundlegende Thema der Helligkeit oder Zahnfarbe und Zahnfarbwerte (z. B. L*a*b*) in Abhängigkeit vom Flüssigkeitsgehalt, der Flüssigkeitsfreisetzungs- und der Flüssigkeitwiedersaufnahmeprozesse behandelt hatte. Ziel der Untersuchungen war es daher, den Zusammenhang zwischen Flüssigkeitsgehalt, Flüssigkeitsverlust (Trocknung), Flüssigkeitsabsorption und Zahnfarbe herzustellen. Diese Grundlagenforschung wurde auch entwickelt, um Informationen über diverse Farbeinflußfaktoren, den Flüssigkeitsfluß im Zahn und die Dynamik der Zahnflüssigkeit im und auf dem Zahngewebe während der Trocknung und Flüssigkeitswiederaufnahme zu liefern, Informationen, auf denen weiterreichende Schlußfolgerungen basieren werden.

Ein weiterer Schlüssel neben Hochpräzisionsmeßsystemen und Hochpräzisionspositionierung war die Auswahl der Systeme. Zwei Meßsysteme waren baugleich, vom selben Hersteller und unterschieden sich lediglich in der Meßgeometrie. Die eine der Meßgeometrien arbeitete mit Glanzeinschluß und die andere mit Glanzausschluß. So konnten die Unterschiede zwischen Werten und Kurven dieser Systeme den Glanzeinfluß auf die Farbkoordinaten bei feuchten, trocknenden, trockeneren und trockenen Zähnen bestimmen lassen. Zugleich war es gelungen, den Anteil der Flüssigkeit am dentalen Glanz zu ermitteln und die Fragen zu beantworten: Welchen Einfluß hat der Zahn und welchen Einfluß hat Zahnflüssigkeit am dentalen Glanz? Und welchen Einfluß hat der Glanz an der Zahnfarbe und den Farbkoordinaten?

Eine Analyse und auch ein Beweis sind dadurch charakterisiert, einen Einflußfaktor nicht nur zu vermuten, sondern auch zu isolieren, im Ausmaß zu erkennen und zu quantifizieren. Es muß also irgendwie gelingen, weitere Einflußfaktoren auszuschalten, auf ein unwesentliches Niveau zu reduzieren oder herausrechnen zu können. Übrig bleiben muß für eine eindeutige Analyse der jeweils einzelne Einflußfaktor – überlagerungfrei.

Eine Analyse gelingt nicht ohne Isolierung. Ohne reale oder rechnerische Überlagerungsfreiheit der Einflußfaktoren bliebe eine Ausführung nur eine Hypothese. Eine Untersuchung, die Apparaturen verschiedener Meßgeometrien, verschiedener Hersteller, damit auch verschiedener Gerätekonzeptionen, -Kompositionen und -Abstimmungen und ggf. noch weiterer überlagernder Einflußfaktoren nutzt, wird nicht den Beweis antreten können, daß beispielsweise die Meßgeometrie eine mögliche Einflußquelle darstellt und sie wird erst recht nicht das Ausmaß eines denkbaren Einflusses bestimmen können. Das gilt umso mehr, wenn die Werte – insbesondere an planen Flächen mit unterschiedlichen Systemen gewonnen – im Rahmen der Geräteübereins-

[1] CM-503c, CM-503i, CR-241 (Minolta, Osaka/Japan) mit der Möglichkeit der Nutzung eines Positionierungssystems durch vorgesehene Verschraubungen bzw. mit vorhandenem und mit System verbundenem Meßtisch.

timmung (also der Abweichung gleichbezeichneter Systeme des selben Herstellers) oder dem darüber hinausgehenden System-Einfluß (unterschiedliche Systeme des selben Herstellers) oder „Hersteller-Einfluß“ (unterschiedliche Systeme unterschiedlicher Hersteller) liegen und damit ohne Aussage sind. Hingegen wurde innerhalb der gegenwärtige Studien das Ausmaß des Meßgeometrieeinflusses an menschlichen Zähnen erstmals untersucht und isoliert und damit zudem Beweis geführt, daß die Meßgeometrie tatsächlich Einfluß hat auf die Farberfassung und alle Farbkoordinaten, indem baugleiche Systeme vom selben Hersteller eingesetzt wurden, die sich lediglich in der Meßgeometrie unterschieden.

Farben zu ordnen, zu systematisieren und geometrisch, wie in einem Raum, anzuordnen oder darzustellen, geht schon auf die griechischen Philosophen Platon und Aristoteles zurück. Die messende allgemeine Farbwissenschaft kennt den sogenannten Farbraum. Und auch in der Zahnmedizin könnte schon von Goodkind und Schwabacher 1987 ein Raum ausgemessen worden sein, den man Zahnfarbraum nennen dürfte. Zudem weist die Firma VITA im Zusammenhang mit ihrem VITAPAN-3D-MASTER-Zahnfarbring darauf hin, dass dieser auf einem Zahnfarbraum basiere. Erstmals wurden im Zuge dieser Arbeit Zahnfarbräume von feuchten, trocknenden, trockeneren und trockenen Zähnen dargestellt. Gemessen wurde erstmals mit besonderen Hochleistungsspektralphotometern. Es sind Darstellungen, die Aufschluß über die trocknungsbasierte Populationsdynamik gewähren und Einblick in etwas, was passieren dürfte nach dem Tod von Zähnen und Menschen – die Zähne werden heller und andersfarbig.

Forensische Zahnmedizin beschäftigt sich beispielsweise mit der Identifizierung und Altersbestimmung von Menschen und Toten. Eine Identifizierung oder Authentifizierung – im weitesten Sinne die Verifizierung einer behaupteten Identität – wird zur Sicherheit von Mensch und Daten auch im Alltagsleben und in einer modernen Gesellschaft immer wichtiger, so wie es in speziellen Bereichen, wie einem Hochsicherheitsbereich, gang und gäbe ist. Sowohl in der forensischen Medizin zur Identifikation von Toten als auch in dieser sicherheitsrelevanten Biometrie an Lebenden wäre daran zu denken, Zahnform und dentale Reflexionsspektren unmittelbar oder über Bildtechnik für diesen Zweck zu nutzen.

Ferner war Grundlage dieser Forschungen Einflußfaktoren zu erkunden und zu quantifizieren. Dazu gehören beispielsweise das Licht bzw. Meßlicht und die Lichtarten verschiedener Farbtemperaturen, die Strahlengänge des Lichtes bzw. die Meßgeometrien (Orte von Lichtquellen und Sensoren in Relation zur Meßprobe), der Beobachtungswinkel (2°, 10°), die Größe der Meßfläche und Meßöffnung, die Glanzwirkung, der Flüssigkeitsgehalt (mit wissenschaftlichem Beweis des Zusammenhanges zwischen Flüssigkeitsgehalt und Zahnfarbe), Wirkung von Trocknung und Flüssigkeitswiederaufnahme (Dehydratation, Rehydrierung), Reversibilität dieser Prozesse, der Anteil des Flüssigkeitsgehaltes an der Glanzwirkung, die Subjektivität von visueller Bestimmung, Kronenkrümmung, Systemart (Spektralphotometer, Dreibereichsfarbmeßsystem), Meßmodus (Kontakt oder Non-kontakt-Modus), Meßsystem-Objekt-Relation, Positionierung, Wiederholbarkeit bzw. Reproduzierbarkeit. Zudem wurden subjektiv-visuelle Bestimmungen und objektivierte Messungen in Subjektiv-objektiv-Vergleichen über Wertevergleiche nachgegangen. Alle diese Einflußfaktoren sind nicht nur an feuchten, sondern auch an trockeneren (verschiedene bestimmte Trocknungs- bzw. Rehydrierungszustände) und trockenen Zähnen anhand u. a. der Helligkeit (L*), von Farbmeßwerten, wie beispielsweise a*, b*, C*, h, ΔE, des Metamerieindex, von Spektralwerten, von Zahnfarbproben und von Zahnfarbräumen analysiert. – Weitere und präzisierende Veröffentlichungen insbesondere dazu folgen in Kürze.

Dinslaken, Juli 2000 Der Verfasser

2. Literaturübersicht

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)*. 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 Sehfarbstoffes 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 (vgl. *Grüsser 1995*). Farbe ist ein Sinneseindruck, der durch vom Objekt reflektiertes Licht, das Auge treffend, erzeugt, im Gehirn umgesetzt wird (*Bäuerle* 1981).

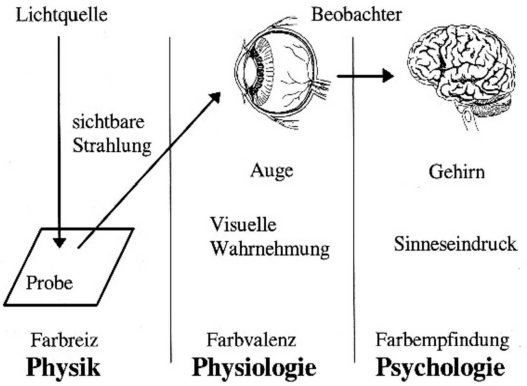

Abb. 1.-1 Der Weg zur Existenz von Farbe. Die Wahrnehmung und Verarbeitung von elektromagnetischer Strahlung als eine unbedingte Grundvoraussetzung für das Vorhandensein von dem, was wir Farbe nennen (Bildquelle: *Dr. LANGE* 1998).

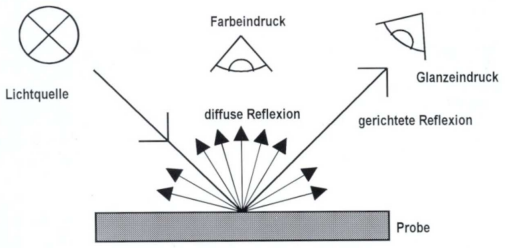

Abb. 1.-2 Die Farbe eines nicht-selbstleuchtenden Körpers entsteht durch die von ihm reflektierten Spektralanteile des auf ihn einstrahlenden Lichtes. Die Reflexion kann diffus und ungerichtet oder gerichtet im Sinne einer Spiegelreflektion erfolgen (Bildquelle: Dr. LANGE 1998).

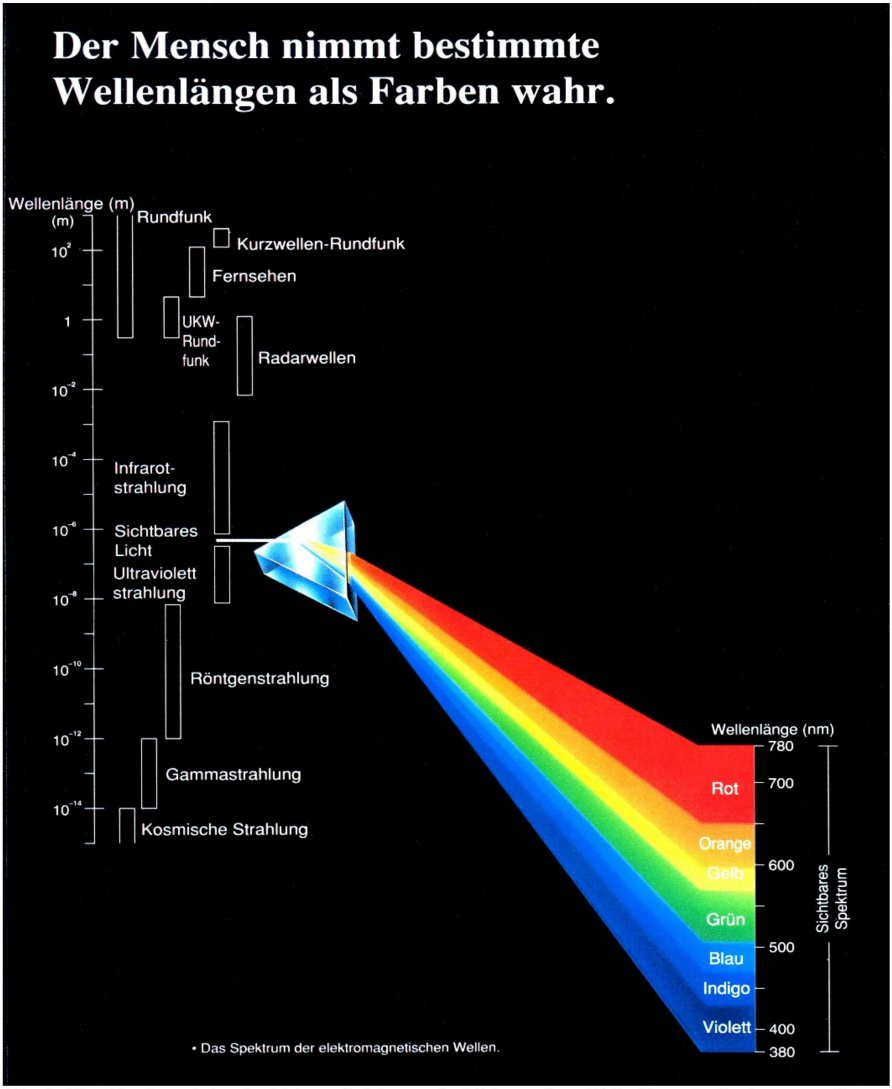

Abb. 1.-3 Der Brechungsindex der Lichtanteile hängt maßgeblich von ihrer Wellenlänge ab. Er nimmt vom Roten zum Blauen hin zu, sodaß rotes Licht stärker als das Blaue gebrochen wird. Die Darstellung dieser sogenannten Dispersion nimmt Bezug auf die Dualität, also sowohl auf den Strahlungs- als auch auf 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 (Bildquelle: *Minolta* 1996).

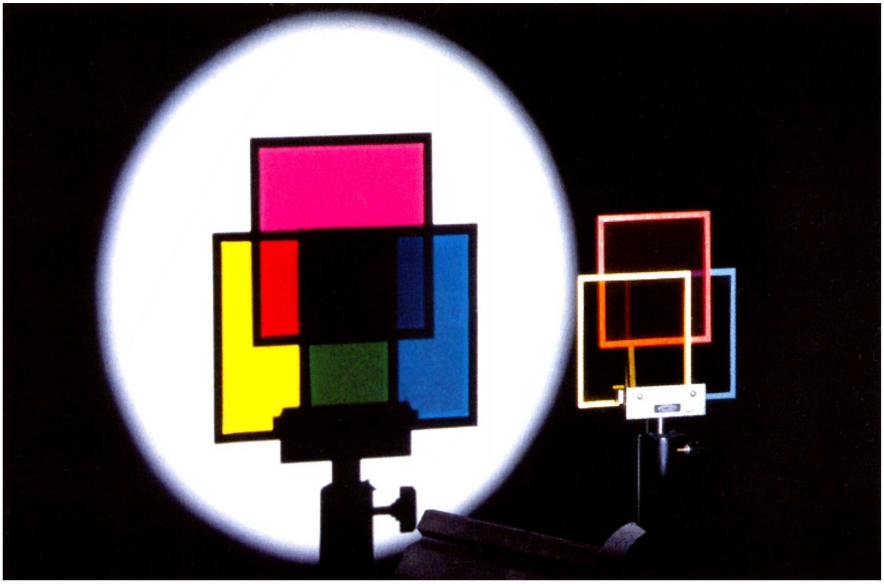

Abb. 1.-4 Subtraktive Farbmischung als physikalischer Mechanismus der Farbentstehung: Zu sehen sind drei Farbscheiben, welche als Filter dienen. Das weiße Licht wird durch die unterschiedlich eingefärbten Gläser in den bestimmten spektralen Bereichen absorbiert, andere spektrale Bereiche werden hindurchgelassen. Der Gelbfilter läßt so oranges, gelbes und grünes Licht, ein Blaufilter grünes, blaues und violettes und der Rotfilter rotes Licht hindurch. Wird mit blauem und gelbem Glas gefiltert, tritt lediglich grünes, wird mit rotem, gelbem und blauem Glas gefiltert, tritt kein nennenswertes Licht hindurch. Dieser Effekt ist bei der Mischung von Farben relevant. Hierbei fungieren die Pigmente der Malfarben als Farbfilter und die spektrale Reflexion („Reflexat" nach Hoffmann) ergibt sich aus den nicht absorbierten spektralen Anteilen des zuvor auf die Farbprobe einfallenden Lichtes (Bildquelle: *Harten* 1993).

Newtons Versuche belegen, daß die Farben nicht erst an der Oberfläche der bestrahlten Objektfläche entstehen, sondern bereits im Licht enthalten sind (*Preston* 1980):

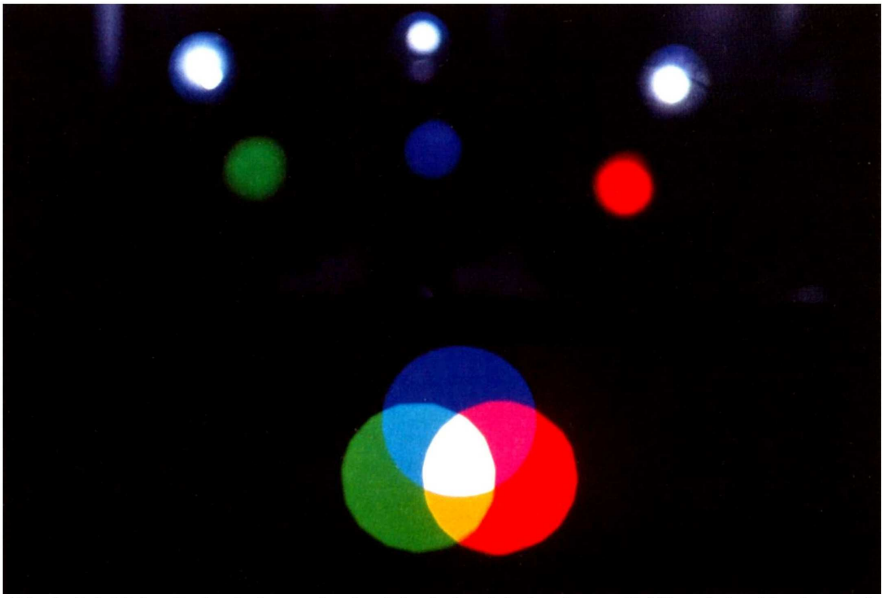

Abb. 1.-5 Additive Farbmischung als physiologischer Mechanismus. Trifft auf eine Netzhautstelle, hier repräsentiert durch eine Leinwand, Licht verschiedener Wellenlängen, so entsteht additive Farbmischung. Ist nun dieses Licht monochromatisch, also ist der Wellenbereich stark eingeschränkt und dieses 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).

Farbe wahrzunehmen ist ein recht subjektiver Vorgang. Deshalb gibt es zur objektivierten Erfassung von Farbe spezielle Systeme. 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, Reflexionsgrade Rx, Ry, Rz), 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).

$$X = a \bullet Rx + b \bullet Rz$$
$$Y = Ry$$
$$Z = c \bullet Rz$$

(1.-1) Als Meßsignal aus den Photoelementen des Dreibereichsverfahrens erhält man die Reflexionsgrade Rx, Ry und Rz. Hieraus lassen sich die Normfarbwerte errechnen.

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

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

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

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

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

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-Glühbirne, 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. 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 verleibt sich so die Werte für x ein und die senkrechte Achse nimmt die Werte für y auf.

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

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

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

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). Mischt man das

Licht der Endpunkte der Spektrallinie miteinander, so entsteht Purpur. Die Verbindung der Endpunkte wird auch Purpurlinie bezeichnet (*Adams* 1942).

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 *Stiles* und *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 Normspektralwerte 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.

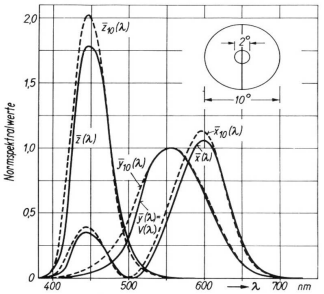

Abb. 1.-6 Abhängigkeit der Farbwahrnehmung von dem Normbeobachtungswinkel und der daraus resultierenden Rezeptionsfläche. 2°-Beobachtungswinkel bedeutet Rezeption im Sinne von photopischem und 10°-Beobachtung im Sinne von skotopischem Sehen. In den Normbeobachtungswinkeln begründete Variation der Spektralwerte und der Normfarbtafel. Die Normfarbtafel für den 2°-Normbeobachter ist durchgezogen, die des 10°-Normbeobachters gestrichelt gedruckt (Bildquelle: *Richter* 1981).

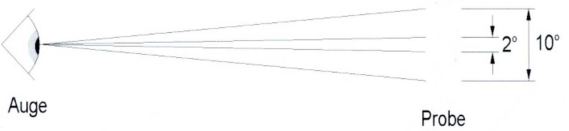

Abb. 1.-7 Darstellung des 2°- und 10°-Normbeobachters (Bildquelle: *Dr. Lange*).

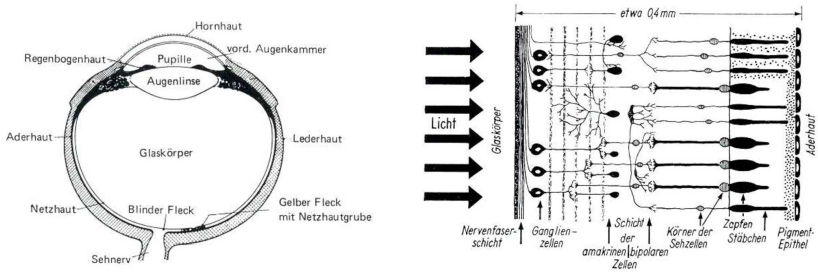

Abb. 1.-8 Augenmodell (oben) und Querschnitt durch die Netzhaut (unten): Die spektrale Empfindlichkeit der Stäbchenrezeptoren der Netzhaut entspricht der spektralen Absorption des Sehpurpurs. Die Absolutempfindlichkeit der Stäbchen ist so hoch, daß bereits wenige einfallende Lichtquanten einen Reiz zu formulieren in der Lage sind. Die Zäpfchenzellen der Netzhaut hingegen besitzen eine weitaus geringere Empfindlichkeit und erlangen erst bei größerer Helligkeit reizaufnehmende 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 Zäpfchen mit entsprechenden Empfindlichkeiten für definierte Farbbereiche unterscheidenden (Bildquelle: *Richter* 1981).

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 errechneten, empfindungsgemäß gleichabständigen Darstellung, einem auf der Gegenfarbtheorie basierenden „Psychometrischen Farbdiagramm", 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).

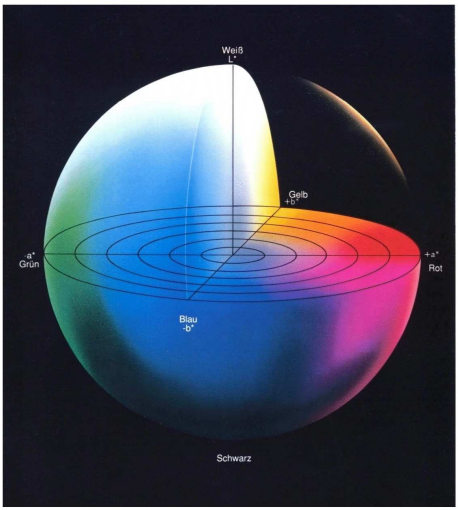

Abb. 1.-9 Modifizierter L*a*b*-Farbraum (Minolta 1996)

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

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

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

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

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

(1.-4) Formeln zur Errechnung von L*, a*, b*, C*, h (Bildquelle: Dr. LANGE 1998).

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*C*h-System) der *CIE* aus dem gleichen Jahre: Den Farborten, kreisförmig um die L*-Achse angeordnet, sind die gleiche Buntheit C* (Chroma), jedoch unterschiedliche Bunttonwinkel h zu eigen. Farborte, die auf einem von der L*-Achse ausgehenden Radiusstrahl liegen, besitzen den gleichen Buntton 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).

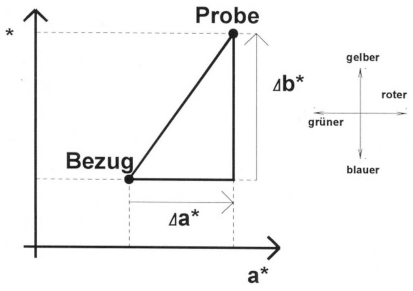

Abb. 1.-10 Farbmaßabstand zwischen Probenfarbmaßzahlen und Farbwerten einer Bezugsmessung (Bildquelle: *Dr. LANGE* 1998).

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

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

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

$$\Delta b^* = b_P^* - b_P^*$$

(1.-5) Der Farbabstand (ΔE) und die Differenzen von Helligkeit (L*), der Farbmaßzahlen a* und b* (von oben nach unten, *DIN 6174*, *Dr. LANGE* 1998).

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

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

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

(1.-6) Für bunte Farben definiert DIN 6174 eine Aufspaltung des Gesamtfarbabstandes nach Helligkeits- (ΔL*), Buntheits- (ΔC*) und Bunttonunterschied (ΔH*, *Dr. LANGE* 1998).

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 (vgl. [*McLean* 1978, *Preston* 1980]).

Die Auswahl des richtigen Farbsystems sollte nun nach den von *Billmeyer* aufgestellten Regeln erfolgen: 1. Wählen Sie eine einzige Methode aus und nutzen Sie diese konsequent. 2. Spezifizieren Sie exakt, wie die Berechnungen durchgeführt wurden. 3. Versuchen Sie niemals mit Hilfe von Umrechnungsfaktoren Werte in verschiedene Toleranzsysteme zu konvertieren. 4. Benutzen Sie berechnete Farbtoleranzen nur als ersten Anhaltspunkt, bis sie durch eine visuelle Beurteilung verifiziert werden können. 5. Vergessen Sie niemals, daß Farben nicht aufgrund von Zahlen akzeptiert oder abgelehnt werden – es zählt, was wir sehen (*Billmeyer* 1966, 1987 und 1993).

3. Material und Methode

3.1 Verwendete Zähne

Abb. 3.1-1 In den verschiedenen Voruntersuchungen und Studien fanden insgesamt mehr als 170 extrahierte, von Wurzelhaut, Konkrementen, Zahnstein und Belägen befreite, endodontisch unbehandelte, menschliche, obere mittlere Frontzähne Verwendung.

3.2 Instrumente und Apparaturen

3.2.1 Elektronisches Hygro-Thermometer (Thies Clima)

Abb.3.2-1 Elektronisches Hygro-Thermometer (Firma Thies Clima, Göttingen/Deustchland) zur Raumüberwachung der Temperatur in Grad Celsius (links) und Luftfeuchtigkeit in % (rechts).

3.2.2 Spektralphotometer CM-503c

Abb. 3.2-2 Spektralphotometer CM-503c (Minolta, Osaka/Japan).

3.2.2.1 Meßprinzip

Beleuchtungs- und Betrachtungssystem

Das Beleuchtungs-/Betrachtungssystem des CM-503c (Minolta, Osaka/Japan) ist in der unten stehenden Abbildung dargestellt (mit Glanzausschluß). Bei diesem Meßverfahren wird die Probe unter 45° beleuchtet und senkrecht unter 0° betrachtet. Abgekürzt wird dieses Meßverfahren als 45/0°-Meßgeometrie bezeichnet. Der Öffnungswinkel des Empfängers beträgt 7,4°. Diese Geometrie entspricht den Spezifikationen der ISO 7724/1, der *DIN 5033*, der *CIE*-Empfehlung 15,2 sowie der ASTM E 1164. Als Lichtquelle wird eine Xenon-Blitzlampe verwendet. Das von der Lampe abgestrahlte Licht wird über 12 Lichtleitkabel auf die Probe geleitet und beleuchtet die zu messende Probe zirkular unter einem Winkel von 45°. Das CM-503c arbeitet nach dem Prinzip des Zweistahlverfahrens. Der Monochromator des Spektralphotometers ist in zwei Segmente aufgeteilt. Das von der Probe reflektierte Licht gelangt direkt zum Segment 1 (Meßlicht), gleichzeitig wird Licht aus der Mischkammer zum Segment 2 (Beleuchtungskontrolle) geleitet. Durch den Einsatz des Zweistahlverfahrens werden auch geringste Schwankungen in der spektralen Zusammensetzung und der Intensität des von der Xenon-Lampe abgestrahlten Lichtes erkannt und automatisch kompensiert.

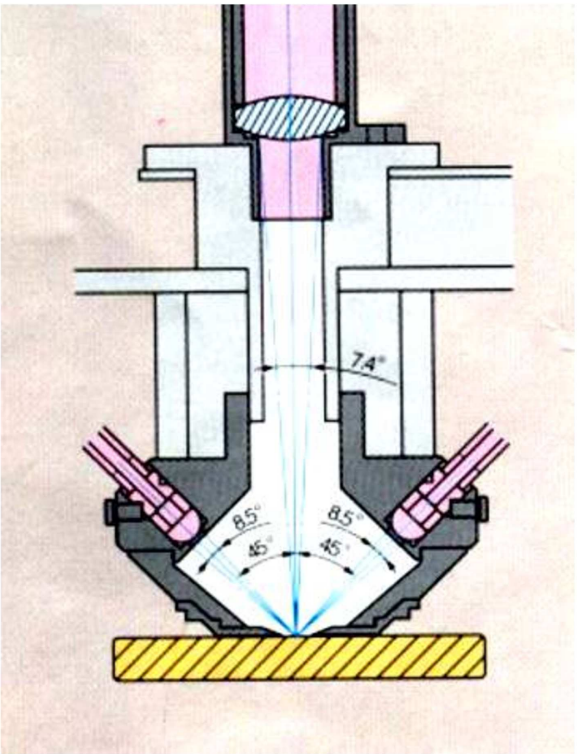

Abb. 3.2-3 Meßgeometrie 45/0° des Spektralphotometers CM-503c. Hierbei wird Licht im 45°-Winkel von der Apparaturachse emittiert und das vom Objekt veränderte und reflektierte Licht unter 0° von den Sensoren des Spektralphotometers detektiert.