

André Hoffmann

Systematische Erforschung der Farbentstehung an menschlichen Zähnen

André Hoffmann

**Systematische Erforschung
der Farbentstehung
an menschlichen Zähnen**

Bibliographische Information der Deutschen Bibliothek

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

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

© 2003 André Hoffmann, Dammweg 16, 46535 Dinslaken

© 2004 André Hoffmann, Dammweg 16, 46535 Dinslaken

Alle Rechte vorbehalten.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Inhalt

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

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

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

5. Hauptstudien dieser Arbeit 92

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

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

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

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

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

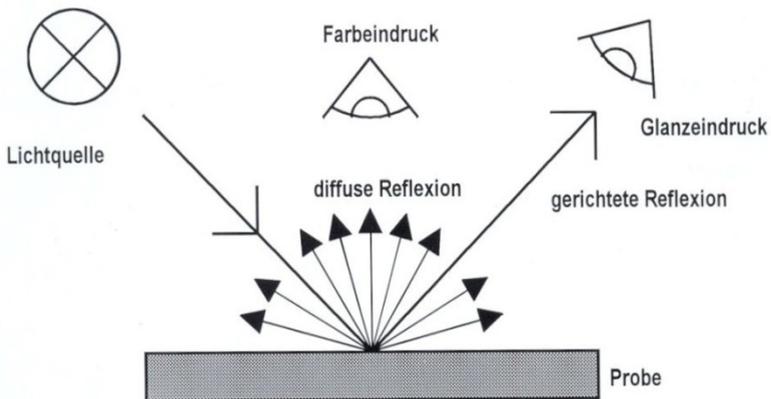
5.3.4.6	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels und der Lichtart auf die Ergebnisse der L*-Werte nach einstündiger Lufttrocknung	181
5.3.4.7	Einfluß der Farbmeßapparatur, ihrer Meßgeometrie, der Meßöffnung, der Meßfläche, des Normbeobachtungswinkels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

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

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



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



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

1. Einleitung

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

2. Literaturübersicht

2.1 Flüssigkeit und Zähne

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

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

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

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

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

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

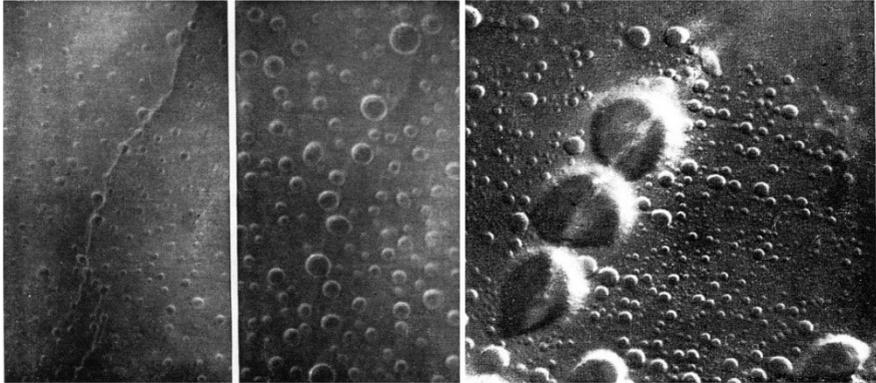


Abb. 2.1.-1 Flüssigkeit auf der Schmelzoberfläche. 3 Stunden (links) und 12 Stunden (Mitte) nach der Applikation von Öl auf die Oberfläche. Schmelzflüssigkeit auf der Oberfläche des Schmelzes nach 15 Stunden (rechts). Die Flüssigkeit des Zahnes tritt durch Trocknung an die Oberfläche und bewirkt die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

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

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

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

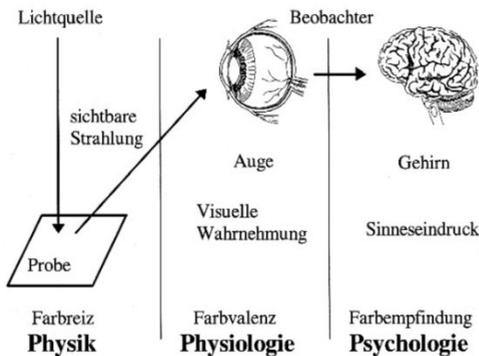
normalen Bedingungen nicht mehr zu einer Rehydratation heranziehen. *Little* sieht nach seinen Untersuchungen des Jahres 1966 im Gegensatz zu vorausgegangenen Publikationen von *Trautz* (1955), *McConnel* (1963, 1965), *Hendricks und Hill* (1942) und früherer Vermutung (*Little* 1962) das H_2O anstatt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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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