

Aus der Abteilung für Zahnerhaltung und Parodontologie
(CharitéCentrum 3 für Zahnmedizin, Campus Benjamin Franklin)
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**In-vitro-Untersuchung zum Vergleich der Aufhellungseffektivität
unterschiedlicher Homebleaching-Materialien und -Methoden**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Nils Janning Beheim-Schwarzbach

aus Berlin

Gutachter: 1. Prof. Dr. med. dent. A. M. Kielbassa
2. Prof. Dr. med. dent. B.-M. Kleber
3. Prof. Dr. med. dent. B. Haller

Datum der Promotion: 19. September 2008

Meinen lieben Eltern

INHALTSVERZEICHNIS

1. EINLEITUNG IN DIE PROBLEMSTELLUNG	1
2. LITERATURÜBERSICHT	4
2.1 Ursachen für Verfärbungen von Zähnen	4
2.1.1 Extrinsische Verfärbungen	4
2.1.2 Intrinsische Verfärbungen	7
2.1.3 Struktur von organischen Verfärbungen.....	9
2.2 Wirkstoffe zur Zahnaufhellung	12
2.2.1 Reduktions-Oxidations-Reaktion	12
2.2.2 Wirkmechanismus der oxidativen Zahnaufhellung.....	14
2.2.3 Wasserstoffperoxid.....	17
2.2.4 Carbamidperoxid	18
2.2.5 Bleichmittel auf Chlorit-/ Chlordioxidbasis	20
2.2.6 Weitere Wirkstoffe zur Zahnaufhellung.....	21
2.3 Die Bleichtherapie	22
2.3.1 In-Office-Bleaching-Technik	22
2.3.2 Internes Bleaching	22
2.3.3 Homebleaching-Technik	23
2.3.4 Over-the-Counter-Produkte	24
2.4 Nebenwirkungen von Bleichwirkstoffen	25
2.5 Untersuchungen des Aufhellungsvermögens von Bleichmitteln	29
2.6 Farbbestimmung in der Zahnheilkunde	32
2.6.1 Farbbestimmung mit Farbring	35
2.6.2 Digitale Farbmessung	38
2.6.3 Kolorimetrie	39
2.6.4 Spektralphotometrie.....	40
2.7 Knoop-Mikrohärte	41
2.7.1 Untersuchungen der Mikrohärte nach Bleichbehandlung	42
2.8 Künstliche Speichellösungen	44
3. UNTERSUCHUNGSZIEL	45
4. MATERIAL UND METHODE	46
4.1 Versuchszähne	46

4.2 Verfärbung der Versuchszähne	46
4.3 Herstellung der Versuchsmodelle	47
4.4 Versuchsgruppen	48
4.4.1 Gruppeneinteilung für visuelle und computergestützte Farbbestimmungen.....	48
4.3.2 Gruppeneinteilung für die Mikrohärtmessungen.....	49
4.5 Verwendete Bleichmaterialien	50
4.5.1 VivaStyle Paint On	51
4.5.2 Colgate Simply White	52
4.5.3 VivaStyle	52
4.5.4 Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur.....	53
4.5.5 Blend-a-med Whitestrips.....	54
4.5.6 Kontrollgruppe	54
4.5.7 pH-Werte der verwendeten Bleichmaterialien	54
4.6 Herstellung von Bleischienen	55
4.7 SpectroShade	56
4.8 Farbmessung mit visueller Farbskala	59
4.9 Messung der Knoop-Mikrohärte	59
4.9.1 Methodik.....	60
4.9.2 Präparation der Messfläche	60
4.9.3 Herstellung der Objektträger	61
4.10 Künstlicher Speichel	61
4.11 Simulation der Mundhöhle	62
4.12 pH-Messungen	63
4.13 Statistische Software	63
4.14 Quantitative und statistische Auswertung	63
4.14.1 SpecroShade und Farbmessung mit konventioneller Farbskala.....	63
4.14.2 Korrelationen der Farbmesswerte.....	64
4.14.3 Knoop-Mikrohärte	64
4.14.4 Darstellung der Messwerte als Box-and-whisker plots	65
4.15 Chronologischer Ablauf der Versuchsdurchführungen	66
5. ERGEBNISSE	68
5.1. pH-Werte der verwendeten Bleichmaterialien	68
5.2 Spectroshade	69

5.2.1 Chromascop Complete-Farbskala.....	69
5.2.2 Vita Classic-Farbskala.....	72
5.3 Farbmessung mit konventioneller Farbskala.....	75
5.4 Übereinstimmungen der unterschiedlichen Farbmessmethoden.....	78
5.5 Knoop-Mikrohärte.....	80
6. DISKUSSION.....	86
6.1 Diskussion von Material und Methode.....	86
6.1.1 Versuchszähne.....	86
6.1.2 Verfärbung der Versuchszähne.....	87
6.1.3 Künstlicher Speichel.....	88
6.1.4 Simulation der Mundhöhle <i>in vitro</i>	89
6.1.5 Verwendete Farbskalen.....	90
6.2 Diskussion der Ergebnisse.....	91
6.2.1 Die pH-Werte der Bleichmittel.....	91
6.2.2 Aufhellung der Versuchszähne.....	92
6.2.3 Messwerte der Zahnfarbveränderungen.....	93
6.2.3.1 Chromascop Complete-Farbskala.....	93
6.2.3.2 Übereinstimmung zwischen visueller und digitaler Messung.....	93
6.2.3.3 Vergleich mit der Vita Classic-Farbskala.....	95
6.2.4 Applikationsdauer.....	97
6.2.5 Natriumchlorit.....	97
6.2.6 Veränderungen der Knoop-Mikrohärte.....	98
7. SCHLUSSFOLGERUNGEN.....	100
8. ZUSAMMENFASSUNG.....	101
9. SUMMARY.....	103
10. LITERATURVERZEICHNIS.....	103
11. ANHANG.....
11.1 Ergebnisse.....
11.2 Materialliste.....
11.3 Danksagung.....
11.4 Curriculum vitae.....
11.5 Erklärung über Selbstständigkeit.....

1. EINLEITUNG IN DIE PROBLEMSTELLUNG

Der Wunsch des Menschen, dem gängigen Schönheitsideal zu entsprechen und so vom sozialen Umfeld als attraktiv wahrgenommen zu werden, ist seit jeher ein gewichtiger Grund, Entwicklungen der unterschiedlichsten Materialien und Methoden voranzutreiben, die sowohl soziale als auch ästhetische Körperveränderungen möglich machen. Bei der Beurteilung der Schönheit des Gesichts scheinen neben harmonischen Relationen der Proportionen und der Expressivität die Augen- und Mundpartien einen hohen Stellenwert zu haben. Bereits 2500 Jahre vor Christus entwickelte sich zum Beispiel in Ägypten ein regelrechter Schönheitskult, der das Gesicht kosmetisch dem gängigen Schönheitsideal anpassen sollte. Besondere Bedeutung kam hierbei der typischen Betonung des Auges mit schwarzen und grünen Schminke zu. Die ägyptische Hieroglyphe des Auges steht neben dem Sonnengott Re auch für Schönheit. Im alten Rom wurden Zähne mit portugiesischem Harnstoff (Urea) geputzt, um diese aufzuhellen. Auf diese Art sollte versucht werden, Zähne in ihrer Farbe und Helligkeit dem gängigen Schönheitsideal anzupassen, um ein gesundes, jugendliches und gepflegtes Aussehen zu erreichen (SCHMIDSEDER, 1998).

Heutzutage ist der Wunsch vieler Patienten nach einem perfekten Gebiss mit hellen Zähnen, die Jugendlichkeit, Erfolg, Gesundheit, Selbstwertschätzung und Schönheit verkörpern sollen, ungebrochen. In einer Studie, die die Faktoren untersuchte, welche das menschliche Lächeln attraktiv erscheinen lassen, belegten DUNN et al. (1996), dass die Zahnfarbe bei der Beurteilung der Attraktivität der Zähne die wichtigste Rolle spielt und für die Empfindung eines attraktiven Lächelns von großer Bedeutung ist. Die Symbolkraft der Zähne sorgte in der jüngsten Vergangenheit für eine verstärkte Nachfrage vieler Patienten nach lang anhaltenden optischen Verschönerungen des Gebisses. Neben der professionellen Zahnreinigung und der Anwendung von Weißmacher-Zahnpasten, mit denen sich jedoch nur äußerliche Verfärbungen der Zähne adäquat beseitigen lassen, oder restaurativen Lösungen wie Veneers oder Kronen, die einen Verlust von Zahnhartsubstanz mit sich bringen, erscheint die Bleichtherapie als eine interessante Lösung zur schonenden Behandlung von Zahnverfärbungen. Das Interesse eines immer größer werdenden Patientenstammes an der Möglichkeit der Zahnaufhellung mit Bleichmitteln führte in den letzten Jahren zu einer beachtlichen Zunahme von Bleichprodukten und Anwendungsmethoden der Bleichtherapie (JOINER, 2006). Hinsichtlich der Anwendung ist festzustellen, dass die meisten Bleichmethoden leicht durchführbar sind. Jedoch stellt sich die große Menge der verschiedenen Zahnaufhellungsmaterialien auf dem Markt und ebenso deren versprochene Wirkung als schwer überschaubar dar. Seit einigen Jahren sind zudem verschiedene Zahn-

aufhellungsprodukte zur Selbstapplikation in Apotheken und Drogerien frei erhältlich. Obwohl diese Produkte unbeaufsichtigt und ohne vorherige Konsultation eines Zahnarztes angewendet werden können, ist der Einfluss der gebräuchlichen Wirkstoffe wie Wasserstoffperoxid, Carbamidperoxid oder Natriumchlorit auf die Oberflächenhärte von Zahnschmelz nur unvollständig untersucht worden. LEONARD et al. (2005) wiesen auf die bis dato nur stark limitierte Anzahl an Daten bezüglich der Effizienz und Sicherheit dieser frei erhältlichen Produkte hin. Auf die Interpretation der vorhandenen Untersuchungen zu dieser Thematik wirkt sich zudem erschwerend aus, dass die Daten einiger Studien zum Teil stark voneinander abweichen.

Zum Beispiel kamen Studien, die die Sicherheit verschiedener Bleichmaterialien zur häuslichen Anwendung untersuchten zu gegensätzlichen Ergebnissen. Zum einen führten Daten, die aus Mikrohärtmessungen zuvor gebleichter Schmelzoberflächen resultierten, einige Autoren zu der Schlussfolgerung, dass die Schmelzoberfläche durch die Verwendung verschiedener Bleichprodukte zur häuslichen Anwendung *in vitro* eine Minderung der Mikrohärt erfahre. Im Gegensatz dazu zeigten zum anderen Daten vergleichbarer In-vitro-Studien, dass die Verwendung von Bleichprodukten zu keiner signifikanten Abnahme der Mikrohärt führte. Darüber hinaus wurde von einigen Autoren *in vitro* sogar ein Anstieg der Mikrohärt der Schmelzoberflächen unmittelbar nach der Bleichbehandlung beschrieben. Daher sollte in dieser In-vitro-Studie – neben dem Vergleich der Aufhellungseffektivität von fünf Bleichmitteln zur häuslichen Anwendung – die Mikrohärt der behandelten Schmelzoberflächen untersucht werden.

Für die Anwendung häuslicher Bleichmittel gibt es sehr unterschiedliche Empfehlungen bezüglich der optimalen Wirkstoffkonzentration. So konnte in der Vergangenheit in einer Vielzahl von Studien zu dieser Thematik kein Zusammenhang zwischen Konzentration und Wirkung gefunden werden. Eine ähnliche Problematik trifft auch für Ergebnisse von Untersuchungen der optimalen Anwendungsdauer zu. Ein Grund dafür könnte sein, dass klinische Veränderungen der Zahnfarbe bis dato fast ausschließlich visuell mit einer Farbskala bestimmt wurden. Ebenfalls wurden Untersuchungen zur Aufhellungseffektivität von Präparaten zur Bleichtherapie in der Vergangenheit mit der visuellen Farbringmessung durchgeführt. Bei Anwendung dieser Methode ist jedoch die Möglichkeit von Fehlinterpretationen der Farbe aufgrund unterschiedlicher Fehlerquellen gegeben. Als Fehlerquellen wurden sowohl die subjektive Beeinflussung des Anwenders als auch Täuschungen des menschlichen Auges verantwortlich gemacht. Inzwischen stehen in der Zahnmedizin eine Reihe von computergestützten Farbbestimmungsmethoden zur Verfügung. Diese sollen subjektive Fehlerquellen der visuellen Farbbestimmungsmethode vermeiden. Während es eine Vielzahl von Studien gibt, welche die Verlässlichkeit dieser Geräte untersucht haben, ist die Fragestellung, ob die visuelle oder die computergestützte Messmethode

zur klinischen Beobachtung von Farbveränderungen vorzuziehen sei, noch nicht ausreichend untersucht. Daher sollte die Untersuchung der Farbveränderungen in dieser In-vitro-Studie mit konventioneller Farbskala und digitaler Farbmessung vorgenommen werden. Auf diese Weise sollte ein Vergleich der beiden Untersuchungsmethoden zur Farbbestimmung möglich gemacht werden.

2. LITERATURÜBERSICHT

2.1 Ursachen für Verfärbungen von Zähnen

Hinsichtlich der Ursachen lassen sich Diskolorationen der Zähne in extrinsische (externe) und intrinsische (interne) Verfärbungen einteilen. Extrinsische Verfärbungen entstehen zumeist durch Auflagerungen von Farbstoffen auf die Zahnoberfläche. Diese Farbstoffe können sowohl organischer als auch anorganischer Natur sein. Demgegenüber handelt es sich bei intrinsischen Verfärbungen meist um Blutabbauprodukte der nekrotischen Pulpa oder um während der Zahnentwicklung entstandene Einlagerungen in die Zahnhartsubstanzen. Zahnschmelz ist im begrenzten Umfang permeabel. Aus diesem Grund haben Farbstoffe die Möglichkeit, sowohl von außen als auch von der Pulpa her via Schmelz-Dentin-Grenze einzudringen. Dentin wird unter anderem als sehr porös und permeabel beschrieben (SCHRÖDER, 2000b,d). Aufgrund dessen scheint eine Diffusion von Farbstoffen innerhalb des Dentins begünstigt zu sein.

2.1.1 Extrinsische Verfärbungen

Extrinsische Verfärbungen sind als Auflagerungen von unterschiedlichen Chromogenen (farbgebende Substanzen) auf der Zahnoberfläche zu verstehen, die durch anfänglich unterschiedlich starke Anziehungskräfte – wie elektrostatische Anziehung, Van-der-Waals-Kräfte oder Wasserstoffbrücken – entstehen (KIELBASSA & WRBAS, 2000a). Die Tabelle 1 gibt einen Überblick über die extrinsischen Verfärbungen und deren mögliche Ursachen. Zur Klassifizierung der Chromogene wurde lange Zeit zunächst eine Einteilung zwischen nichtmetallischen und metallischen Chromogenen gewählt. Nichtmetallische Chromogene sind zum Beispiel in Tee, Kaffee, Rotwein, verschiedenen Beerensorten, Curry oder Fruchtsäften zu finden. Darüber hinaus können auch durch Tabakkonsum oder in Folge der Anwendung von chlorhexidinhaltigen Mundspüllösungen extrinsische, nichtmetallische Verfärbungen entstehen. Chromogene Bakterien werden für die insbesondere bei Kindern im Bereich des Gingivasaumes zu findenden linienartigen, schwarzen Verfärbungen („black stains“) verantwortlich gemacht (VOGEL, 1975). Auch diese Diskolorationen werden zu der Gruppe der nichtmetallischen Chromogene gezählt. Die verantwortlichen Bakterien (meist grampositive Stäbchen) bilden Schwefelwasserstoff als Stoffwechselprodukt. Dieses vermag mit dem im Speichel befindlichen Eisen unlösliches Eisensulfid zu bilden, welches eine Schwarzfärbung verursacht. Gelegentlich werden auch Orange-Verfärbungen durch Bakterien beobachtet, deren Genese jedoch bislang nicht schlüssig

geklärt ist. Bei Kindern mit unzureichender Mundhygiene erkennt man häufig auch eine Grünverfärbung der Labialflächen der oberen Schneidezähne. Neben Bakterien werden dafür auch Ablagerungen von Hämoglobin-Abbauprodukten nach Zahnfleischbluten und Chlorophyll-Einlagerungen (aus pflanzlichen Nahrungsmitteln) verantwortlich gemacht (SCHROEDER, 1997). Die bei kariösen Läsionen auftretende Verfärbung ist letztlich ebenso den extrinsischen Verfärbungen zuzurechnen. Hier kommt es zur Einlagerung von Farbstoffen in die aufgrund der verstärkten Demineralisation poröse Zahnhartsubstanz. Dem gegenüber steht die Gruppe der Auflagerungen von Chromogenen, die auf eine Beteiligung verschiedener Metalle beziehungsweise deren Salze zurückzuführen sind. Diese unterschiedlichen Metalle und deren Farbwirkung in den Zahnhartsubstanzen sind – neben den organischen Chromogenen – ebenfalls in der Tabelle 1 aufgeführt.

Tab. 1: Extrinsische Zahnverfärbungen und mögliche Ursachen (nach HOFFMANN-AXTHELM, 1995; KIELBASSA & WRBAS, 2000a; SCHMIDSEDER, 1998; WEBER, 1999a)

Verfärbung	mögliche Ursache	Beispiel
braun	·Nahrungsmittel ·Mundspüllösungen	Kaffee, Tee, Rotwein (Tannine) Chlorhexidin
schwarz	·Nahrungsmittel ·Metalle, industrielle Stäube ·Desinfektionslösung	Johannisbeeren Eisen (Fe), Mangan (Mn) Silber (Ag)
braun-schwarz	·Tabakkonsum ·grampositive Stäbchen	Inhaltsstoffe (Teer) „black stains“
gelb-braun	·berufliche Metalleinwirkung ·Mundspüllösungen (Zinnfluorid)	Cadmium (Cd) Zinn (Sn)
grün	·berufliche Metalleinwirkung	Kupfer (Cu), Nickel (Ni)
dunkelgrün-schwarz	·chromogene Bakterien	„green stains“
violett	·Nahrungsmittel	Waldbeeren
violett-schwarz	·Desinfektionslösung	Kaliumpermanganat
orange	·industrielle Einwirkung ·chromogene Bakterien	Chromsäure „orange stains“
rötlich	·Nahrungsmittel	Safran, roter Pfeffer
gelblich	·Nahrungsmittel	Curry

Die klassische Einteilung der Chromogene in nichtmetallische oder metallische Beschaffenheit hat den entscheidenden Nachteil, dass dabei der multifaktoriell bedingte Entstehungsmechanismus der Verfärbung nicht berücksichtigt wurde (KIELBASSA & WRBAS, 2000a). Aus diesem Grund schlug NATHOO 1997 eine Klassifikation (N1-N3) vor, die im Gegensatz zu der klassischen Einteilung der Diskolorationen die chemischen Grundlagen der Zahnverfärbung besser berücksichtigen sollte. Beim N1-Typ („direct dental stain“) reagiert das Chromogen mit der Zahnoberfläche, wobei die Farbe des Chromogens mit der zu beobachtenden Verfärbung

identisch ist. Ein Beispiel für eine Verfärbung des N1-Typs ist das 0,1 bis 1 µm dicke sekundäre Schmelzoberhäutchen (acquired pellicle), das sich nach kurzer Zeit auf gereinigten Zahnoberflächen bildet. Durch die negative Eigenladung der Zahnhartsubstanzen werden bestimmte Proteine des Speichels elektrostatisch an die Zahnoberfläche gebunden. Die Substanzen, die sich an und in dieses semipermeable Schmelzoberhäutchen einlagern und dort aufgrund einer Akkumulation oder durch chemische Modifikationen eine Farbveränderung erfahren, werden zum N2-Typ („adhesive direct dental stain“) gezählt. Charakteristisch hierfür sind die anfangs gelblich und später bräunlich erscheinenden Verfärbungen des acquired pellicle durch eingelagerte Pigmentstoffe, die im Laufe der Zeit durch chemische Reaktionen oder Akkumulation entstehen. Binden primär farblose Substanzen als Prächromogene an die Zahnoberfläche und erfahren nachfolgend eine Transformation im Sinne einer chemischen Veränderung, so spricht man von einer N3-Typ-Veränderung (KIELBASSA & WRBAS, 2000a). Ein Beispiel für eine solche „indirect dental stain“-Veränderung ist die Reaktion von Chlorhexidin auf der Zahnoberfläche. Dieses Biguanid bindet aufgrund seiner kationischen Gruppen elektrostatisch an die negativ geladenen Oberflächen der Zähne, der Mundschleimhaut sowie an den Zahnbelag (Plaque). Nach längerer Anwendungsdauer, also kontinuierlicher Adhäsion von Chlorhexidinmolekülen an die jeweiligen Oberflächen, entsteht aufgrund einer nicht enzymatischen Reaktion, an der sowohl Licht als auch Sauerstoff beteiligt sind, eine Transformation der ursprünglich farblosen Substanz in eine bräunliche Verfärbung. Eine ähnliche Reaktionskaskade bedingt gelbbraunliche Verfärbungen von Zähnen, die nach Anwendung zinnfluoridhaltiger Mundspüllösungen auftreten können. Es handelt sich bei diesen Reaktionsabläufen um die mehrstufige Maillard-Reaktion. In Folge dieser kommt es im Lauf der Zeit zu einer Transformation von Aminosäuren mit reduzierten Zuckern (Abbau der Aminosäuren zu Aldehyden und weitere Folgereaktionen). Diese chemischen Strukturveränderungen, die auch als „nicht enzymatische Bräunungsreaktion“ bezeichnet werden, treten bei Zahnverfärbungen durch N3-Typ-Veränderungen häufig auf, wobei meist braune Chromogene entstehen (NATHOO, 1997). Allen extrinsischen Verfärbungen ist gemeinsam, dass sie sich nach Dicke, Alter und Lokalisation der Verfärbung unterscheidend mechanisch mit einer abrasiven Zahnpasta oder durch eine professionelle Zahnreinigung entfernen lassen (ZANTNER, 2006a).

2.1.2 Intrinsische Verfärbungen

Intrinsische Verfärbungen werden durch das Vorhandensein von chromogenem Material innerhalb der Zahnhartsubstanzen, also Schmelz und Dentin, verursacht (KIELBASSA & WRBAS, 2000). Die Einlagerung in die Zahnhartsubstanzen erfolgt entweder präeruptiv oder posteruptiv. Zu den präeruptiven Verfärbungen zählen die fluorotischen Veränderungen der Zahnhartsubstanz. Infolge von erhöhten Fluoridkonzentrationen während der Amelogenese kommt es zur Hemmung der Ameloblastenfunktion, woraus Hypomineralisationen resultieren (SCHRÖDER, 2000d). Zu den präeruptiven Verfärbungen zählen auch die Folgen der Tetrazyklinverabreichung während der Zahnhartsubstanzbildung. Diese gelbbraunen beziehungsweise bräunlich-grauen Tetrazyklinverfärbungen beruhen auf der Affinität der Tetrazyklinmoleküle zu den Kalziumionen des Hydroxylapatits von Schmelz und Dentin. Nach der lichtinduzierten Oxidation bildet sich ein rotes Chinon (4-a,12-a Anhydro-4-oxo-4-dimethyl-amino-tetracyclin). Die Stärke der Verfärbung ist abhängig von Menge und Dauer der Tetrazyklinapplikation. Die Art der Verfärbung wird bedingt durch das jeweilige Tetrazyklinderivat. So sind gelbe Verfärbungen auf Ledermycin, Terramycin oder Achromycin, braune Diskolorationen auf Aureomycin zurückzuführen (BAILEY et al., 1968; SCHMIDSEDER, 1998).

Verfärbungen präeruptiver Genese entstehen auch nach einer apikalen Parodontitis eines Milchzahnes durch lokalisierte Defekte des folgenden permanenten Zahnes. In der Literatur wird ein derartig geschädigter Zahn als Turner-Zahn bezeichnet. Genetisch bedingte Defekte der Zahnhartsubstanzen führen ebenso zu präeruptiven Verfärbungen. So kommt es aufgrund ausgeprägter Obliterationen bei der Dentinogenesis imperfecta zu einem perlmuttartig schimmernden, bläulich-gräulich-rötlichen Erscheinungsbild der Zähne (SCHRÖDER, 2000e). Bei der Amelogenesis imperfecta kann es zu gelblich-braunen Diskolorationen kommen (WEBER, 1999a). Des Weiteren können Erkrankungen des blutbildenden Systems (Erythroblastosis foetalis, Thalassämie, Sichelzellanämie) aufgrund veränderter Blutgerinnung zu präeruptiven Verfärbungen (grünlich-blau bis braun) führen, da sich eisenhaltige Pigmente aus dem Blut im Dentin anreichern (KIELBASSA & WRBAS, 2000).

Neben den präeruptiven Verfärbungen können intrinsische Verfärbungen auch posteruptiven Ursprungs sein (HOFFMANN-AXTHELM, 1995). Dabei kommt es posttraumatisch oder nach der unzureichenden Entfernung des koronalen Pulpagewebes im Rahmen einer endodontischen Behandlung zu einer Diffusion von Blutbestandteilen in die Dentintubuli (ARI et al., 2002). Daraus folgt initial eine rosafarbene Verfärbung, die sich aber nach dem Freisetzen von Eisen beim Zerfall des Hämoglobins grau-schwarz bis bräunlich darstellt. Die hierfür verantwortliche

Verfärbung resultiert aus der chemischen Reaktion des freigesetzten Eisens mit Schwefelgruppen von Proteinen des Dentins oder mit in den Dentintubuli befindlichen Bakterien (KIELBASSA und WRBAS, 2000a). Zahnverfärbungen durch zunehmende Obliteration des peritubulären Dentins und Anbau von zirkumpulpaem Sekundärdentin im Rahmen des „physiologischen Alterungsprozesses“ (SCHRÖDER, 2000c), deren Farbwirkung durch Abrasion und Attrition des Schmelzes noch weiter unterstützt wird (WEBER, 1999a), sind ebenso posteruptiver interner Genese. Letztendlich können posteruptive Verfärbungen auch iatrogen durch Diffusion von Farbstoffen von Medikamenten (Jod, schwefelhaltige Medikamente, Silbernitrat zur Zahnhalsätzung) oder Füllungsmaterialien (Aufbaumaterialien, Amalgam) verursacht sein. Gleiches tritt auch bei postendodontischen Verfärbungen auf, bei denen Farbstoffe aus Wurzelkanalfüllungsmaterialien neben den schon genannten Farbstoffen beziehungsweise farbigen Umbauprodukten der nicht vollständig entfernten Pulpa in die Dentintubuli diffundieren. Darüber hinaus entstehen Verfärbungen im Inneren des Zahnes auch durch Einlagerung von Chromogenen aus Tee, Kaffee oder Wein (ZANTNER, 2006a). Tabelle 2 gibt eine Übersicht über die intrinsischen Verfärbungen und deren mögliche Ursachen.

Tab. 2: Intrinsische Zahnverfärbungen und mögliche Ursachen (nach HOFFMANN-AXTHELM, 1995; KIELBASSA & WRBAS, 2000a; SCHMIDSEDER, 1998; WEBER, 1999a)

Verfärbung	mögliche Ursache	Beispiel
braun	·stärkere Fluorose	Fluorid
grau-braun	·Tetrazyklin (Typ 3)	Aureomycin
gelb-braun	·Turner-Zahn ·Medikamente ·Amelogenesis imperfecta ·Tetrazyklin (Typ2)	Jod, flüchtige Öle Ledermycin
gelb	·mittlere Fluorose ·Alterungsvorgänge ·Tetrazyklin (Typ 1)	Pulpaobliteration, Sekundär- oder Tertiärdentinbildung Ledermycin
rötlich	·Pulpahämorrhagie	Trauma, iatrogen
rötlich-braun	·kongenitale Porphyrie	Hämatoporphyrin
grünlich-gelb	·kongenitale Gallengangsdefekte	Biliverdin, Gallenfarbstoffe
grünlich, graublau	·Erythroblastosis fetalis ·Thalassemie	Biliverdin, Bilirubin
grauschwarz	·Füllungsmaterialien ·postendodontisch	Amalgam unvollständige Trepanation
schwarzbraun	·iatrogene Ursachen	Silbernitrat
bernsteinfarben-bläulich	·Dentinogenesis imperfecta	
weißlich-opak	·lokale Veränderung der Schmelzdichte	Fluorose, Schmelzreifungsstörungen (zum Beispiel durch Trauma)
schwarz	·Wurzelkanalfüllungsmaterialien ·schwefelhaltige Medikamente	Silberstift

2.1.3 Struktur von organischen Verfärbungen

Für die Farbe organischer Verbindungen sind deren Absorptionseigenschaften innerhalb des sichtbaren Lichtwellenbereichs von 380 bis 750 Nanometer (nm) verantwortlich. Alle Verbindungen, die elektromagnetische Strahlung absorbieren können, werden als Chromophore (griech. Farbträger) bezeichnet (BREUER, 2006). Die Absorption (lat.: absorptio = Aufsaugung) von Licht (elektromagnetischer Strahlung) beruht darauf, dass bestimmte Strukturen des bestrahlten Objektes durch stoffspezifische Wellenlängen energetisch angeregt werden (BEYER et al., 1998). Dabei kommt es zu einer Anhebung des Energieniveaus von Elektronen der Moleküle des bestrahlten Objekts (Promovierung). Daraus resultiert kurzzeitig die Erhöhung des Abstandes zwischen den angeregten Elektronen und dem Atomkern. Die für diesen Vorgang benötigte Energie wird von der einfallenden elektromagnetischen Strahlung in Form der jeweils benötigten Wellenlänge bereitgestellt. Diese spezifische Wellenlänge fehlt dem Spektrum der austretenden Reststrahlung (Remission). Nach der Absorption im Wellenlängenbereich des sichtbaren Spektrums wird ein Objekt vom menschlichen Auge farbig perzipiert. Die wahrgenommene Farbe entspricht dabei der korrespondierenden Komplementärfarbe des absorbierten Spektralbereichs (BREUER, 2006). Zum Beispiel wird eine Verbindung, bei der Absorption der Spektralfarbe Violett (ca. 400 nm), vom Betrachter als gelb wahrgenommen. Dem menschlichen Auge erscheinen organische Verbindungen normalerweise farblos, da sie einfallendes Licht im Bereich der Ultraviolettstrahlung (<380 nm) absorbieren. Die Absorption des Lichts im unsichtbaren Bereich kann jedoch durch strukturelle Veränderung der Moleküle der jeweiligen Verbindung in den sichtbaren Teil des Spektrums verschoben werden (NIETZKI, 1897). Um die Wirkungsweise der Chromophoren besser zu verstehen, werden in der Farbstoffchemie¹ Chromophore in so genannte Chromogene und Auxochrome unterteilt (FLEURY et al., 1969). Zu den Chromophoren gehören vorrangig Grundstrukturen wie die para-Chinoide, ortho-Chinoide, Benzolringstrukturen, Diaryleinheiten, Carbonylgruppen und konjugierte Doppelbindungen (Abb. 5a & 5b). Zu den Chromogenen, den farberzeugenden Strukturen, gehören folglich ungesättigte Strukturen und funktionelle Gruppen, die im sichtbaren Lichtwellenlängenbereich die charakteristischen Absorptionsspitzen erzeugen. Verantwortlich dafür ist zum Beispiel die Einführung von Doppelbindungen zwischen die Atome dieser Moleküle. Kohlenwasserstoffe mit mehr als einer Doppelbindung (C=C) werden als Polyene bezeichnet (Abb. 1).

¹ Erweiterte Farbstofftheorie nach Witt

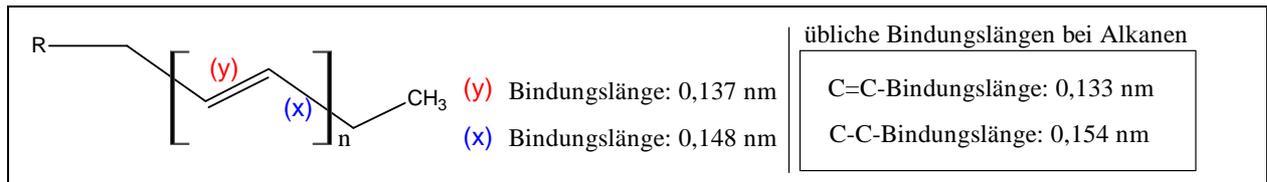


Abb. 1: Allgemeine Strukturformel für Polyene (n = Anzahl der Doppelbindungen, R= variabler Rest)

Doppelbindungen entstehen, wenn sich benachbarte Atome der Polyene so genannte freie Elektronen (π -Elektronen) teilen. Delokalisierte π -Bindungssysteme sind darüber hinaus auch bei C=N-, N=O-, N=N- und C=O-Gruppierungen möglich (Abb.5a). Durch die Delokalisierung der freien Elektronen über mehrere Atome wird ein energieärmerer Zustand des Gesamtsystems erreicht (ZEEK et al., 1997c). Dabei ändern sich die Bindungslängen zwischen den jeweiligen Atomen. Die Energie, die benötigt wird die π -Elektronen zu promovieren ist geringer als bei stabilen Einfachbindungen (LATSCHA et al., 2002). Für sich alleine absorbieren jedoch auch diese Doppelbindungen nur im UV-Bereich. Ab einer gewissen Anzahl von Doppelbindungen mit spezieller Anordnung zueinander absorbieren Moleküle dieser Struktur dagegen energieärmere Wellenlängen im sichtbaren Bereich des Lichts. Deutliche Verschiebungen in das Absorptionsspektrum des sichtbaren Lichts treten daher erst auf, wenn mehrere Doppelbindungen miteinander konjugiert sind, die Doppelbindungen also nur durch eine Einfachbindung getrennt werden (alternierende Doppelbindungen). Die π -Elektronen bestimmen dabei den spezifischen Absorptionsbereich, denn je stärker die Delokalisierung jener Elektronen ist, desto langwelliger ist das Licht, das die Verbindung absorbiert (BEYER et al., 1998). Dem menschlichen Auge erscheinen zum Beispiel Polyene mit weniger als acht alternierenden π -Elektronen farblos, da sie sehr energiereiches UV-Licht absorbieren (LATSCHA et al., 2002). Bei mehr als acht konjugierten Doppelbindungen hingegen erscheint die Verbindung leicht gelblich. Ab 14 konjugierten Doppelbindungen wird das Licht im blauen Spektralbereich absorbiert, woraus eine Farbwahrnehmung der Verbindung resultiert, die der Farbe Orange entspricht (Abb. 2).

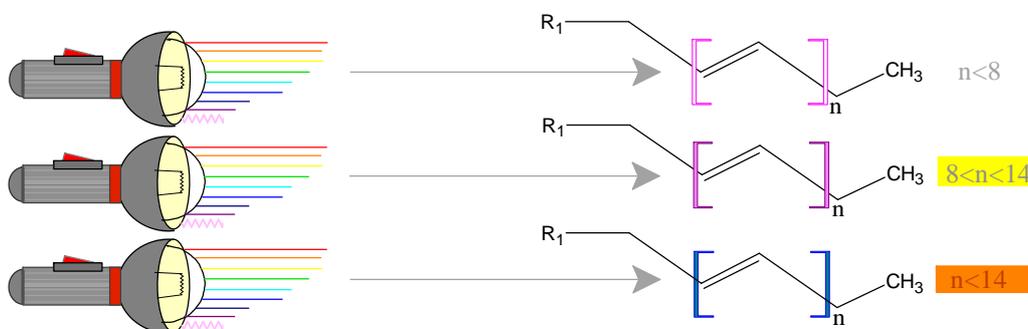


Abb. 2: Absorption innerhalb des sichtbaren Lichtwellenbereichs (380-750 nm) und der UV-Strahlung (<380 nm) in Abhängigkeit der Anzahl (n) der Doppelbindungen von Polyenen sowie die resultierende **Farbwirkung**

Für die Farbwirkung von Cyaninen (farbige Verbindungen, die nur wenige C-Atome enthalten; Abb. 3a) und aromatischen Ringverbindungen werden nicht so viele konjugierte Doppelbindungen benötigt, da bei diesen Molekülen die π -Elektronen stärker delokalisiert sind. Die Bindungslängen zwischen C-C-Einfachbindungen und C=C-Doppelbindungen der Cyanine sind nur wenig unterschiedlich und besitzen somit den gleichen Charakter. Ähnliches gilt für die delokalisierten Doppelbindungssysteme der aromatischen Ringverbindungen. Beim Benzol zum Beispiel sind die π -Elektronen so stark delokalisiert, dass formell keine Unterschiede mehr zwischen den C-C-Einfachbindungen und C=C-Doppelbindungen bestehen (ZEEK et al., 1997c). Der Sechsring ist symmetrisch und alle beteiligten Bindungen gleich lang (0,139 nm) und somit kürzer als die Bindungslängen von C-C-Einfachbindungen (0,154nm) und deutlich länger als die der isolierten C=C-Doppelbindungen (0,133 nm) (Abb. 3b). Obwohl Benzol Licht per se noch nicht im sichtbaren Bereich absorbiert, ist es auf Grund des Systems der stark delokalisierten π -Elektronen ein Grundelement von aromatischen Chromophoren.

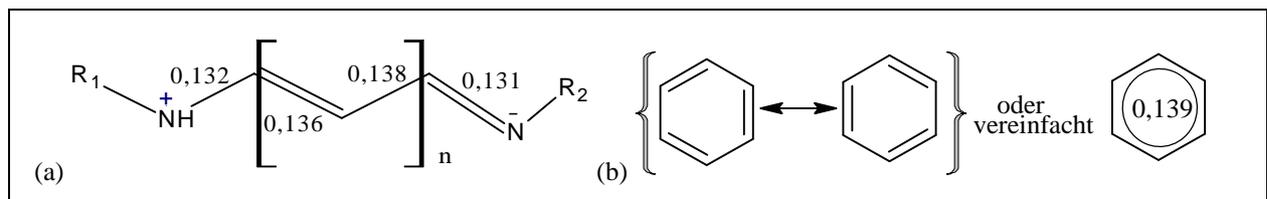


Abb. 3: (a) allgemeine Strukturformel eines Cyanins (n = Anzahl der Doppelbindungen, + & - = +M- & -M-Effekt, R_1 , R_2 = variabler Rest), (b) mesomere Grenzformeln von Benzol [alle Bindungslängen in nm]

Um ihre Absorption ins Sichtbare zu verschieben, müssen folglich meist mehrere Chromophore miteinander in Konjugation treten. Eine weitere Möglichkeit zur Verschiebung der Absorption in den sichtbaren Bereich besteht darin, in den Chromophoren polare Gruppen, die so genannten Auxochrome und Antiauxochrome einzuführen (BREUER, 2006). Diese bewirken durch eine Polarisation des Moleküls eine ladungsbedingte Verschiebung bestimmter Elektronen (π -Elektronen) innerhalb der Anordnung von ungesättigten Verbindungen (+M-Effekt und -M-Effekt). Zu diesen „farbunterstützenden Strukturen“ zählen vor allem die Hydroxylgruppen, Etherfunktionen, Aminogruppen und Carboxylgruppen. In den Abbildungen 4, 5a und 5b sind chromogene und auxochrome Grundstrukturen aufgeführt.

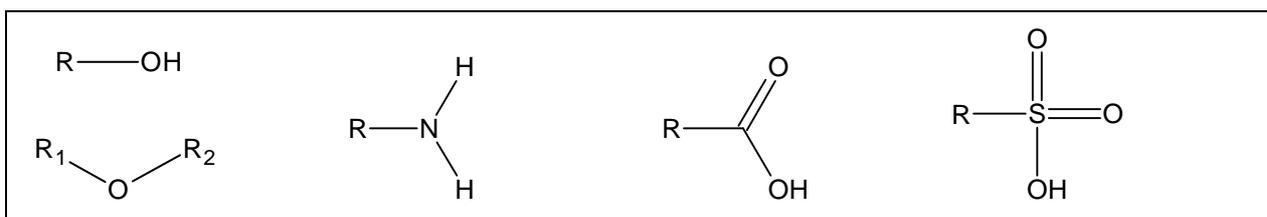


Abb. 4: Strukturformeln verschiedener Auxochrome (R = variabler Rest)

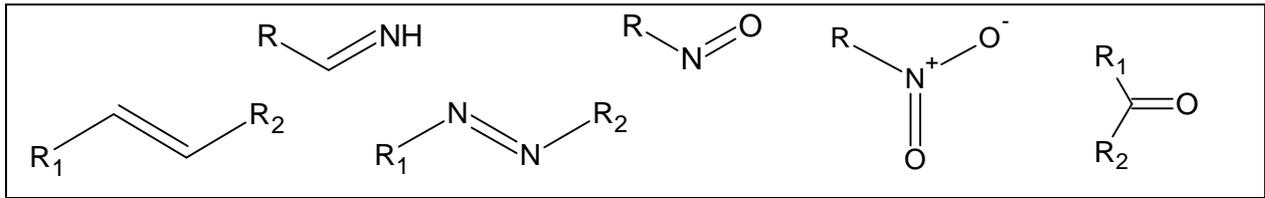


Abb. 5 a: Strukturformeln verschiedener Chromophore (R= variabler Rest)

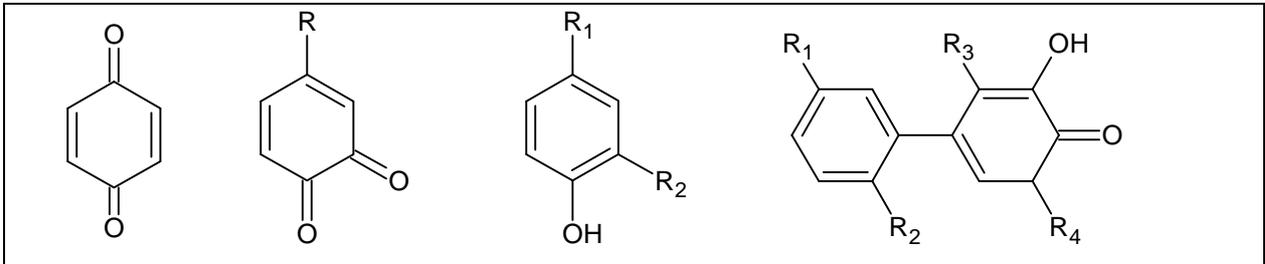


Abb. 5 b: Strukturformeln verschiedener aromatischer Chromophore (R= variabler Rest)

2.2 Wirkstoffe zur Zahnaufhellung

2.2.1 Reduktions-Oxidations-Reaktion

Der Wirkmechanismus der Zahnaufhellung auf molekularer Ebene beruht auf einer Kaskade von Stoffumsetzungen. Der Hauptwirkmechanismus scheint dabei auf dem Prinzip von Reduktions-Oxidations-Reaktionen (Redox-Reaktionen) zu beruhen. Die nachfolgende Zusammenfassung der Redox-Reaktionen wird für die weitere Erörterung des Wirkmechanismus von Zahnaufhellungsprodukten vorausgesetzt.

Historisch wurden die Begriffe der Oxidation und Reduktion von Antoine Laurent de Lavoisier² geprägt. Er bezeichnete die Vereinigung von Elementen und chemischen Verbindungen mit dem Element Sauerstoff (lat. Oxygenium), also die Bildung von Oxiden, als Oxidation. Als Reduktion bezeichnete de Lavoisier den Zerfall von Oxiden in das ursprüngliche Element und Sauerstoff. Später erfolgte eine Erweiterung des Begriffes Oxidation, indem man die Reaktionen einbezog, bei denen einer Verbindung Wasserstoffatome entzogen wurden (Dehydrierung). Dementsprechend wurde die Aufnahme von Wasserstoff als Reduktion definiert. Diese Definition des Oxidations- und des Reduktionsbegriffes ist vor allem für das Verständnis vieler biologischer beziehungsweise biochemischer Vorgänge wichtig, in deren Laufe es zu komplexen Strukturänderungen von Makromolekülen kommt (ZEEK et al., 1997b). So werden zum Beispiel in der Atmungskette organischen Verbindungen Wasserstoffatome durch bestimmte Coenzyme (NAD, FMN, Ubichinon, Cytochrome) „entrissen“. Der Wirkmechanismus von Zahnaufhell-

² Antoine Laurent de Lavoisier: französischer Chemiker, 1743 - 1794

lungsmitteln beruht ebenfalls auf – durch Oxidationsvorgänge induzierte – molekulare Strukturänderungen organischer Verfärbungen. Der Begriff Oxidation ist in der organischen Chemie gleichbedeutend mit Dehydrierung. Auf Grundlage der Ionentheorie und des Bohrschen Atommodells wurden Oxidation und Reduktion letztendlich als Elektronenübertragungsreaktionen chemischer Stoffe definiert. Diese kommen durch das Bestreben der Atome ihre „äußere Elektronenschale“ (Valenzelektronen) zu komplettieren und somit einen energetisch stabilen Zustand zu erreichen (Oktettregel) zustande (HOLLEMANN et al., 1997). Bei der Redox-Reaktion handelt es sich also genau genommen um zwei eng aneinander gekoppelte chemische Elektronenübertragungs-Reaktionen. Die Oxidation führt zur Abgabe von Elektronen des einen Stoffes, die gleichzeitig von dessen Reaktionspartner aufgenommen werden (Reduktion). Zusammen bedingen diese Reaktionen eine Stoffumwandlung, bei der der Elektronenakzeptor (Oxidationsmittel) den Reaktionspartner oxidiert und dabei selbst reduziert wird. Der Elektronendonator (Reduktionsmittel) stellt dabei das zu übertragende Elektron zur Verfügung, reduziert folglich den Elektronenakzeptor und wird auf diese Weise selber oxidiert. Ob die Reaktion dabei freiwillig abläuft (exergon), geht aus der elektrochemischen Spannungsreihe hervor (siehe Lehrbücher der Chemie). Diese enthält alle Redoxpaare, deren Normalpotentiale (E^0) unter Standardbedingungen in Bezug zur Normalwasserstoffelektrode (Bezugselektrode) gestellt wurden. Die Stärke einer ablaufenden Redox-Reaktion zweier Stoffe wird durch die elektromotorische Kraft (ΔE) definiert (Gl. 1).

$$\Delta E^0 = E^0_{(\text{OX})} - E^0_{(\text{RED})} \quad \text{Gleichung 1}$$

Diese ist Gibbs` freier Energie ($\Delta G =$ Maß der Triebkraft einer Reaktion) proportional (ZEEK et al., 1997a). Wie viel Arbeit das System bei molarem Umsatz leisten kann, ergibt sich aus der Beziehung der Gleichung 2, wobei „z“ der Zahl der übertragenen Elektronen und „F“ der Faraday-Konstante entspricht. Bei negativen ΔG -Werten läuft die Reaktion exergon (freiwillig). Dahingegen muss bei endergonen Reaktionen Arbeit aufgebracht werden ($\Delta G > 0$).

$$\Delta G = -z \times F \times \Delta E \quad \text{Gleichung 2}$$

Geht man davon aus, dass die Standardbedingungen nicht erfüllt sind, erhält man ein Potential E, dass von E^0 verschieden ist, dieses berechnet sich nach der Gleichung 3, wobei R der Gas-konstante und T der Temperatur in Kelvin entspricht.

$$E = E^0 + \frac{R \times T}{z \times F} \ln \frac{(\text{OX})}{(\text{Red})} \quad \text{Gleichung 3}$$

Es kann also zusammengefasst werden, dass der Begriff Oxidation auf alle Reaktionen erweitert werden kann, die nach dem gleichen chemischen Prinzip ablaufen, auch wenn kein Sauerstoff daran beteiligt ist. Es gibt dementsprechend neben dem Sauerstoff weitere potente Oxidationsmittel. Als solche fungieren die Halogene (Chlor, Fluor, Brom, Iod) sowie sauerstoffreiche Verbindungen mit Atomen in höchstmöglicher Oxidationszahl (wie Schwefel- und Salpetersäure, Kaliumpermanganat, Kaliumperchlorat oder Kaliumnitrat). Atome und molekulare Verbindungen, die ein hohes Bestreben haben, Elektronen abzugeben, sind potenzielle Reduktionsmittel. Aus den Gleichungen 1, 2 und 3 wird deutlich, dass Redox-Reaktionen konzentrations- und temperaturabhängig sind und analog der Spannungsreihe beziehungsweise der elektromotorischen Kraft nur in eine Richtung spontan (freiwillig) verlaufen (ZEEK et al., 1997a). Überdies wurde festgestellt, dass Redox-Reaktionen pH-Wert-abhängig sind. Die Oxidationskraft des „klassischen“ Oxidationsmittels Sauerstoff ist im sauren Milieu stärker als im basischen. Katalysatoren beziehungsweise Enzyme vermögen es, die Kinetik der Redox-Reaktionen zu beeinflussen.

2.2.2 Wirkmechanismus der oxidativen Zahnaufhellung

Produkte zur Zahnaufhellung wirken oxidierend auf die Chromophore von organischen Verfärbungen. Auf Grund der molekularen Strukturänderungen in Folge einer Oxidation verändert sich das Absorptionsspektrum der in der Zahnhartsubstanz lokalisierten Chromogene. Die resultierende Remission im UV-Bereich ist für das menschliche Auge nicht sichtbar, die Verfärbung wird unsichtbar und letztendlich erscheint der Zahn aufgehellt. Präparate für die Bleichtherapie enthalten als aktive Bestandteile starke Oxidationsmittel (Elektronenakzeptoren). Als Oxidationsmittel kann zum Beispiel Chlordioxid angewendet werden, welches schon seit Jahren erfolgreich zum Bleichen in der Cellulose-, Papier- und Textilindustrie sowie zur Desinfektion von Wasser genutzt wird. Die gebräuchlichsten Oxidationsmittel in Bleichprodukten zur Zahnaufhellung sind jedoch vor allem Verbindungen mit Peroxygruppen (-O-O-), so genannte Peroxide. Das in Zahnaufhellungsprodukten am gebräuchlichste Peroxid ist das sehr reaktive Wasserstoffperoxid (H_2O_2). Das Wasserstoffperoxid ist entweder direkt in den Bleichprodukten enthalten oder entsteht unmittelbar vor dem Bleichvorgang aus der Zersetzung von speziellen Wirkstoffträgerstoffen. Neben dem als Träger am häufigsten genutzten Carbamidperoxid können auch Natriumkarbonatperoxid oder Natriumperborat als Trägerstoffe zur Anwendung kommen. MOKHLIS et al. (2000) stellten fest, dass „Homebleaching-Systeme“

sowohl auf Wasserstoffperoxid- als auch auf Carbamidperoxid-Basis in ihrem Bleichpotential als effektiv anzusehen sind.

Peroxide zerfallen nach Aufbringen auf die Zahnoberfläche (Abb. 6). Dieser chemische Zerfall wird durch die Temperaturänderung (etwa 37 °C bei geschlossenem Mund), Änderung des pH-Wertes und das Vorhandensein von Katalysatoren wie Metallionen oder Speichelenzymen (Peroxidase und Katalase) bedingt. Abhängig vom Katalysator zerfällt Wasserstoffperoxid in Wasser, Hydroperoxide (alte Bezeichnung: Superoxide) und Hydroxylradikale [HO·] oder sogar in Hydroperoxoradikale (Perhydroxyl-Radikale) [HO₂·] (Abb.6).

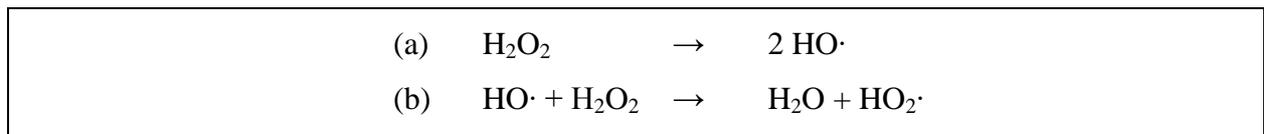


Abb. 6: Zerfall von H₂O₂ in: (a) Hydroxylradikale [OH·] oder (b) Hydroperoxoradikale [HO₂·]

Diese hochreaktiven Radikale sind für die Bleichwirkung der Peroxide verantwortlich. Organische Verfärbungen weisen konjugierte Doppelbindungen auf, die einfallendes Licht im sichtbaren Spektralbereich absorbieren und so die komplementäre Farbwirkung der Chromogene verursachen. Die freigesetzten Hydroxyl- oder Hydroperoxoradikale oxidieren jene ungesättigten Doppelbindungen der organischen Verfärbungen und werden dabei selber reduziert. Hierbei wirken die Radikale (Elektronenakzeptoren) gegenüber ungesättigten Doppelbindungen (Elektronendonatoren) als Oxidationsmittel. Die C=C-Elektronendonator-Bindungen weisen im Bezug zu den Radikalen ein hohes Reduktionspotential auf. Das bedeutet: Moleküle, welche diese Bindungsart enthalten, sind gegenüber den einwirkenden Radikalen sehr oxidationsanfällig und werden durch eine Kaskade von Reaktionen in Hydroxylverbindungen umgewandelt (Abb. 7). Die resultierenden Hydroxyl-Verbindungen absorbieren einfallendes Licht im nicht sichtbaren Lichtspektrum. Auf diese Weise werden die oxidierten Verbindungen für das menschliche Auge unsichtbar und die Zahnfarbe erscheint dem Betrachter heller als vor der Bleichbehandlung.

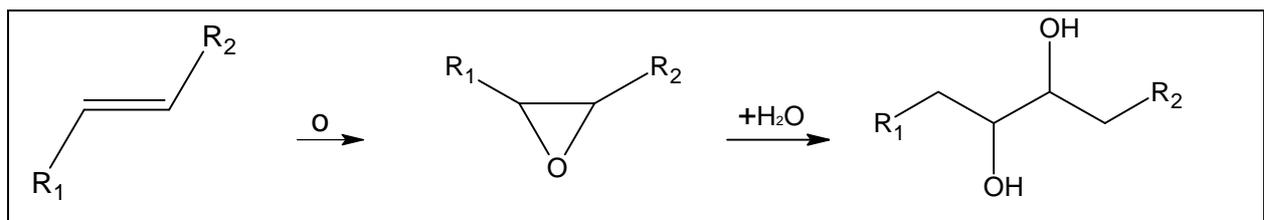


Abb. 7: Die gegenüber den Peroxiden äußerst instabilen ungesättigten Doppelbindungen der Chromogene ändern in Folge der Oxidation ihre Zustandsform in lineare Kohlenwasserstoffverbindungen.³

³ modifiziert nach: Wissenschaftliche Dokumentation VivaStyle® Paint On, März 2005 Ivoclar Vivadent AG, Liechtenstein

Farbig wirkende Chinoid-Ring-Systeme reagieren mit Wasserstoffperoxid durch die Addition von Hydroperoxoradikalen an chinoide C=O- oder zu diesen konjugierte C=C-Bindungen. Für die Spaltung der entstehenden Halbketale wird ein intramolekularer Angriff (nucleophil) durch das Peroxid anion auf die Carbonylkohlenstoffatome mit Dioxetanstruktur oder eine alkaliinduzierte heterolytische Spaltung der C-C-Bindung der beiden CO-Gruppen tragenden C-Atome angenommen (GIERER, 1990). In beiden Fällen entstehen als Endprodukte lineare Muconsäurederivate (Abb. 8). Durch das „Aufreißen“ des Ringsystemes wird folglich das Absorptionsspektrum des jeweiligen Chromophors geändert.

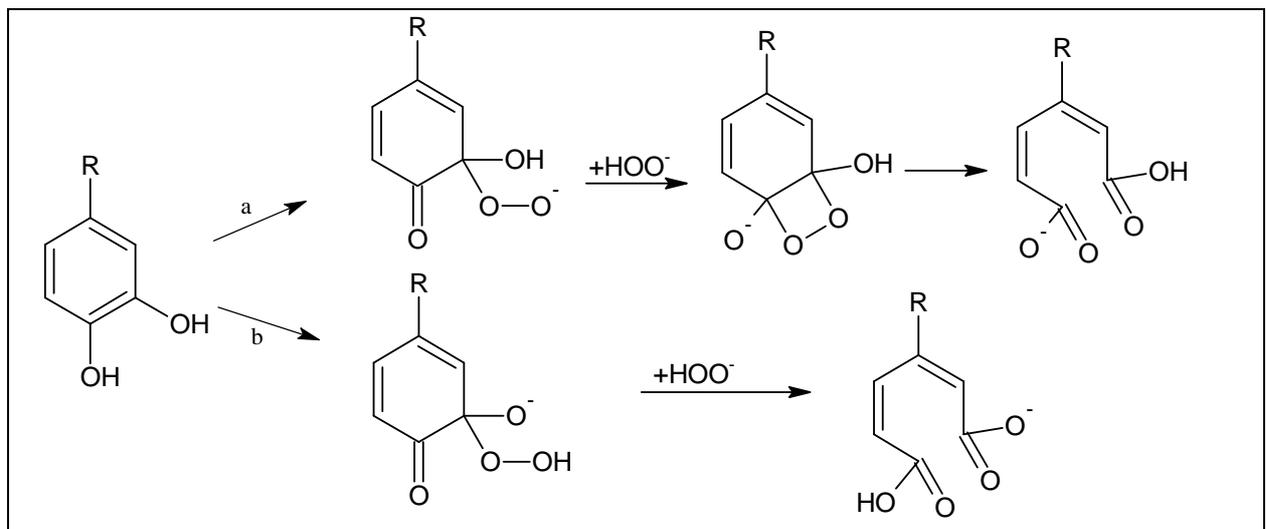


Abb. 8: Nucleophiler Angriff auf Chinoidstrukturen mit anschließender Ringspaltung über Dioxetane (a) sowie alkaliinduzierte, heterolytische Ringspaltung (b) (modifiziert nach GIERER, 1990) (R= variabler Rest).

Innerhalb der Zahnhartsubstanz soll Wasserstoffperoxid auch als Reduktionsmittel wirken können. Es besteht die Möglichkeit, dass es dabei an Redox-Reaktionen beteiligt ist, in dessen Folge einzelne chromogene Metalloxide reduziert werden. Jedoch sind der Reduktionsfähigkeit von Wasserstoffperoxid gegenüber Metalloxiden auf Grund der Reaktionsenthalpie von Redox-Reaktionen Grenzen gesetzt. Daher lassen sich nicht alle Arten von Zahnverfärbungen mit der Anwendung von einer Aufhellungstherapie entfernen. So erweisen sich zum Beispiel Zahnverfärbungen auf Grund von Silberoxiden (Amalgamtätowierungen) in der Regel als therapieresistent (WIEGAND et al., 2006). Für den Wirkmechanismus von Bleichmitteln kann abschließend resümiert werden, dass in Folge deren Applikation beziehungsweise Diffusion in den Zahn Farbmoleküle unterschiedlicher Struktur in situ durch chemische Reaktionen in farblos erscheinende Strukturen umgesetzt werden, wodurch die natürliche Zahnfarbe wiederhergestellt werden kann (KIELBASSA & ZANTNER, 2001).

Nach der Bleichanwendung soll es im Laufe der Zeit in umgekehrter Weise auf Grund von der Reduktionsvorgängen zum Rezidiv kommen können, so dass der Zahn wieder dunkler als unmittelbar nach der Bleichbehandlung erscheint (WEBER, 2000c). Dies wäre jedoch nur bei einem extrem ungleichen Verhältnis von oxidierten zu reduzierten Chromogenen, Änderung des pH-Wertes und Vorhandensein von Katalysatoren zu erwarten, da bei diesen Reaktionen endergone Bedingungen vorliegen. Das Zustandekommen solcher, nach längerer Zeit entstandenen Rezidive der Bleichbehandlung ist durch die nachträgliche Einlagerung neuer Chromogene in die Zahnhartsubstanz zu erklären. Auch wurden Rezidive kurz nach erfolgreicher Aufhellung (im Zeitraum einer Woche) beschrieben. Diese leichte Nachdunklung soll durch die Rehydratation, also Wassereinlagerung in den zuvor gebleichten Zahn, entstehen (WEILER, 2002). Das Phänomen, dass Zähne nach absoluter Trockenlegung (z.B. Kofferdam-Applikation, extrahierter Zahn) durch Dehydratation (Wasserverlust) heller erscheinen, ist schon länger bekannt und beruht auf veränderten Brechungseigenschaften des Lichts an den Grenzstrukturen. Inhaltsstoffe einiger Bleichmittel vermögen es wahrscheinlich, dem Zahn temporär Wasser zu entziehen (FISCHER et al., 1995; WEILER, 2002). Wassereinlagerung kann auch durch die zusätzliche Anlagerung von Wassermolekülen in Form einer Hydrat-Sphäre (Hydrathülle) an polare Strukturen, die in Folge der Oxidation entstanden sind, erklärt werden.

2.2.3 Wasserstoffperoxid

Wasserstoffperoxid (H_2O_2)⁴ – eine farblose, flüssige Verbindung aus Wasserstoffatomen und Sauerstoffatomen (Abb. 9) – ist leicht in Wasser, Alkohol und Ethylenglycol löslich und stellt ein starkes Oxidationsmittel dar. Wasserstoffperoxid vermag aufgrund des geringen Molekulargewichtes in die Zahnhartsubstanzen (Schmelz und Dentin) zu diffundieren (HEGEDUS et al., 1999). Hier zerfällt es unter Wasserabspaltung in einatomige Sauerstoffradikale (naszierender Sauerstoff, Singulett-Sauerstoff), in Hydroxylradikale $[\text{OH}\cdot]$ oder in Hydroperoxoradikale. Die frei werdenden Radikale spalten die konjugierten Doppelbindungen der Verfärbungen und machen diese so unsichtbar.

AL-QUNAIAN et al. untersuchten 2006 die Kinetik des Zerfalls von dreiprozentigem Wasserstoffperoxid *in vivo*. Hierbei stellten sie fest, dass die Konzentration des Wasserstoffperoxids

⁴ Synonyme: Hydrogenperoxid
Wasserstoffdioxid
Wasserstoffsuperoxid
Wasserstoffhyperoxid
Perhydrol

innerhalb des Bleichmittelträgers in den ersten zehn Minuten rapide abfiel. Nach diesen zehn Minuten wurde ein moderaterer exponentieller Abfall der Konzentration festgestellt. Für den durchschnittlichen Wasserstoffperoxidgehalt nach fünf, zehn, 20, 30, 45 und 60 Minuten wurden Werte von 61%, 56 %, 49 %, 44 %, 38 % und 32 % gefunden.

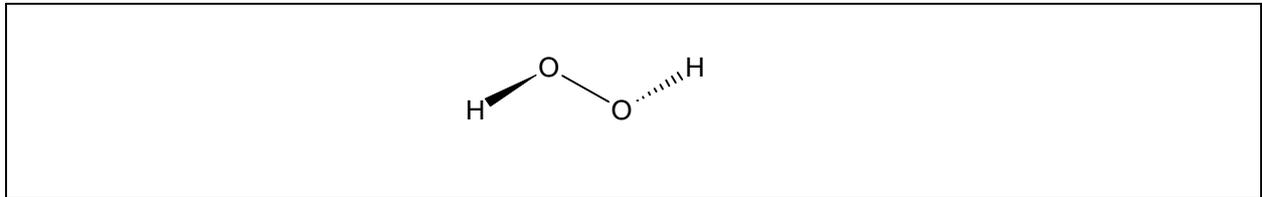


Abb. 9: Strukturformel von Wasserstoffperoxid [H₂O₂]

2.2.4 Carbamidperoxid

Carbamidperoxid⁵ (Abb. 10) wurde ursprünglich in der Zahnmedizin als orales Antiseptikum verwendet (STINDT et al., 1989). Seit den 80er Jahren wurde die zufällig entdeckte bleichende Wirkung dieser Substanz zum Aufhellen von verfärbten Zähnen genutzt.

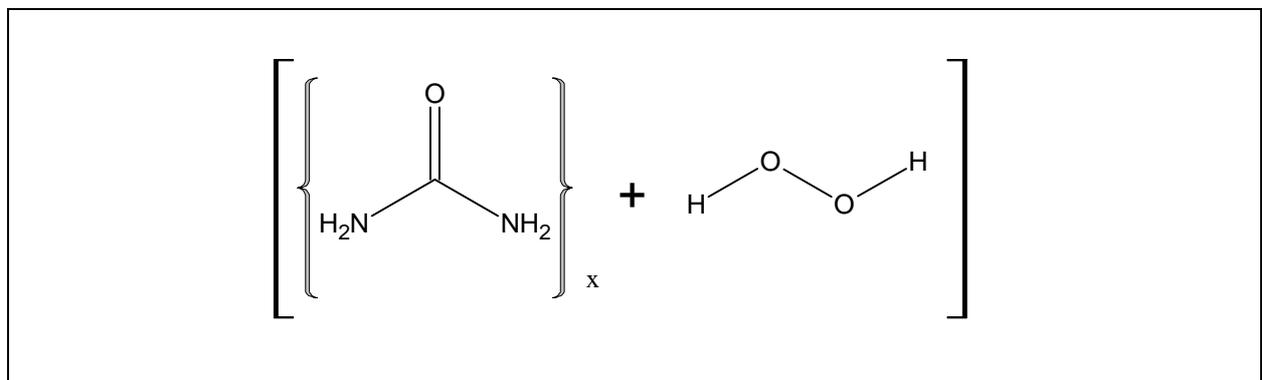


Abb. 10: Carbamidperoxid [CH₆N₂O₃] (x=variable Zusammensetzung des Adduktes [+] aus {Urea} und H₂O₂)

In Normalzustand liegt Carbamidperoxid in Form von weißlichen Kristallen oder weißlichem Pulver vor. Carbamidperoxid ist leicht in Wasser löslich. Da bei diesem Prozess Wasserstoffperoxid abgespalten wird, stellt es ein starkes Oxidationsmittel dar. Carbamidperoxid ist eine Verbindung, die es ermöglicht, die eigentliche Wirksubstanz, Wasserstoffperoxid, in einer stabilen Form zu lagern („Wirkstoffcarrier“). Erst bei Kontakt mit Ionen, Speichelproteinen oder Wasser wird die Dissoziation eingeleitet (CHERRY et al., 1993). Beim Kontakt mit der

⁵ Synonyme: Perhydrit
Hydrogenperoxid-Carbamid
Percarbamid
Harnstoffperoxyhydrat
Harnstoff-Wasserstoffperoxid

Zahnschmelze zerfällt Carbamidperoxid daher in seine Bestandteile Harnstoff⁶ [CO(NH₂)₂] und Wasserstoffperoxid (KIELBASSA & WRBAS, 2000c). Das Wasserstoffperoxid vermag in die Zahnhartsubstanz einzudringen und – nach der Abspaltung von Wasser – in Form von hochreaktiven Sauerstoffradikalen zu einer Zahnaufhellung zu führen. Der Harnstoff dagegen zerfällt in einem weiteren Schritt auf der Zahnoberfläche in Ammonium [NH₃] und Kohlendioxid [CO₂]. Die Herstellung von Carbamidperoxid gelingt nur, weil Harnstoff unempfindlich gegen Oxidationsmittel wie Wasserstoffperoxid ist. Zur genauen prozentualen Zusammensetzung von Carbamidperoxid finden sich in der Literatur und in Produktbeschreibungen verschiedener Bleichprodukte leicht differierende Angaben. Für den Zerfall von 10%igem Carbamidperoxid wurde eine Freisetzung von 3 % Wasserstoffperoxid und 7 % Harnstoff angegeben (RODRIGUES et al., 2001; KIELBASSA & ZANTNER, 2001). Diese Angabe findet sich in der Literatur häufig. Jedoch handelt es sich beim Carbamidperoxid weniger um eine echte chemische Verbindung als um ein Addukt von Harnstoff und Wasserstoffperoxid (Wirkstoffcarrier), so dass produktspezifisch messbare Abweichungen der Zusammensetzung möglich sind. In der wissenschaftlichen Dokumentation eines Bleichlackes zur häuslichen Anwendung auf Carbamidperoxidbasis⁷ wird zum Beispiel für ein Gramm Carbamidperoxid eine Freisetzung von 0,36 Gramm Wasserstoffperoxid angegeben. Das Scientific Committee on Consumers Products (SCCP, 2005) gab diesen Wert ebenso an (2005). Für zwei andere Bleichmittel⁸ zur häuslichen Anwendung auf Basis von 10 %igem Carbamidperoxid wurde eine Konzentration von 3,4% Wasserstoffperoxid und eine 6,6%ige Harnstoffkonzentration angegeben. COOPER et al. (1993) gaben für den Zerfall von 10%igem Carbamidperoxid eine wirksame Konzentration von etwa 3,3 % an freigesetztem Wasserstoffperoxid an. FASANARO (1992) beziffert den Zerfall von 10 %iger Carbamidperoxidlösung auf 3,35% Wasserstoffperoxid und 6,65 % Urea.

MATIS et al. (1999) fanden bei der In-vivo-Untersuchung des Zerfalls von zehnpotentem Carbamidperoxid einen biexponentialen Abfall der Wirkstoffkonzentration. Es wurden *in vivo* nach 15 Sekunden, einer Stunde, zwei Stunden, vier Stunden, sechs Stunden und zehn Stunden ein Abfall von durchschnittlich 87 %, 66 %, 53 %, 31 %, 18 % und 6 % gefunden. Das Carbamidperoxid ist also noch nach zehn Stunden im Bleichgel vorhanden, jedoch in einer minimalen Konzentration. Die Halbwertszeit liegt demnach etwa bei zwei Stunden.

⁶ Synonyme: Carbamid, Urea, Kohlendäurediamid

⁷ Wissenschaftliche Dokumentation VivaStyle® Paint On, März 2005 Ivoclar Vivadent AG, Liechtenstein

⁸ Colgate Platinum®, Colgate Oral Pharmaceuticals, Inc., USA; Opalescence® 10%, Ultradent Products, Inc., USA

2.2.5 Bleichmittel auf Chlorit-/ Chlordioxidbasis

Chlordioxid (Abb. 11) wird seit 1947 vermehrt in der Trinkwasserdesinfektion genutzt, seit bekannt wurde, dass Chlor potenziell gesundheitsschädigende Desinfektionsnebenprodukte (z. B. THM) zu bilden vermag. Auch in der Lebensmittelindustrie wird diese Substanz angewendet, um Obst und Gemüse zu reinigen. Chlordioxid [ClO_2] wirkt in Form eines relativ stabilen freien Radikals als potentes Oxidationsmittel (Elektronenakzeptor). Der ClO_2 -Grenzwert nach Trinkwasseraufbereitung beträgt 0,2 mg/l in Europa und 0,8 mg/l in den USA. Im Gegensatz zu Chlor hat es keinen negativen Einfluss auf den Geschmack und den Geruch von Wasser.

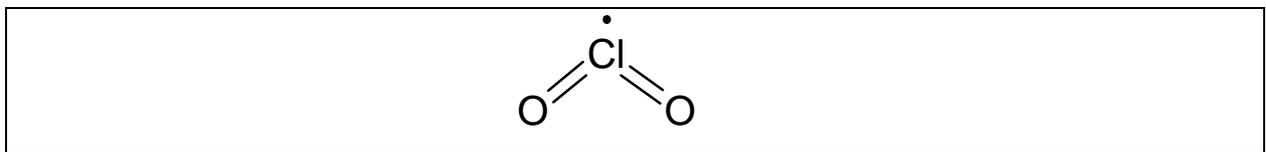


Abb. 11: Chlordioxid [ClO_2]

Das Hauptanwendungsgebiet des Bleichmittels Natriumchlorit [NaClO_2]⁹ ist seit langem die Cellulose-, Papier- und Textilindustrie. NaClO_2 ist das Natriumsalz der chlorigen Säure, das in Lösung gefahrlos handhabbar ist und in Anwesenheit von Säuren geringe Mengen des starken Oxidationsmittels Chlordioxid freisetzt (HOLLEMANN et al., 1997; LIPS, 2004). Die Konzentration des leicht flüchtigen Chlordioxidgases nimmt bei Absinken des pH-Wertes unter 5 zu. Dementsprechend wächst die Möglichkeit einer unerwünschten Chlordioxidbelastung im sauren Milieu (ERLER et al., 2005). Im menschlichen Stoffwechsel erfährt Chlorit eine Umwandlung zu Chlorid (Gl. 4).



Zahnbleichsysteme auf Natriumchloritbasis bestehen meist aus zwei Komponenten. Der Reaktionsbeschleuniger (Accelerator) mit Natriumchlorit-Lösung mit einem basischen pH-Wert wird direkt auf die Zähne aufgebracht. Die 2. Komponente besteht aus einem Säuerungsmittel (zum Beispiel Citronensäure) mit niedrigem pH-Wert. Nachdem das Säuerungsmittel – in der Regel mit Hilfe einer Schiene – auf die mit dem Accelerator vorbehandelten Zähne aufgebracht wird, kommt es zur Bildung von Chlordioxid, das aus der chlorigen Säure freigesetzt wird und als das bleichende Wirkprinzip anzusehen ist.

⁹ Synonym: Natriumchlorit

In einer Studie von ERLER et al. (2005) wurde die ClO_2 -Freisetzung während der Anwendung eines Bleichmittelsystems zur häuslichen Anwendung auf Natriumchloritbasis (2,51%ig) untersucht. Die vom Hersteller empfohlene Anwendung des Zahnweißsystems führte *in vivo* bei einem Probandenkollektiv von 40 Personen bei Anwendung über drei Wochen zu einer durchschnittlichen ClO_2 -Konzentration von 1 mg/l Speichel. Die im Speichel gemessene ClO_2 -Konzentration war demnach im Vergleich zu zulässigen Werten bei der Trinkwasseraufbereitung im Mittel nur um das Fünffache erhöht. Analog zu den Ergebnissen der Speichelanalysen war ClO_2 auch in der Intraoral-Luft in einer Größenordnung von 5 $\mu\text{g}/\text{min}$ nachweisbar. Trotz dieser Ergebnisse folgerten die Autoren dieser Untersuchung, dass die ermittelte Belastung an Chlordioxid sowohl lokal wie auch systemisch als unbedenklich einzuschätzen sei. Die Effektivität von 2,51%igem Natriumchlorit bezüglich der zahnaufhellenden Wirkung wurde ebenfalls nachgewiesen (ERLER et al., 2005).

2.2.6 Weitere Wirkstoffe zur Zahnaufhellung

Wasserstoffperoxid kann auch durch den chemischen Zerfall von Natriumkarbonatperoxid¹⁰ [$2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$] in Bleichmitteln genutzt werden (Abb. 12a). Bei diesem chemischen Zerfall wird neben Wasserstoffperoxid das alkalische Natriumkarbonat freigesetzt, das die Effektivität des Bleichprozesses verstärken soll (WIEGAND, 2006).

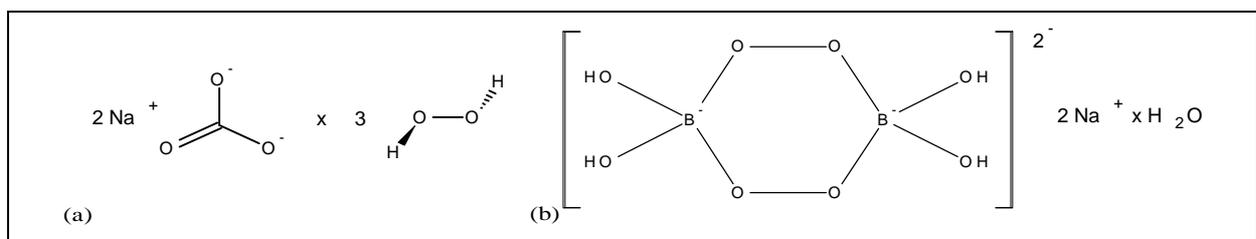
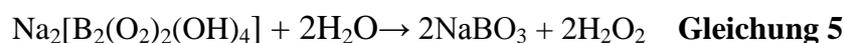


Abb. 12: Natriumkarbonatperoxid (a) und Natriumperborat (b)

Als weitere Verbindung mit einer Peroxogruppe, die aggressiven, atomaren Sauerstoff freisetzt, wird Natriumperborat¹¹ beim internen Bleichen genutzt (ARI et al., 2002). Das Natriumperborat [$\text{NaBO}_3 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] liegt im festen Zustand jedoch nicht als Natriumboroxid, sondern als Peroxoborat vor (Abb. 12b). Beim Zerfall von Natriumperborat werden Natriumhydrogenborat und Wasserstoffperoxid freigesetzt (Gleichung 5).



¹⁰ Synonym: Natriumpercarbonat

¹¹ Synonym: Natriumborat-Tetrahydrat

2.3 Die Bleichtherapie

Wie zuvor beschrieben, können verschiedenste Ursachen für Zahnverfärbungen verantwortlich sein. Dieser Vielfalt an Verfärbungen stehen unterschiedliche Bleichmethoden gegenüber, die je nach Indikation anzuwenden sind.

2.3.1 In-Office-Bleaching-Technik

Die In-Office-Bleaching-Technik, die auch als „power bleaching“ bekannt ist (FREINMANN et al., 1987), wird aufgrund hoher Wirkstoffkonzentrationen (bis 35% H₂O₂ oder 35% Carbamidperoxid, nach SCCP, 2005) und der daraus folgenden Risiken von Gewebeverletzungen bei unsachgemäßer Anwendung ausschließlich in der zahnärztlichen Praxis durchgeführt. Indikationen hierfür stellen vor allem stärkere Zahnverfärbungen vitaler Zähne dar. Das Bleichgel wird hierbei sorgfältig auf die aufzuhellenden Zahnflächen appliziert und nach Beendigung vollständig vom Zahnarzt entfernt. Die unter den Zahnflächen liegenden Zahnfleischbereiche müssen während der Behandlung sorgfältig geschützt werden, sodass im Vorfeld protektive Maßnahmen, wie zum Beispiel die Verwendung von Kofferdam oder flüssiger „Gingivaprotektoren“, zur Anwendung kommen (FREITAG et al., 2006). Zur Aktivierung von speziellen wirkungsspezifischen Katalysatoren und Steigerung der Reaktionskraft kommen bei vielen In-Office-Bleaching-Methoden Wärmeenergie oder aktivierendes Licht zur Anwendung. Für das photokatalytische Bleichen werden Halogen- und Plasmalampen sowie Laser verschiedener Wellenlängen verwendet. Die benötigte Behandlungsdauer für adäquate Zahnaufhellungen beträgt – je nach Materialwahl – etwa eine halbe Stunde. Die Anwendung kann jedoch bis zum Erreichen der gewünschten Zahnaufhellung wiederholt werden (AUSCHILL et al., 2005).

2.3.2 Internes Bleaching

Das interne Bleaching ist eine Sonderform der Zahnaufhellung, die als postendodontische Maßnahme zur Anwendung kommt. Verfärbungen nach Wurzelkanalbehandlungen, die durch persistierende Blutrückstände oder Materialverfärbungen verursacht werden, sollen mit dieser Methode beseitigt werden. Das interne Bleichmittel (Suspension von Natriumperborat und destilliertem Wasser beziehungsweise 3%-igem oder 30%-igem Wasserstoffperoxid) wird in Pastenform intrakoronar je nach angewandter Technik bis zu mehreren Tagen in das Kavum des

endodontisch behandelten, verfärbten und devitalen Zahnes platziert. Der Wirkstoff entwickelt die Bleichwirkung bei dieser Bleichtechnik also von innen heraus, wobei das wurzelkanalgefüllte Pulpakavum durch eine dicht verschlossene provisorische Füllung vom Bleichwirkstoff getrennt bleibt. Dieser Vorgang wird gegebenenfalls mehrmals wiederholt. Nach drei bis vier Zyklen sollte sich der gewünschte Bleicherfolg eingestellt haben. Man unterscheidet beim internen Bleaching die thermokatalytische Technik von der Walking-bleach-Technik.

Bei der thermokatalytischen Technik wird das Bleichmittel im koronalen Pulpakavum erwärmt, um eine beschleunigte chemische Reaktion auszulösen. Auf diese Weise wird versucht, schon innerhalb einer Behandlungssitzung einen ästhetisch befriedigenden Effekt zu erzielen. Von der Methode wird jedoch besonders aufgrund der Gefahr der Auslösung externer Resorptionen abgeraten. Bei der Walking-bleach-Technik wird der Bleicheffekt schonender – jedoch auch langsamer – erzielt, indem das Bleichmittel bis zum gewünschten Ergebnis im koronalen Pulpenkavum belassen wird. Nach Erzielen des gewünschten Farbeffektes (Tage bis Wochen) wird die Paste aus der Kavität entfernt und ein definitiver Verschluss mit einem lichthärtenden Komposit hergestellt. Die Mischung aus Natriumperborat und Wasser bzw. 3%igem Wasserstoffperoxid konnte sich beim internen Bleichen gegen die Verwendung von 30%igem Wasserstoffperoxid durchsetzen. Ein ausschlaggebender Grund dafür ist, dass das Auftreten von zervikalen Resorptionen der Zahnhartsubstanz häufig mit der Anwendung von hochkonzentrierten wasserstoffperoxidhaltigen Einlagen (30%ig) assoziiert war (ROTSTEIN et al., 1991). Des Weiteren konnte nachgewiesen werden, dass es hinsichtlich der Effektivität und der Farbstabilität bei der Verwendung von Kombinationen aus Wasser und Natriumperborat oder der Applikation einer mit 3- bis 30%igem Wasserstoffperoxid versetzten Natriumperborateinlage keine Unterschiede gibt.

In jüngster Zeit wurde auch die Kombination der externen mit der internen Bleichtechnik unter Verwendung von Carbamidperoxid beschrieben. Dieses wird in einer Schiene appliziert und mit Hilfe dieser in das offene Pulpenkavum gepresst.

2.3.3 Homebleaching-Technik

Die Homebleaching-Technik wurde 1989 von HAYWOOD und HEYMAN unter dem Synonym „nightguard vital bleaching“ beschrieben. Mit dieser Methode wird dem Patienten die Möglichkeit gegeben, sich die Zähne zu Hause selbst aufzuhellen. Die Konzentration des Wirkstoffes (bis zu 10 % H_2O_2 oder 16 % Carbamidperoxid, nach SCCP, 2005) ist bei dieser Art der Zahnaufhellung geringer als bei der zuvor beschriebenen In-Office-Bleaching-Technik.

Dennoch sind Präparate dieser Art für den Patienten nicht frei im Handel erhältlich und müssen vom Zahnarzt verschrieben werden. Um eine kontrollierte und vor allem sichere Anwendung zu gewährleisten, werden vor der Durchführung der Behandlung für den Patienten individuell angepasste Bleichschienen, so genannte Trays, angefertigt. Diese und die Bleichmittel werden dem Patienten nach Erläuterung der korrekten Durchführung zur Selbstapplikation mit nach Hause gegeben. Sowohl die tägliche Anwendungsdauer als auch die gesamte Behandlungsdauer bis zur gewünschten Zahnaufhellung sind bei dieser Methode länger als bei der In-Office-Bleaching-Technik. AUSCHILL et al. (2005) benötigten bei der Verwendung eines „Homebleachings“ (zehn Prozent Carbamidperoxid) bei einer Anwendungsdauer von acht Stunden eine durchschnittliche Behandlungshäufigkeit von $7,1 \pm 1,9$ Anwendungen, um eine Aufhellung um sechs Farbstufen auf der Vita-Farbskala zu erzielen. Im Vergleich dazu benötigte ein In-Office-Produkt (35 % H_2O_2 , Anwendungsdauer 15 Minuten) nur $3,1 \pm 0,5$ Anwendungen, um zum gleichen Ergebnis zu kommen.

2.3.4 Over-the-Counter-Produkte

In den späten neunziger Jahren wurde eine neue Kategorie von Bleichmitteln, so genannte Over-the-Counter-Produkte, zuerst in den USA und ein Jahr später ebenfalls in Europa eingeführt (ZANTNER et al. 2007). Diese Bleichmittel zur Selbstapplikation enthalten Wirkstoffkonzentrationen an Wasserstoffperoxid beziehungsweise Carbamidperoxid, die mit denen von Produkten der Homebleaching-Technik vergleichbar sein können (GREENWALL, 2001). Diese niedrigkonzentrierten Bleichmittel sind jedoch für den Anwender ohne vorherige zahnärztliche Konsultation oder Aufsicht frei im Handel zu erstehen und unter Eigenregie anzuwenden. Als weiterer Wirkstoff kann in dieser Produktgruppe Natriumchlorit zur Anwendung kommen. Ebenso sind Over-the-Counter-Produkte, die als Wirkstoffträger Natriumkarbonatperoxid enthalten, frei verkäuflich.

Die Applikationsart der Over-the-Counter-Bleichmittel kann je nach verwendetem Produkt unterschiedlich sein. Neben halbkonfektionierten Schienen oder dünnen Polyethylenstreifen als Wirkstoffträger sind „Paint-on“-Lacke erhältlich. Diese Lacke stellen eine Vereinfachung der Applikation dar, da sie lediglich mit einem feinen Pinsel oder einem Bürstchen auf die Zahnoberfläche aufgetragen werden müssen. Jedoch ist das Bleichmittel bei dieser Applikationsart vor Speichel, Wangen, Lippen und Zunge nicht geschützt. Daher sind den „Paint-on“-Lacken bestimmte Zusatzstoffe beigefügt worden, um deren Haftkraft am Applikationsort zu verbessern oder sicherzustellen. Als solche Supplemente wirken zum Beispiel

Zellulose oder bestimmte Silikonverbindungen. DATE et al. (2003) stellten in einer Untersuchung zu dieser Thematik fest, dass die Substantivität eines silikonhaltigen „Paint-on“-Produktes mit 5,3%iger Wasserstoffperoxidkonzentration nach mehrstündiger Applikation immer noch sehr hoch ist. Die Substantivität des Produktes auf der untersuchten Oberfläche betrug unmittelbar nach Auftragen 84,7 % und nach mehrstündiger Anwendung immer noch 77,4 %. Die gute Substantivität, die durch haftungssteigernde Zusätze erreicht werden kann, wurde von MAHONY et al. (2003) ebenfalls bestätigt.

2.4 Nebenwirkungen von Bleichwirkstoffen

Die Anwendung von Bleichmitteln zur Zahnaufhellung kann unerwünschte Nebenwirkungen mit sich bringen. Bei sachgerechter Anwendung der Bleichwirkstoffe wird die Gefahr akuter und nachhaltiger Schädigungen des menschlichen Organismus jedoch als sehr gering eingeschätzt. Das Verschlucken größerer Mengen Peroxid stellt das größte Gefahrenpotential der Bleichmittel dar (CHERRY et al., 1993). Wasserstoffperoxid ist ein im menschlichen Körper natürlicherweise vorkommender Stoff. Dieser ist im menschlichen Blut, im Auge und anderen Geweben nachweisbar (DE SESSO et al., 2000). Die potenzielle Toxizität von Wasserstoffperoxid hängt mit dessen Fähigkeit zusammen, hochreaktive Radikale zu bilden und Sauerstoff freizusetzen. Um zu verhindern, dass Radikale körpereigene Strukturen (DNA, Membran-Lipide) angreifen, bildet der Körper wirksame Mechanismen zu Inaktivierung dieser hochreaktiven Substanzen. Die Lactoperoxidase des Speichels sowie Katalase im Inneren der Gewebe können Wasserstoffperoxid zu unschädlichen Substanzen abbauen (BOWLES et al., 1992). Der oxidative Stress durch die Anwesenheit von Radikalen kann im Gewebe zudem durch Glutathionperoxidase, β -Carotin, Vitamin C (Ascorbinsäure) und Vitamin E (Tocopherol) sowie durch Superoxid-Dismutase abgemildert werden (COOPER et al., 1992; FLOYD et al., 1997; ATTIN, 1998). Diese Moleküle neutralisieren die freien Radikale durch Übertragung eines Elektrons. Der direkte Kontakt mit hochkonzentriertem Wasserstoffperoxid kann Gewebe verätzende und genotoxische Effekte, zumindest in Bakterienzellen und Zellkulturen, induzieren, wobei dieser Effekt durch die Zugabe der zuvor genannten metabolisierenden Enzyme aufgehoben beziehungsweise zumindest reduziert werden kann. In Anbetracht der Anwendungsart, der Konzentration und der schnellen Metabolisierung von Peroxiden aus Zahnaufhellungsprodukten in der Mundhöhle (MARSHALL et al., 2001) stellt eine klinisch zu beobachtende Zytotoxizität *in vivo* kein signifikantes Risiko dar (TSE et al., 1991; TIPTON et al., 1995). Zahnaufheller, die Wasserstoffperoxid (8 %) oder

Carbamidperoxid (24 %) enthielten, riefen an Kaninchenhaut keine Irritationen hervor, wirkten jedoch stark reizend auf die Augen (SCCP, 2005).

Für die orale Applikation von Carbamidperoxid (10 %-22 %) in Tierversuchen mit Ratten und Mäusen wurde vom „Scientific Committee on Consumers Products“ (SCCP 2005) ein LD₅₀-Wert¹² von >5000 mg/kg für Ratten und 87,2-143,8 mg/kg für Mäuse angegeben. Pro Applikation wird bei „Paint-on“-Lacken maximal 70 mg Peroxid aufgetragen, was etwa 1-2 mg/kg entspricht. Für eine LD₅₀-Dosis bei einem 70 kg schweren Menschen müsste dieser zwischen 6104 und 10066 mg Carbamidperoxid verschlucken. Dies entspricht bei einem Homebleaching mit einer Konzentration von 10 % etwa von 61,04 bis 100,66 g Bleichgel. Diese Menge entspräche also bei einem gebräuchlichen Wirkstoffwert dem 38- bis 63-fachen der normal verwendeten Menge (angenommener Durchschnittswert: 1,5g/Anwendung). Nach LI (1997) liegt zwischen der toxikologisch bedenklichen und der möglicherweise verschluckten Menge sogar ein Sicherheitsfaktor von 100 bis 239 für den Menschen vor. Die LD₅₀-Dosis von Wasserstoffperoxid beträgt nach SCCP 600 bis 1617 mg/kg (2005). Trotzdem ist es durch versehentliches Verschlucken von Wasserstoffperoxid zu in der Literatur beschriebenen Fällen akuter Toxizität gekommen (BASSAN et al., 1982; CINA et al., 1994; DE SESSO et al., 2000). Es wird hier von Personen berichtet, die versehentlich hochkonzentrierte peroxidhaltige Produkte (35% H₂O₂ oder mehr) zu sich genommen haben. In Tierversuchen wurden Magenschleimhäute von Ratten untersucht, denen zuvor große Mengen von Carbamidperoxid (>150 mg 10 % Carbamidperoxid/kg) verabreicht worden waren. Es konnten hierbei häufig Ulzerationen der Magenmukosa beobachtet werden, die jedoch nach 24 Stunden wieder abzuheilen schienen (DAHL et al., 1995). Darüber hinaus führte eine längere Belastung der Darmmukosa durch Wasserstoffperoxid bei Ratten und Mäusen zu lokalisierten Ulzerationen und in deren Folge einhergehender Abnahme der Nahrungsmittelaufnahme mit daraus resultierender Gewichtsabnahme und Veränderungen in der Blutchemie (DAHL et al., 2003).

Unter In-vitro-Bedingungen wirken Peroxide genotoxisch (LI et al., 1996; SSCP, 2005; MUNRO et al., 2006). Hinsichtlich der Genotoxizität von Peroxiden *in vivo* finden sich in der Literatur widersprüchliche Aussagen. Einige Studien schlossen Wasserstoffperoxid nicht gänzlich als Tumorpromotor aus (DA COSTA FILHO et al., 2002; DAHL et al., 2003; VOGLER, 2003; TREDWIN et al., 2006). Dagegen bezeichneten MUNRO et al. (2006) auf Wasserstoffperoxid oder Carbamidperoxid basierende Zahn-Bleichprodukte *in vivo* als genotoxisch unbedenklich, da bei sachgemäßer Anwendung ein verstärkendes Einwirken auf potenziell kanzerogene Promotorzellen in der Mundhöhle oder sogar eine Induktion von „kanzerogenen Effekten“ (insbesondere auch in

¹² LD₅₀-Wert: [dosis letalis 50%], Dosis (/Konzentration), bei der 50% der Versuchstiere sterben

Verbindung mit Teerprodukten oder Alkohol) nicht anzunehmen sei. Die Autoren räumten jedoch ein, dass Wasserstoffperoxid *in vitro* durchaus genotoxische Effekte aufweise. Nach Ergebnissen von In-vivo-Langzeitstudien mit chinesischen Streifenhamstern wirkte Wasserstoff nicht genotoxisch (LI et al., 1993).

Gesteigerte Hypersensibilitäten bei externen Bleichanwendungen sind die in der Literatur wohl am häufigsten genannten Nebeneffekte. Diese sind jedoch reversibel und vergehen einige Stunden bis Tage nach Absetzen des Bleichmittels (WEBER, 1999c). Höhere Wirkstoffkonzentrationen können häufiger Sensibilitäten verursachen als niedriger konzentrierte Bleichmittel gleichen Wirkstoffes (LEONARD et al., 1998). Als Hauptursache für die Entwicklung von Hypersensibilitäten wird das Eindringen von Wasserstoffperoxid in das Pulpakavum während des Bleichvorganges diskutiert (HAYWOOD et al., 1990; BOWLES et al., 1992). Dies kann zu Veränderungen der Enzyme im Pulpengewebe führen, wodurch es zu einer reversiblen Pulpitis kommen kann (HAYWOOD et al., 1990; SCHULTE et al., 1994; DE OLIVEIRA et al., 2003; JOINER et al., 2004a). Auch Dehydratationseffekte durch Inhaltsstoffe von einigen Bleichmitteln wurden für die Ausprägung von Hypersensibilitäten verantwortlich gemacht (FISCHER, 2003). DAHL et al. schlugen daher vor, zum Aufhellen vitaler Zähne lediglich niedrige Wirkstoffkonzentrationen von bis zu 10 % Carbamidperoxid zu verwenden (2003). Geringere Konzentrationen von Carbamidperoxid benötigen zwar länger, um Zähne zu bleichen, erreichen aber schließlich annähernd das gleiche Ergebnis wie höhere Konzentrationen und minimieren dabei das Risiko der erhöhten Zahnsensibilität (LEONARD et al., 1998).

Bezüglich der Thematik negativer Einflüsse von Peroxiden auf die Struktur von gesunden Zähnen herrscht eine uneinheitliche Datenlage. Verschiedene Autoren kamen zu dem Schluss, dass sowohl die Schmelzoberfläche als auch freiliegendes Dentin durch die Anwendung unterschiedlicher wasserstoffperoxid- oder carbamidperoxidhaltiger Bleichprodukte *in vitro* zu einer Minderung der Mikrohärtigkeit führe (PÉCORÀ et al., 1994; BASTING et al., 2001; DE FREITAS et al., 2002; BASTING et al., 2003). Durch die Verminderung der Mikrohärtigkeit der Zahnoberfläche schlossen die Autoren dieser Studien auf eine destruktive Wirkung der angewendeten Bleichmittel. SCHMIDSEDER beschrieb 1998, dass es infolge einer extremen Daueranwendung von Peroxiden zur Schädigung des Schmelzes auf Grund des „oxidativen Abbaus der Schmelzmatrix“ kommen kann. Mehrere Studien deckten mittels Rasterelektronenmikroskopie Veränderungen der Morphologie von gebleichtem Schmelz mit unterschiedlichen Graden von Porosität nach der Anwendung von verschiedenen peroxidhaltigen Bleichmitteln auf (MCGUCKIN et al., 1992; BITTER & SANDERS, 1993; SHANNON et al., 1993; BEN-AMAR et al., 1995; JOSEY et al., 1996; FLAITZ & HICKS, 1996; ZALKIND et al., 1996; BITTER, 1998; KWON et

al., 2002; TURKUN et al., 2002; HOSOYA et al., 2003; YEH et al., 2005). Auf Grund der gebräuchlichen Konzentrationen von Peroxiden in Bleichmitteln und des zu Grunde liegenden Chemismus (Redox-Reaktionen) geht man heute jedoch davon aus, dass die freigesetzten Peroxide per se nicht in der Lage sind, den mineralischen Anteil von Zahnschmelz (93-98 Gew.%) anzugreifen. Dies wird durch die Ergebnisse zahlreicher Studien belegt, die mittels Rasterelektronenmikroskopie keine signifikanten Oberflächenveränderungen von gebleichten Zähnen fanden (HAYWOOD et al., 1990; HAYWOOD et al., 1991; ERNST et al., 1996; GULTZ et al., 1999; POTOČNIK et al., 2000; RITTER et al., 2002; WHITE et al., 2002; NUCCI et al., 2004; WHITE et al., 2004; DUSCHNER et al., 2006; PRETTY et al., 2005). AL QUNAIAN (2005) schlussfolgerten aus den Ergebnissen ihrer Untersuchungen, dass gebleichter Zahnschmelz weder einer erhöhten Demineralisation noch erhöhter Kariesanfälligkeit auf Grund verminderter Oberflächenintegrität unterliege. WHITE et al. fanden 2002 nach Mikrohärtemessungen von zuvor gebleichtem Zahnschmelz keine signifikanten Veränderungen der Probenoberflächen. Überdies sind bis dato weder klinische Studien noch Fallbeschreibungen bekannt, die Hinweise auf offensichtliche Schädigungen gebleichter Zahnhartsubstanz gaben (WIEGAND et al., 2006). Als alternative Ursachen für Oberflächenveränderungen nach Anwendung von Bleichprodukten auf Peroxidbasis wurden das intensive Zähneputzen mit abrasiven Putzkörpern im Zeitraum der Bleichbehandlung, zusätzliche Inhaltsstoffe der Bleichmittel oder deren niedrige pH-Werte diskutiert (SHANNON et al., 1993; BASTING et al., 2001; RODRIGUES et al., 2001; NUCCI et al., 2004). Das in Bleichmitteln häufig verwendete Lösungsmittel Glycerin kann zum Beispiel in Verbindung mit Carbopol eine säureartige Wirkung haben (DE OLIVEIRA et al., 2003).

Nach Anwendung von thermokatalysatorisch unterstützten Präparaten im Rahmen des internen Bleichens devitaler Zähne wurden vermehrt zervikale Wurzelresorptionen und eine erhöhte Frakturgefahr beobachtet (WEBER, 1999c; DAHL et al., 2003). Daher wird von dieser Bleichmethode abgeraten und der Anwendung der Walking-bleach-Technik im Rahmen des internen Bleichens der Vorrang gegeben.

Die Anwendung von Natriumchlorit in Zahnweißsystemen kann *in vivo* zu einer erhöhten ClO_2 -Konzentration in Speichel, Atemluft und Harn führen. Die starke Desinfektionswirkung dieser Substanz beruht darauf, dass das Chlordioxid als freies Radikal durch Elektronenübertragung leicht zu einem DNA-Strangbruch führen kann. Höhere Organismen sind jedoch relativ unempfindlich gegenüber Chlordioxid. Die Toleranzschwelle für Chlordioxid liegt bei Vertebraten bei mehr als dem Zwanzigfachen dessen (4 mg/l), was üblicherweise zur Trinkwasser-

desinfektion¹³ eingesetzt wird. Eine Studie von ERLER et al. (2005) untersuchte unter anderem die Konzentration von Chlordioxid im Speichel von Probanden während und nach der Bleichbehandlung mit einem 2,51%iges Natriumchlorit enthaltenden Zahnaufhellungsprodukt. Im Laufe dieser Untersuchung wurde im Speichel der Probanden durchschnittlich eine im Vergleich zu den zulässigen Werten der Trinkwasseraufbereitung im Mittel um das Fünffache erhöhte ClO₂-Konzentration (1 mg/l Speichel) nachgewiesen. In der Intraoral-Luft war ClO₂ in einer Größenordnung von 5 µg/min nachweisbar. Unter Annahme einer 100 %igen pulmonalen Resorption und ausschließlicher Mundatmung hätten somit theoretisch kurzzeitig ClO₂-Belastungen der Atemwege in der Größenordnung des MAK-Wertes¹⁴ resultieren können. Die erhöhten Messwerte waren während der Bleichanwendung über drei Wochen reproduzierbar. Eine ClO₂-Harnausscheidung konnte nur bei vier Probanden gelegentlich gemessen werden. Als Ursache dafür wurde eine Umwandlung von Chlorit zu Chlorid im Stoffwechsel und dessen physiologische Ausscheidung angenommen. Trotz der erhöhten ClO₂-Werte folgerten die Autoren dieser Untersuchung, dass die kurzzeitige Belastung an Chlordioxid sowohl lokal wie auch systemisch als unbedenklich einzuschätzen sei.

2.5 Untersuchungen des Aufhellungsvermögens von Bleichmitteln

In der Vergangenheit wurden verschiedene Studien zur Verwendung von Bleichmitteln durchgeführt. Neben Untersuchungen möglicher Nebenwirkungen oder Effekte auf der Zahnoberfläche bei der Anwendung von Bleichmitteln stand bei den meisten Studien die Begutachtung des zahnaufhellenden Potentials im Hauptaugenmerk (GERLACH et al., 2000; MOKHLIS et al., 2000; GERLACH et al., 2001; DE FREITAS et al., 2002; AUSCHILL et al., 2002; AYAD et al., 2002; GERLACH et al., 2003; WHITE et al., 2003; SULIEMAN et al., 2006).

Unter anderem sollte in verschiedenen In-vitro- und In-vivo-Untersuchungen auch die Frage betrachtet werden, welchen Einfluss Wasserstoffperoxid beziehungsweise Carbamidperoxid in verschiedenen Konzentrationen auf die Bleichwirkung haben (LEONARD et al., 1998; NATHOO et al., 2002a; NATHOO et al., 2002b; NATHOO et al., 2003; BRUNTON et al., 2004; COLLINS et al., 2004; JOINER et al., 2004b; BRAUN et al., 2007). Zur Messung der Veränderungen der Zahnfarbe wurde hierbei meist die Vita-Farbskala verwendet. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen kamen jedoch zu unterschiedlichen Ergebnissen.

¹³ ClO₂-Grenzwert nach Trinkwasseraufbereitung: 0,2 mg/l (Europa)

¹⁴ maximale Arbeitsplatzkonzentration (MAK) von ClO₂: 0,1 ml/m³ bzw. 0,28 mg/m³

Einige Studien zeigten, dass niedrigere Konzentrationen von Wasserstoffperoxid eine geringere Aufhellung der Proben im Vergleich zur Anwendung von höheren Konzentrationen bei gleicher Anwendungsdauer hatten (GREENWALL, 2001; SULIEMAN et al., 2006). Im Rahmen einer klinischen Studie untersuchten BRAUN et al. (2007) die Aufhellungseffektivität von 10 % und 17 % Carbamidperoxid und kamen zu dem Schluss, dass höher konzentrierte Bleichmittel Zähne zwar schneller aufhellen könnten, jedoch niedriger konzentrierte Bleichmittel nach einem gewissen Zeitraum eine ähnliche Aufhellung zur Folge haben. BRUNTON et al. (2004) konnten dagegen in einer In-vivo-Untersuchung zweier Wasserstoffperoxid enthaltender Bleichmittel mit unterschiedlicher Konzentration keinen signifikanten Unterschied der Zahnaufhellung aufdecken. LEONARD et al. (1998) kamen in einer In-vitro-Studie ebenfalls zu dem Schluss, dass es bei der Anwendung von Bleichmitteln mit 5, 10 und 16 Prozent Carbamidperoxid während der Anwendungsdauer von zwei Wochen zu keinen signifikanten Unterschieden hinsichtlich der Aufhellung der Versuchszähne kam. Widersprüchlich erschien hier, dass für das Produkt mit 5 Prozent Carbamidperoxid ein höherer Messwert (4.3 tabs) als bei dem Produkt mit 10 Prozent Carbamidperoxid (4.1 tabs) beobachtet wurde, während für 16 Prozent Carbamidperoxid der höchste Messwert resultierte (4.9 tabs).

In einer klinischen Studie verglichen NATHOO et al. (2001) zwei niedrigkonzentrierte Bleichmittel zur häuslichen Anwendung. Für das Produkt mit fünf Prozent Carbamidperoxid wurde ein ΔE -Wert¹⁵ von 4,43 (\pm 1,89) gemessen. Das zehn Prozent Carbamidperoxid enthaltende Bleichmittel erzielte einen ΔE -Wert von 4,05 (\pm 1,84). Die statistische Auswertung zeigte jedoch keine signifikanten Unterschiede bei diesen Messwerten. Auch beim klinischen Vergleich zweier Zahnaufhellungsgele – zum einen mit 25 Prozent Carbamidperoxid (entspricht etwa 7,3 H₂O₂), zum anderen mit 8,7 Prozent Wasserstoffperoxid – konnten NATHOO et al. (2003) mit der visuellen Farbestimmung mit Vita-Farbskala keine signifikanten Unterschiede detektieren. ALONSO et al. verglichen 2006 die klinische Effizienz eines Bleichmittels auf Basis von 10%igem Carbamidperoxid (~2,9 % H₂O₂) mit einem Zahnaufhellungsmittel, welches neben 3,3%igem Wasserstoffperoxid einen Wirkstoff enthielt, der einer durch Bleichmittel induzierten Zahnempfindlichkeit entgegenwirken sollte. Beide Produkte waren nach Herstellerangaben zur häuslichen Anwendung deklariert und wurden in einem Zeitraum von vier Wochen jeweils für drei Stunden *in vivo* angewendet. Nach Beendigung der Messreihen fanden die Autoren weder signifikante Unterschiede des Ausmaßes der Aufhellung der untersuchten Produkte (Aufhellung um jeweils 4.8 Vita shade tabs) noch signifikante Unterschiede der Zahnempfindlichkeit.

¹⁵ ΔE -Wert = Gesamtunterschied zweier Farben

JOINER und THAKKER (2004a) fanden nach Anwendung zweier Over-the-counter-Lacke mit etwa sechs Prozent Wasserstoffperoxid *in vitro* ebenso eine signifikante Aufhellung der Proben. Die Aufhellungseffektivitäten unterschieden sich jedoch nicht signifikant voneinander. DUSCHNER et al. untersuchten 2006 zwei Bleichstreifen zur Selbstanwendung (6 und 6,5 % H₂O₂) *in vivo* und stellten fest, dass diese die Zähne der Probanden signifikant aufhellten.

In einer klinischen Studie verglichen AUSCHILL et al. (2005) die Effizienz der drei gängigen Bleichanwendungsmethoden für vitale Zähne. (Gruppe A: Over-the-counter-Wirkstoffstreifen mit 5,3 % H₂O₂, Gruppe B: Homebleaching-Produkt mit 10 % Carbamidperoxid, Gruppe C: In-office-Technik mit 35%igem H₂O₂ ohne Hitzeapplikation). Die Wirkstoffe wurden nach den jeweiligen Herstellerangaben angewendet. Um die Effizienz der Bleichmittel vergleichen zu können, wurde dabei die Zeit bestimmt, die nötig war, eine Aufhellung um sechs Farbabstufungen auf der Vita-Farbskala zu erreichen. Es konnte gezeigt werden, dass alle untersuchten Bleichmittel in der Lage waren, eine Aufhellung um die geforderten sechs Farbabstufungen zu erreichen. Die Anzahl der Anwendungen, die für dieses Ergebnis nötig waren, unterschieden sich jedoch signifikant (A: 31,85 ± 6,63 – je 30 Minuten, B: 7,15 ± 1,86 – je acht Stunden, C: 3,15 ± 0,55 – je 15 Minuten).

SHAHIDI et al. (2005) verglichen in einer klinischen Studie zwei Bleaching-Streifen mit unterschiedlichen Wasserstoffperoxidkonzentrationen (6 % und 10 % H₂O₂) desselben Herstellers hinsichtlich ihrer Aufhellungseffektivität. Beide Produkte sind als Over-the-counter-Produkte erhältlich und unterscheiden sich neben der Wirkstoffkonzentration auch in der vom Hersteller angegebenen Anwendungsdauer. Das höher konzentrierte Produkt soll eine Woche lang für jeweils 30 Minuten angewendet werden. Das niedriger konzentrierte Produkt soll in einem doppelt so langen Zeitraum, also jeweils 30 Minuten für zwei Wochen, angewendet werden. Nach einwöchiger Anwendung beider Produkte resultierten signifikante Aufhellungen der gebleichten Zähne, die sich jedoch signifikant voneinander unterschieden. Nach der zweiwöchigen Behandlungsdauer des niedriger konzentrierten Produkts unterschieden sich die gemessenen Daten der Zahnaufhellung nicht mehr. Diese Untersuchung geht mit einer Studie von SAGEL et al. (2004) konform, die unter anderem zum Ergebnis kam, höher konzentrierte „Bleaching“-Streifen würden Zähne schneller aufhellen. Ein weiteres Ergebnis jener Studie von SAGEL et al., die Aussage, dass das höher konzentrierte Produkt besser beziehungsweise effektiver bleiche, wurde jedoch von SHAHIDI et al. widerlegt.

JOINER (2006) gab als Schlüsselfaktor für die Zahnaufhellung mit Peroxiden neben der Wirkstoffkonzentration auch die Anwendungsdauer an. Ebenso kamen SULIEMAN et al. (2006) in einer In-vitro-Untersuchung von unterschiedlich konzentrierten Bleichmitteln auf

Carbamidperoxid- und Wasserstoffperoxidbasis zu dem Schluss, dass die Aufhellungseffektivität sowohl mit der Konzentration als auch mit der Einwirkzeit zusammenhänge. Der finale Farbwechsel durch den Aufhellungsprozess sei jedoch konzentrationsunabhängig und maßgeblich durch die Anwendungsdauer determiniert. Diese Untersuchung wurde sowohl visuell als auch computergestützt durchgeführt.

ZANTNER et al. (2006b) untersuchten das Aufhellungsvermögen eines „Paint-on“-Lackes zur Selbstapplikation, bei dessen Anwendung keine individuell angepasste Bleichschiene benutzt werden muss. Der Lack enthielt 8 % Carbamidperoxid und wurde in zwei Gruppen für entweder eine oder zwei Wochen jeweils zwanzig Minuten lang angewendet. Nach einem Behandlungszeitraum von zwei Wochen resultierten keine statistisch signifikanten Unterschiede für die Werte der Zahnaufhellung beider Gruppen. Neben der Bestätigung der Aufhellungseffektivität dieses Over-the-counter-Produkts stellten die Autoren daher fest, dass zur Verbesserung der Resultate eine doppelte Applikation nicht notwendig sei.

2.6 Farbbestimmung in der Zahnheilkunde

ALBERT MUNSELL (1966) teilte Farbe im Color-System in drei Dimensionen ein:

- Hue -Farbton
- Chroma -Farbsättigung
- Value -Farbhelligkeit

Hue stellt die zugrunde liegende Farbfamilie, also die Wellenlänge, wie zum Beispiel Gelb dar, Chroma die Intensität beziehungsweise Konzentration des Farbtons und Value die relative Helligkeit beziehungsweise Graustufe einer Farbe (WEBER, 1999b). Diese drei Größen kennzeichnen den Begriff der Farbvalenz, die als physiologisch-psychologische Farbwirkung einer elektromagnetischen Strahlung definiert wird (HICK, 2000). So ist das Farbsehen bei einer normal farbtüchtigen Person durch die Fähigkeit zur Wahrnehmung von etwa sieben Millionen Farbvalenzen ausgezeichnet (SCHMIDT & TEWS, 1995).

1976 wurde von der CIE (COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ÉCLAIRAGE) eine neue Metrik mit der Bezeichnung CIE-L*a*b* entwickelt, die in Folge zur Farbbestimmung von nicht selbstleuchtenden Objekten vor allem im industriellen Sektor zur Anwendung kam. L* steht hierbei für die Helligkeit (Leuchtkraft, luminance, value). Der Parameter a* determiniert den Rot- bis Grün-Wert, wohingegen der b*-Wert den Gelb- bis Blau-Wert festlegt. Negative Werte sind möglich. Während positive a*-Werte rötlich und positive b*-Werte gelblich erscheinen,

geben negative a^* -Werte grünliche und negative b^* -Werte bläuliche Farben an. Um das gesamte Farbspektrum abbilden zu können, ist eine dreidimensionale Darstellung in Form einer Kugel oder eines Würfels erforderlich (Abb. 13). Hierbei liegen alle Farben mit der gleichen Helligkeit auf einer Ebene. Die Helligkeit nimmt vom oberen Pol (Weiß) zum unteren Pol (Schwarz) ab.

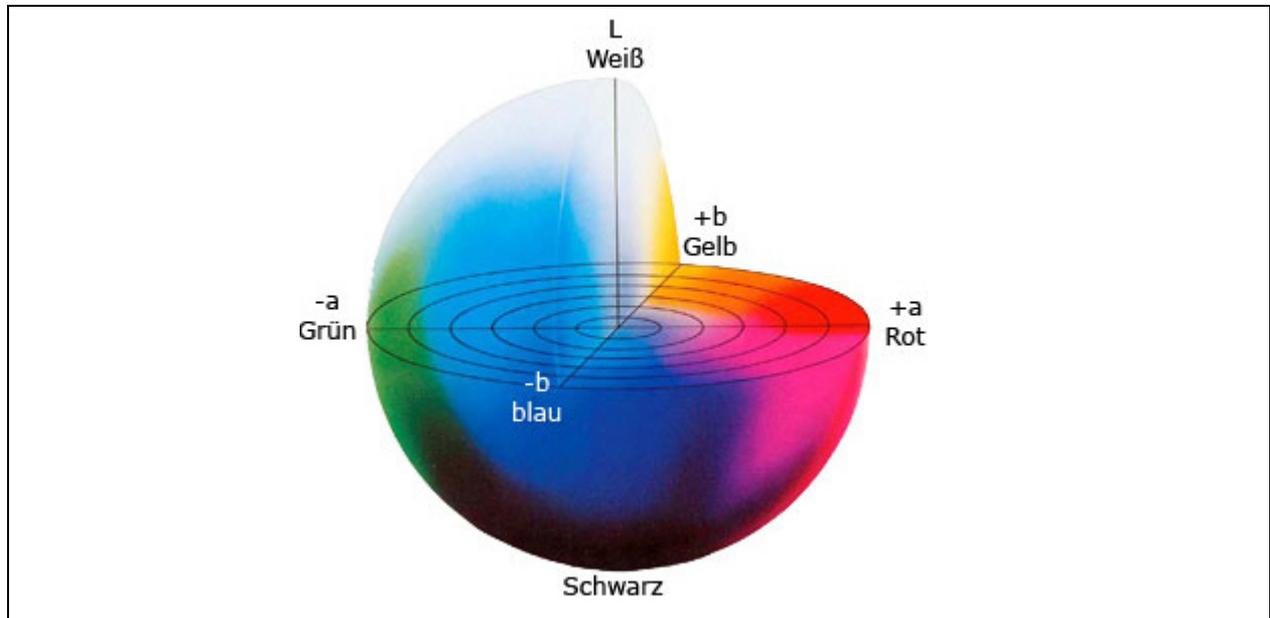


Abb. 13: CIE- $L^*a^*b^*$ Farbraum¹⁶

Eine andere Darstellung des CIE $L^*a^*b^*$ -Systems lässt sich mit Hilfe des so genannten $L^*C^*h^*$ -Farbraumes vornehmen. Dabei bleibt die Verteilung der Farben des $L^*a^*b^*$ -Farbenraums unverändert, lediglich die Berechnung des Farbortes im Farbenraum erfolgt auf unterschiedliche Weise. Bei dem $L^*a^*b^*$ -System ist ein Farbort mit den Distanzen auf den Koordinaten L , a und b definiert. Bei der $L^*C^*h^*$ -Metrik ist ein Farbort mit der Distanz auf der Koordinate L (Farbhelligkeit, value = Höhe des Farborts bezüglich die L -Koordinate), mit dem Maß C (Farbsättigung, Chroma = Abstand von der L -Koordinate zum Farbpunkt) und dem Winkel h° (Farbton, hue, Bunttonwinkel = Winkel von der Achse $+a$ zum Farbort) definiert. Der Farbenraum $L^*C^*h^*$ ist mit dem Farbenraum $L^*a^*b^*$ bezüglich Farbenverteilung identisch. Der Unterschied besteht allein darin, dass anstelle der kartesischen Koordinaten a^* und b^* die Angabe des Farbortes in Polarkoordinaten (Abb. 14 a,b) vorgenommen wird. Eine Umrechnung zwischen $L^*a^*b^*$ -Werten und $L^*C^*h^*$ -Werten ist daher mit Hilfe der Gleichungen 6, 7 und 8 möglich (BALTZER et al., 2004b). Bei der Bestimmung der Zahnfarben steht die Beurteilung des Zusammenspiels der Größen Zahnhelligkeit (L^*), Farbintensität (C^*) und Farbverschiebung (h°) im Vordergrund (Abb. 14b). Für den Praktiker stellt die Farbformulierung mit $L^*C^*h^*$ -Parametern eine Vereinfachung

¹⁶ Abbildung entnommen aus: www.wobogt.de/adobe/CIE-lab-Farbmodell.php

fachung im Vergleich zu den $L^*a^*b^*$ -Werten dar, da die $L^*C^*h^*$ -Werte direkt auf die interessierenden Farbcharakteristika Helligkeit (L), Chroma (C) und Farbton (h) Bezug nehmen, welche schon MUNSSELL 1966 zur Farbbestimmung beschrieb.

$$L(\text{value}) = L \quad \text{Gleichung 6}$$

$$C^*_{ab} (\text{chroma}) = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad \text{Gleichung 7}$$

$$h^{\circ}_{ab} (\text{hue}) = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right) = \frac{b^*}{\sqrt{a^{*2} + b^{*2}}} \quad \text{Gleichung 8}$$

Der Chroma-Wert C wird direkt mit der Größe C ausgedrückt und muss nicht über die oben erwähnte Formel errechnet werden. Auch der Hue-Wert, welcher der Verschiebung von Rot (+a) in Richtung Gelb (+b) entspricht, wird mit der Winkelgröße h° einfacher ausgedrückt. In der Abbildung 14 ist eine grafische Gegenüberstellung der unterschiedlichen Berechnungen der Farbräume $L^*a^*b^*$ und $L^*C^*h^*$ dargestellt. Die Farbverteilung innerhalb der Farbräume ist identisch. Lediglich die Lokalisation der Farbpunkte wird unterschiedlich berechnet.

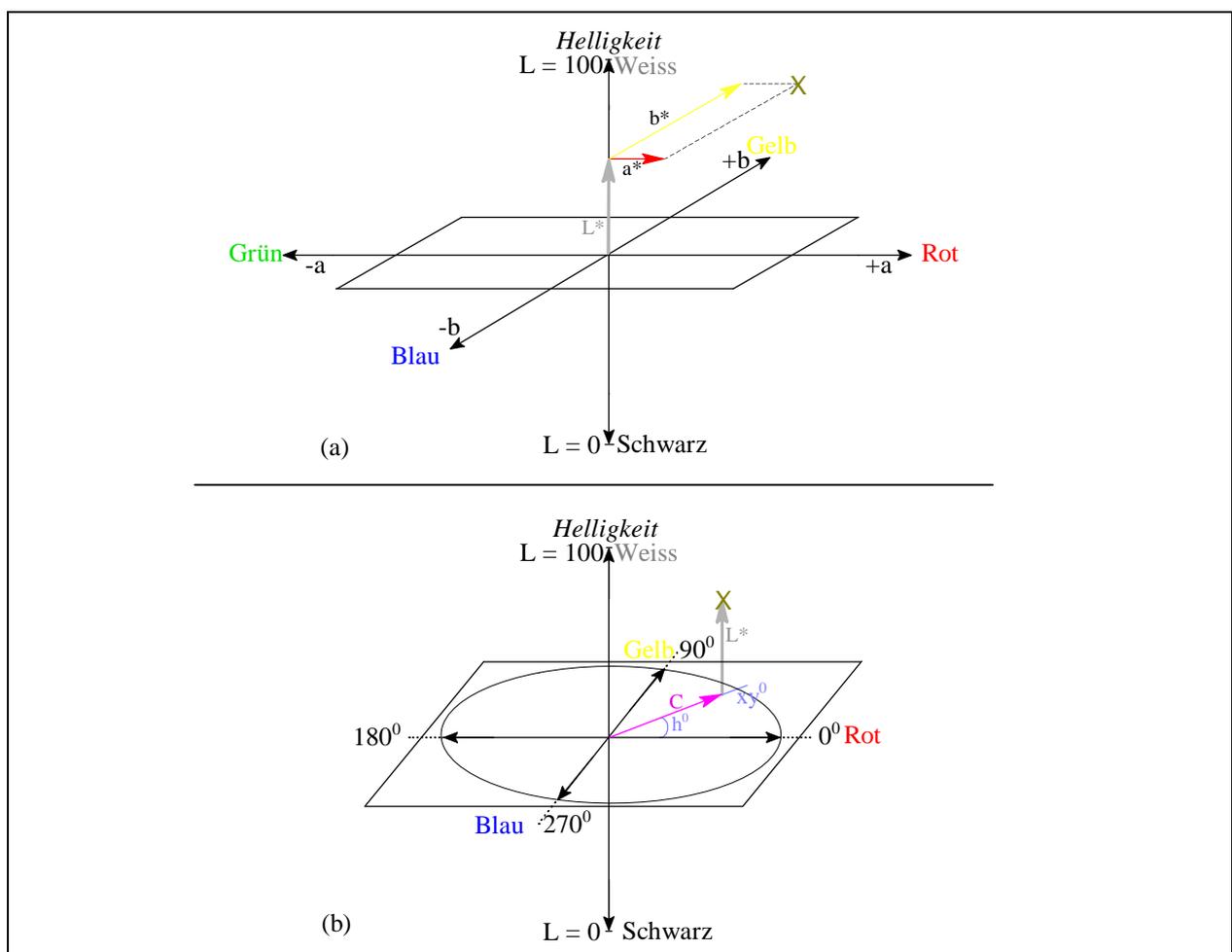


Abb. 14: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Berechnungen für den Farbwert X mit den Farbräumen $L^*a^*b^*$ (a) und $L^*C^*h^*$ (b). Die Farbverteilung ist identisch (modifiziert nach BALTZER et al., 2004)

Als Delta-E (ΔE) wird der Gesamtunterschied zweier Farben beziehungsweise die Farbdistanz zweier Punkte im $L^*a^*b^*$ -Farbenraum bezeichnet. Eine Farbtoleranz, die kleiner als $\Delta E 2$ ist, wird vom menschlichen Auge nicht als Unterschied erkannt. ΔE -Werte zwischen 2 und 4 werden ebenso als gleich erkannt, wenn hierbei der ΔL -Wert unter 2 liegt (SpectroShade™ User manual, 2002). ΔE gibt jedoch nicht an, ob eine Farbe heller oder dunkler als eine Vergleichsfarbe ist. ΔE gibt lediglich an, wie groß der empfundene Farbunterschied absolut ist. Die Erkenntnis, in welche Richtung die Farbe abweicht, kann nur durch die Beurteilung der drei Parameter L^* , a^* und b^* , aus welchen sich ΔE errechnet, gewonnen werden. Der Wert für ΔE wird in Anlehnung an den Satz des Pythagoras im dreidimensionalen Raum berechnet (Gl. 9).

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}} \quad \text{Gleichung 9}$$

(Wobei $\Delta L^* = L^*_1 - L^*_2$, $\Delta a^* = a^*_1 - a^*_2$ und $\Delta b^* = b^*_1 - b^*_2$ ist.)

ΔE_{LC} ist das Maß des Unterschiedes zweier Farben betreffend die Helligkeit (L) und die Farbintensität (C). In der Zahntechnik bewährt sich die Beurteilung dieses Maßes, da beim Farbgleich zweier Zähne die Gelb-Rot-Verschiebung weit weniger ins Gewicht fällt als primär die Helligkeit und sekundär die Farbintensität. ΔE_{LC} ist wie ΔE ein absoluter Wert und zeigt dem Praktiker nicht, in welche Richtung der Farbunterschied abweicht. Soll beurteilt werden, in welche Richtung der Farbunterschied abweicht, muss dies durch die Helligkeitsabweichung ΔL und die Chromaabweichung ΔC einzeln berechnet werden (BALTZER et al., 2004b).

2.6.1 Farbbestimmung mit Farbring

Die Bestimmung der Farbe aufgrund des Vergleiches des Patientenzahnes mit einer standardisierten Farbskala („Farbring“) stellt die am häufigsten angewendete Methode zur Farbbestimmung während der Herstellung von indirekten Restaurationen in der Zahnheilkunde dar (VAN DER BURGT et al., 1990). Die Farbmuster der gebräuchlichsten drei Systeme sind nach Farbtongruppen (Hue) geordnet, die beim Biodent-Farbring¹⁷ durch fünf Symbole, beim Chromascop-Farbring¹⁸ in fünf Blöcken und beim Vita-Farbring¹⁹ nach den Buchstaben A bis D gekennzeichnet sind. Die industriell gefertigten Zahnfarbringe liefern auf diese Weise einen Grundfarbwert, der zur Erlangung optimaler Ergebnisse, zum Beispiel bei Herstellung von Restaurationen im Frontzahnbereich, noch zusätzlich individualisiert werden muss. Diese traditionellen optischen Farbmessungsverfahren mit normierten Skalen können jedoch einen

¹⁷ Biodent-Farbring, De Trey-Dentsply, Dreieich, D

¹⁸ Chromascop-Farbring, Ivoclar Vivadent AG, Schaan, FL

¹⁹ Vita Classic-Farbring, Vita-Zahnfabrik, Bad Säckingen, D

gewissen Grad von Farbbestimmungsfehlern aufgrund von Hintergrundreflexionen, Alter, Ermüdungen und Subjektivität des Behandlers, Lichtqualität, Lichtquantität und Erfahrung des menschlichen Auges mit sich bringen (WYSZECKI & STILES, 1982; HUNTER & HAROLD, 1987; BERNS, 2000).

Des Weiteren verhindern physiologische Variablen wie zum Beispiel Farberkennungsschwächen, das exakte Bestimmen der Zahnfarbe mit Farbringen. Diese sind als potenzielle Fehlerquellen nicht zu unterschätzen, da etwa 8 Prozent der Männer und 0,4 Prozent der Frauen Mitteleuropas unter solchen Störungen des Farbsinnes leiden. Die meisten Farberkennungsschwächen betreffen das Rot-Spektrum (Protanomalie, Protanopie) und das Grün-Spektrum (Deuteranomalie, Deuteranopie) (PAUL et al., 2003). Der überwiegende Männeranteil erklärt sich hierbei durch den X-chromosomal-rezessiven Erbgang (HICK, 2000). Eine weitere Fehlerquelle beim Messen mit Farbringen können die Farbringe selbst darstellen. So können praxisübliche Farbschlüssel variieren beziehungsweise von Charge zu Charge gewisse Farbabweichungen aufgrund schwer kontrollierbarer Bedingungen während der Herstellung enthalten (PAUL et al., 2003). BROWNING (2003) bezeichnete die visuelle Farbmessung als subjektiv, da Menschen Farben unterschiedlich wahrnehmen. Weiter kam BROWNING zu dem Schluss, dass aus diesem Grund die visuelle Farbmessung mit Farbring als das kritische Element jeder Untersuchung zum Thema Aufhellungseffektivität von Bleichmitteln anzusehen sei. Ohne das Hintergrundwissen dieser Limitation sei diese Art von Untersuchungen wenig aussagekräftig und sogar irreführend (BROWNING, 2003).

Trotz all dieser Schwierigkeiten in Anwendung und Reproduzierbarkeit der mit den Farbringen zu erhaltenden Ergebnissen stellte diese Art der Farbbestimmung lange Zeit den einzigen Standard in der Zahnmedizin dar. Hierbei stellte die Anwendung des Vita Classic-Farbringes, welcher ursprünglich zur Herstellung prothetischen Zahnersatzes entwickelt wurde, bis dato auch die Standardmethode zur Farbbestimmung an Zahnoberflächen dar (ZANTNER et al., 2006b). Jedoch sind für dieses System, in Bezug auf die Farbbestimmung gebleichter Zähne, einige Unzulänglichkeiten festzustellen. So wird die Spannweite der enthaltenen Farben von einigen Autoren als nicht ausreichend zur Farbbestimmung sowohl von natürlichen Zahnfarben als auch von gebleichten Zähnen beschrieben (GOODKIND et al., 1987; SCHWABACHER et al., 1990).

Die Tabelle 3 zeigt die gebräuchliche Sortierung des Vita Classic-Farbrings nach Helligkeit. Die Sortierung dieser Farbskala erfolgte ursprünglich visuell (GREENWALL, 2001). Nach Baltzer et al. (2004a) zeichnet sich der Vita Classic-Farbring durch eine sehr ungleichmäßige Verteilung der Muster im Farbenraum aus. Darüberhinaus stellt der Vita Classic-Farbring keine metrische Skala mit gleichgroßen Abständen dar. Werden die einzelnen Farben nach Helligkeit (L)

geordnet, so sind die Abstände der Farben (ΔL) keineswegs äquidistant. Gleiches gilt für die Farbdifferenzen (ΔE). In einer von STOLL et al. (2008) durchgeführten Untersuchung wurden Farbdifferenzen und Helligkeitsunterschiede der Vita Classic-Farbmuster der gebräuchlichen Rangfolge nach photometrisch gemessen. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die ΔE -Werte als auch die ΔL -Werte zwischen zwei benachbarten Farben erheblich variieren. Die Autoren führten als mögliche Ursache für dieses Problem die visuelle Sortierung des Farbringens durch den Hersteller an. Bei der Beurteilung der visuellen Helligkeit spielt jedoch der individuelle Farbeindruck des Betrachters eine zusätzliche Rolle, die messtechnisch nicht zu erfassen ist (STOLL et al., 2008).

Tab. 3: Vita Classic-Farbskala²⁰: aufgereiht von der hellsten zur dunkelsten Farbstufe (modifiziert nach GREENWALL, 2001; ΔL -Werte nach STOLL et al., 2008)

Farbe	B1	A1	B2	D2	A2	C1	C2	D4	A3	D3	B3	A3,5	B4	C3	A4	C4
Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
ΔL	-0,6	2,8	7,1	-9,0	5,3	2,8	0,8	3,9	4,5	-2,6	2,1	-1,4	4,7	1,6	4,1	-
	hell  dunkel															

Im Gegensatz zum Vita Classic-Farbring mit 16 Farbabstufungen verfügt die Chromascop Complete-Farbskala über eine Spannweite von 24 Farben (Tab. 3, 4). Diese Skala umfasst ein größeres Spektrum für hellere Farben, welches bei der Beobachtung von klinischen Zahnfarbveränderungen zur differenzierteren Wertmessung von Vorteil ist. So entsprechen die hellsten vier Farbwerte der Chromascop Complete-Farbskala (010, 020, 030, 040), die als „Bleach“ in einem gesonderten Block zusammengefasst sind (Abbildung 26, S. 59), nur einem Farbwert der Vita Classic-Skala (B1).

In einer dieser Studie vorausgegangen Untersuchung wurde daher von ZANTNER et al. (2006b) erstmalig zur klinischen Untersuchung von Zahnfarbveränderungen die Chromascop Complete-Farbskala verwendet. Um die durchgeführten Farbmessungen mit dieser Farbskala auswerten zu können, wurden im Rahmen der statistischen Analyse die 24 Chromascop Complete-Farbwerte mit einem Spektralphotometer (SpectroShade²¹) gemessen und photometrisch nach Helligkeit geordnet. Hierbei wurde für alle 24 Farben der Abstand von der dunkelsten Farbe gemessen (ΔL) und ordinal von hell nach dunkel geordnet (Tab. 4). Die auf diese Art gefundene Einteilung der Chromascop Complete-Farbskala wurde dann mit der üblicherweise gebräuchlichen Einteilung der Vita-Farbskala (GREENWALL, 2001) verglichen, indem der kleinste ΔE Wert jeder Chromascop Complete-Farbe mit der Vita Classic-Farbskala berechnet wurde. Die Unterschiede

²⁰ Vita Classic-Farbskala, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, D

²¹ SpectroShade™, Medical High Technologies MHT™ Int., Niederhasli, CH

der Helligkeitswerte (ΔL) stellen sich bei dieser Einteilung der Chromascope Complete-Farben im Vergleich zu den von STOLL et al. (2008) gemessenen ΔL -Werten als geringer und homogener dar. Die Abstände der Helligkeitswerte zwischen den einzelnen Farbmustern erreichen hierbei lediglich ΔL -Werte von maximal 2,3. Im Vergleich dazu wurden für den Vita Classic-Farbring von STOLL et al. (2008) ΔL -Werte bis zu 9,0 gefunden.

Tab. 4: Chromascope Complete²²-Farbabstufungen (CC) aufgereiht nach photometrisch gemessenen ΔL -Werten (Abstand der jeweiligen Farbe zur dunkelsten Farbe 4D). Die korrespondierenden Vita Classic-Farbwerte in Bezug auf den geringsten ΔE -Wert zur CCS werden in der Spalte VC wiedergegeben. Vita Classic-Farbwerte, die nicht übereinstimmen (VNÜ), sind in der untersten Spalte wiedergegeben. (nach ZANTNER et al., 2006b)

CC	010	020	030	040	01	1A	2B	1C	1D	2A	1E	2C	3A	6B	4A	2E	4B	5B	6C	6D	3E	3C	4C	4D
ΔL	17,6	17,2	16	14,1	14,1	12,2	11,2	11	10,8	10,3	9	7,8	7,6	7,1	6,9	6,3	6	5,2	4,4	4,2	2,6	2,5	2,3	0
Rang	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
ΔE	8,5	5,8	3,4	1	1,3	1,6	2,7	1,8	3,3	2,1	2,5	4,4	3,9	0,9	1	3,6	1,2	3	2,1	1,2	2,3	0,9	0,8	3,2
VC	B1				A1	A2				C1	A3			D3	A3,5	C3			A4	C4				
VNÜ					B2	D2					C2	D4				B3		B4						
	hell dunkel																							

2.6.2 Digitale Farbmessung

Mit der Einführung von digitalen Farbmessverfahren in die Zahnmedizin sollten die zuvor beschriebenen Schwierigkeiten der visuellen Farbestimmung minimiert werden. Diese Verfahren, welche schon lange in der optischen Physik Verwendung finden, sollen zudem standardisierte und reproduzierbare Daten hervorbringen und zu einer größeren Genauigkeit bei der Farbmessung führen. Die Geräte zur digitalen Farbmessung lassen sich hinsichtlich des Messprinzips in Kolorimeter und Spektralphotometer unterscheiden. Neben dem unterschiedlichen Messprinzip unterscheiden sich die Geräte auch nach der Art der Aufnahme­fläche. So werden bei der Flächenmessung Aufnahmen des gesamten Zahnes und im Rahmen der Punktmessung lediglich bestimmte Bereiche der Zahnoberfläche gemessen.

Basierend auf dem CIE $L^*a^*b^*$ -Koordinatensystem von 1976 erlauben Daten, die aus computerunterstützter Kolorimetrie oder Spektrophotometrie resultieren, einen mathematischen Vergleich (SEGHI et al., 1989). Bei den CIE $L^*a^*b^*$ -Parametern beziehungsweise Koordinatenachsen handelt es sich um den Helligkeitswert (L, lightness; entspricht value der Einteilung nach MUNSELL) und um die Farbwerte (chroma) auf der Rot-Grün-Achse (a) und auf der Gelb-Blau-Achse (b). Die Messung von exakten Koordinaten ermöglicht einen objektiven mathematischen

²² Chromascope Complete-Farbskala, Ivoclar Vivadent GmbH, Ellwangen, D

Vergleich zwischen Zahnfarben unter Angabe des Farbabstandes in ΔE (PAUL et al., 2003). Kolorimeter und vor allem Spektralphotometer erlauben des Weiteren eine bessere Kontrolle der äußeren Lichtbedingungen im Vergleich zur Farbringmessung. Die Qualität kommerziell erhältlicher Kolorimeter beziehungsweise Spektralphotometer lässt sich für den Laien einfach dadurch abschätzen, dass ein solches Gerät die Möglichkeit einer Eichmessung bieten sollte. Ferner sollte der gerätebedingte Gesamt-Messfehler (ausgedrückt in ΔE -Einheiten) angegeben sein, was ein quantitatives Messverfahren voraussetzt.

2.6.3 Kolorimetrie

Auf Basis der Kolorimetrie arbeitende Geräte sind Dreibereichs-Farbmessgeräte, die mit Farbfiltern arbeiten. Kolorimeter nutzen bei der Farberfassung prinzipiell ein Farbfiltersystem des Typs Rot-Grün-Blau (R-G-B), um die CIE- $L^*a^*b^*$ -Koordinaten direkt zu erfassen. Grundsätzlich ähnelt dieser Vorgang der physiologischen Farberfassung durch die zapfenförmigen Zellen des menschlichen Auges im Bereich der Retina. Eine identische Farberfassung der Elektronik kommt jedoch nur zustande, wenn die Absorptions-Maxima der eingesetzten Farbfilter exakt denjenigen der retinellen Zapfenzellen entsprechen. Dies bedingt einen hohen technischen Aufwand bei der Herstellung entsprechender Farbfilter (BALTZER et al., 2004a). Der Farbabgleich stellt die im Vergleich zum Referenzzahn nächst liegende additive Mischung der Farben Rot, Grün und Blau dar und ist in den drei Werten R, G und B, bekannt als Tristimulus (tristimulus values), festgehalten. Für jede Farbwahrnehmung ist ein zugehöriger RGB-Wert definiert. Dieser wird von kolorimetrisch arbeitenden Farbmessgeräten ermittelt, sodass für jede Farbwahrnehmung ein spezifischer RGB-Wert existiert. Dieser Wert wird mit dem Code des Musters im ausgewählten Farbenschlüssel ausgedrückt. Die korrekte Feineinstellung der drei Filter stellt einen technisch diffizilen Vorgang dar. Geringste Fehleinstellungen führen zu Abweichungen der Messresultate. BALTZER et al. (2004a) bezeichneten die Resultate von Dreibereich-Farbmessgeräten gegenüber Spektralphotometern als „tendenziell weniger verlässlich“. Die Zuverlässigkeit des Systems ist zudem sowohl von der Konstanz als auch von der Art der Lichtquelle abhängig und nimmt so Einfluss auf die Messdaten (KUNZELMANN, 2004). Zudem besteht das Phänomen der Metamerie, das ebenso von der Lichtquelle beeinflusst wird. Metamere besitzen identische Tristimulus-Werte, jedoch resultieren sie aus einer unterschiedlichen spektralen Strahlungsverteilung (BALTZER et al., 2004a).

2.6.4 Spektralphotometrie

Spektralphotometer messen die Intensität der Reflexionsanteile der für das menschliche Auge sichtbaren Wellenlänge einer Farbe (400 bis 700 nm) in Abschnitten von 20 Nanometern. Dabei wird Licht auf den Zahn gestrahlt und das zurückgeworfene Licht (Remission) durch ein Beugungsgitter in seine spektralen Komponenten zerlegt und mit dem ausgesendeten Licht verglichen. Eine Remission von 100 Prozent des gesamten Spektrums wird vom menschlichen Auge als Weiß empfunden. Die Remission ist Summe von Absorption und Reflexion beziehungsweise Transmission. Die Transmission ist in der Physik eine Größe für die Durchlässigkeit eines Mediums für Wellen (Lichtwellen). Bei der Absorption wird auf eine Oberfläche einfallendes Licht in eine andere Energieform (z. B. in Wärme) umgewandelt und somit in der Remission verändert. Jeder Farbwahrnehmung ist eine charakteristische Remission zugeordnet (BALTZER et al., 2004a). Bei jeder Messung der Spektralphotometrie formiert sich aus sämtlichen Remissionswerten eine Remissionskurve über den gesamten Wellenbereich des sichtbaren Lichts. Diese Daten werden nun in numerische Werte umgerechnet. Das Licht wird also in seine spektralen Komponenten zerlegt und anschließend analysiert. Die Geräte errechnen die Farbenwerte (Position im Farbenraum) und geben auf deren Grundlage den Code des farbähnlichsten Musterzahnes im angewählten Farbenschlüssel an. Je nach Gerätetyp können zusätzlich die Farbenwerte als CIE-Koordinaten errechnet und als $L^*a^*b^*$ -Werte oder als $L^*C^*h^*$ -Werte abgerufen werden.

Im Gegensatz zu Kolorimetern kommen Spektralphotometer ohne aufwendige Farbfilter mit den retinellen Zapfen entsprechenden Absorptionsmaxima aus. So kann mit relativ einfachem technischen Aufwand sehr exakt gemessen werden. Aus diesem Grund werden in der optischen Physik primär Spektralphotometer als Referenzgeräte für die Farbmessung eingesetzt (PAUL, 2003). Ferner arbeiten Spektralphotometer unabhängig von der Lichtquelle (KUNZELMANN, 2004). Mit dem Spektralphotometer SpectroShade der Firma MHT²³, das in dieser Studie zur Anwendung kam, war eine digitale Farbbestimmung auf diese Art möglich. Die Tabelle 5 gibt eine Übersicht einiger kommerziell erhältlicher Farbmessgeräte und deren Messtechnik, unterteilt in Flächenmessgeräte und Punktmessgeräte.

²³SpectroShade™, Medical High Technologies MHT™ Int., Mandrachstrasse 50, 8155 Niederhasli, CH

Tab. 5: Übersicht einiger kommerziell erhältlicher Farbmessgeräte

	Hersteller	Mess-Technik	Eichmessung	Website
Flächen-Messgeräte				
SpectroShade	MHT Optic Research AG, Niederhasli, CH	S	ja	http://mht.ch
ShadeScan	Cynovad, Montréal, Canada	K	ja	http://cynovad.com
ShadeVision	X-Rite Inc., Grandville, USA	K	ja	http://shadevision.com
Punkt-Messgeräte				
ShadeEye-NNC	Shofu Dental Inc., San Marcos, USA	K	ja	http://shofu.com
Vita EasyShade	Vita Vident, Brea, USA	S	ja	http://vident.com
Digital Shade Guide DSG4 plus	A. Rieth, Schorndorf, D	S	ja	http://shadevision.com
Pikko	MHT Optic Research AG, Niederhasli, CH	S	ja	http://mht.ch
PR-650 SpectraScan	Photo Research Inc., Chatsworth, USA	S	ja	http://photoresearch.com

S= spektrophotometrisch, K= kolorimetrisch

2.7 Knoop-Mikrohärte

Die Knoop-Härteprüfung stellt ein Eindringhärteprüfverfahren dar (GEORG, 1952). Als Eindringkörper dient eine unsymmetrische Diamantpyramide, deren Diagonale ein Verhältnis von sieben zu eins aufweist. Der Flächenöffnungswinkel beträgt dabei 130° in die eine und 172° in die andere Richtung. Als Härtewert gilt das Verhältnis der Prüfkraft zur Oberfläche des Eindrucks (HOFFMANN-AXTHELM, 1995). Mit größerem Eindruck auf der Oberfläche, also geringerer Kraft, die dem Eindringkörper entgegenwirkt, wird also ein geringerer Härtewert gefunden. Der resultierende Härtewert wird aus Umrechnungstabellen²⁴ entnommen und wird in „Knoop-hardness numbers“ (KHN) angegeben²⁵. Die Härte von Schmelz variiert im Durchschnitt von 250 KHN an der Schmelz-Dentin-Grenze und 390 KHN an der Schmelzoberfläche. CRAIG und PEYTON (1958) beschrieben die Mikrohärteuntersuchung von gesundem Schmelz und Dentin. In dieser Untersuchung wurde für die Knoop-Mikrohärte von menschlichem Schmelz ein

²⁴ z. B.: Tabellen zur Bestimmung der Knoop-Härte mit dem Klein-Härteprüfer Durimed. E. Leitz GmbH, Wetzlar(E.L.W.), D

²⁵ Anleitung & Regeln für das Arbeiten mit dem Klein-Härteprüfer Durimed. E.Leitz GmbH, Wetzlar(E.L.W.), D

Mittelwert von 343 KHN mit einer Standardabweichung von ± 23 für alle Schmelzbereiche gefunden. Weiter wird hier erörtert, dass, obwohl die Eindrücke extrem klein sind, diese auf der Oberfläche der Mikrostruktur von Zahnschmelz Makroeindrücke repräsentieren. Messungen der Mikrohärtigkeit von Zahnoberflächen sind generell hervorragend geeignet, um Änderungen der mineralischen Zusammensetzung sowohl auf den Oberflächen als auch in tieferen Bereichen von Schmelz und Dentin zu bestimmen (WHITE und FEATHERSTONE, 1992). Mineralverluste können bereits weit bevor sie klinische Relevanz erlangen nachgewiesen werden.

2.7.1 Untersuchungen der Mikrohärtigkeit nach Bleichbehandlung

In vergangenen Untersuchungen zu verschiedenen Bleichmaterialien wurden zur Mikrohärtigkeitsmessung Knoop-Mikrohärtigkeitsprüfungen durchgeführt (BASTING et al., 2001; RODRIGUES et al., 2001; ARAUJO et al., 2003; DE OLIVEIRA et al., 2003; ATTIN et al., 2005; LEONARD et al., 2005). Je nach verwendetem Bleichprodukt beziehungsweise Bleichwirkstoff oder Konzentration des Wirkstoffes kamen Studien zu dieser Thematik zu unterschiedlichen Ergebnissen. So kamen verschiedene Arbeiten zu dem Schluss, dass die Schmelzoberfläche durch die Anwendung verschiedener Bleichprodukte auf Wasserstoffperoxidbasis mit 6 Prozent oder Bleichmitteln mit Carbamidperoxidgehalt von 10 Prozent bis 15 Prozent *in vitro* eine Minderung der Mikrohärtigkeit erfahre (BASTING et al., 2001; DE FREITAS et al., 2002; BASTING et al., 2003). Andere In-vitro-Studien zeigten, dass es nach Anwendung von verschiedenen Bleichprodukten auf Wasserstoffperoxidbasis mit 5,9 Prozent oder mit Carbamidperoxidgehalt von 10 Prozent zu keiner signifikanten Abnahme der Mikrohärtigkeit kam (POTOCNIK et al., 2000; ARAUJO et al., 2003; WHITE et al., 2003; JOINER et al., 2004b; ATTIN et al., 2005).

RODRIGUES et al. (2001) beobachteten Änderungen der Knoop-Mikrohärtigkeit von Schmelzoberflächen in Folge der Anwendung zweier jeweils 10 Prozent Carbamidperoxid enthaltender Bleichmittel. Eines der beiden Produkte verursachte eine signifikante Härteminderung, wohingegen das zweite Bleichmittel kurzzeitig sogar zum Anstieg der Härte führte. RODRIGUES et al. vermuteten, dass die Veränderungen der Knoop-Mikrohärtigkeit durch die Zusammensetzung und den pH-Wert des angewendeten Bleichprodukts bedingt seien. Diese Vermutung geht mit den Ergebnissen einer Studie von JOINER et al. (2004) konform. In dieser In-vitro-Untersuchung wurde gezeigt, dass ein Phosphorsäure enthaltendes Erfrischungsgetränk (niedriger pH-Wert) im Gegensatz zu einem Bleichmittel (6 % H_2O_2 mit annähernd neutralem pH-Wert) Verringerungen

der Knoop-Mikrohärte von Zahnschmelz und Dentin verursachte. Schon 1993 bemerkten SHANNON et al. bei der Auswertung von Rasterelektronenmikroskopaufnahmen von zuvor gebleichten Schmelzproben, dass mit ansteigender Azidität des Bleichprodukts Veränderungen auf der behandelten Schmelzstruktur öfter zu beobachten seien. BASTING et al. zeigten 2003, dass die Knoop-Mikrohärte von Versuchszähnen, welche *in vitro* mit 10 und 16 Prozent Carbamidperoxid enthaltenen Produkten behandelt wurden, signifikant verringert war. Die Mikrohärte stieg jedoch nach einer zweiwöchigen Lagerung in künstlichen Speichel wieder an, wobei die Baseline-Werte jedoch nicht erreicht wurden.

NUCCI et al. (2004) kamen in einer In-vitro-Untersuchung zu dem Ergebnis, dass sich die Knoop-Mikrohärte von Probezähnen nach Anwendung von Bleichstreifen auf Basis von Wasserstoffperoxid (6 % H_2O_2) oder eines auf Carbamidperoxid basierenden Bleichmittels (10%ig) nicht signifikant veränderten. Darüber hinaus entdeckten NUCCI et al. den Effekt, dass die Mikrohärte von Probezähnen, die mit einer kariogenen Lösung in Kontakt gebracht wurden, durch die Anwendung der Bleichprodukte weniger stark abzufallen schien. DE OLIVEIRA et al. (2003) fanden bei einem 10 Prozent Carbamidperoxid enthaltenden Produkt, das zusätzlich mit einem desensibilisierenden Wirkstoff angewendet wurde, sogar einen signifikanten Anstieg der Knoop-Mikrohärte. LEONHARD et al. (2005) untersuchten die Knoop-Mikrohärte von Zahnschmelz, der in einem Zeitraum von zwei Wochen mit zwei niedrig konzentrierten frei erhältlichen „Paint-on“-Lacken (jeweils etwa 6 % H_2O_2) behandelt worden war. Die Ergebnisse dieser Härtemessungen verglichen sie mit Mikrohärtewerten, die aus der Anwendung eines Homebleaching-Produkts resultierten, welches ebenfalls über den Behandlungszeitraum von zwei Wochen angewendet worden war. Das Homebleaching-Produkt, das mit individuellen Schiene angewendet wurde, führte zu keinem signifikanten Unterschied der Mikrohärte in Bezug zur Kontrollgruppe (Leitungswasser). Jedoch stellten LEONHARD et al. fest, dass sich die Knoop-Mikrohärtewerte der Schmelzproben, die mit den „Paint-on“-Lacken behandelt wurden, bereits nach einer Anwendungsdauer von sieben Tagen signifikant verringert hatten. Im Gegensatz dazu fanden DUSCHNER et al. (2006) bei Verwendung von Bleichstreifen mit ähnlicher Wasserstoffperoxidkonzentration (6 und 6,5 % H_2O_2) nach einer Bleichdauer von insgesamt 28 Stunden *in vitro* keine signifikanten Veränderungen der Oberflächenmikrohärte der untersuchten Proben.

2.8 Künstliche Speichellösungen

In der Literatur beschrieben verschiedene Autoren in In-vitro-Studien zur Thematik des Zahnbleichens die Verwendung von natürlichem menschlichen Speichel (ARI et al., 2002; SPALDING et al., 2003; WHITE et al., 2003; DUSCHNER et al., 2006). Demgegenüber lassen sich ebenso In-vitro-Studien ähnlicher Thematik finden, in denen künstlicher Speichel im Versuchsaufbau verwendet wurde (JOSEY et al., 1996; RODRIGUES et al., 2001; BASTING et al., 2003; DE OLIVEIRA, 2003; ATTIN et al., 2004). Sowohl bei natürlicher Genese als auch bei künstlicher Herstellung sollte bei der Verwendung solcher Lösungen der Sachverhalt berücksichtigt werden, dass Speichel die Funktion eines vielseitigen Schutzsystems hat, da Speichel eine wichtige Rolle bei der Remineralisation von Zahnschmelz spielt (ATTIN et al., 2000). Aus diesem Grund wurde in verschiedenen In-vitro-Studien Speichel als Remineralisationslösung genutzt, um Schmelzläsionen unterschiedlicher Genese wieder zu härten (MEYER-LUECKEL et al., 2004). *In vivo* ist die Zusammensetzung von menschlichem Speichel je nach Alter, Geschlecht und Zustand des Individuums starken Schwankungen unterworfen. Unter anderem hängt diese Zusammensetzung sowohl von der Sekretionsrate als auch von der Dauer, dem Grad und der Art der Stimulation ab. Künstliche Speichellösungen können dagegen genormt mit exakt der gleichen Menge an Inhaltsstoffen hergestellt werden (BUSKES et al., 1985).

3. UNTERSUCHUNGSZIEL

Ziel dieser Untersuchung war es,

1. den Einfluss der Wirkstoffart und der jeweiligen Wirkstoffkonzentration von fünf Zahnaufhellungsprodukten zur häuslichen Selbstanwendung hinsichtlich der Aufhellungseffektivität *in vitro* zu vergleichen,
2. den Einfluss der Einwirkzeit eines niedrig konzentrierten Bleichmittels auf die Zahnfarbe *in vitro* zu untersuchen,
3. mögliche Änderungen der Mikrohärtigkeit der behandelten Schmelzoberflächen nach der Bleichtherapie *in vitro* festzustellen und
4. die visuelle Zahnfarbbestimmung mit einer computergestützten Farbbestimmungsmethode zu vergleichen.

4. MATERIAL UND METHODE

4.1 Versuchszähne

Gegenstand dieser Untersuchung waren 288 extrahierte, menschliche permanente Frontzähne, hiervon 144 aus dem Oberkiefer und 144 aus dem Unterkiefer (Abb. 15). Sämtliche Zähne waren karies- und füllungsfrei. Alle verwendeten Zähne wurden mit einer fluorid- und ölfreien Polierpaste²⁶ labial und approximal mit einem Prophylaxe-Kelch²⁷ gesäubert und in Kochsalz-Lösung (0,9%ig)²⁸ gelagert. Schließlich wurden die Zähne zwei Wochen vor Versuchsbeginn bis zum Abschluss des Versuchs und zwischen allen einzelnen Versuchsabschnitten in künstlichem Speichel gelagert. Die Zähne wurden im Zeitraum vom April bis Mai 2003 von niedergelassenen Berliner Zahnärzten, Oralchirurgen und der Firma Enretec Dental GmbH gesammelt.



Abb. 15: verfärbte Versuchszähne

4.2 Verfärbung der Versuchszähne

Die Forderung nach eindeutigen Entfärbungsergebnissen machte eine künstliche Verfärbung der Versuchszähne notwendig. Als Zielsetzung galt, dass die Farbe jedes Versuchszahnes auf der Vita Classic-Skala mindestens A3 oder dunkler betragen musste (Abb. 15). Die Einfärbung der Proben erfolgte bei 37 °C mit schwarzem Tee²⁹ und Rotwein³⁰ wie folgt. Die Zähne wurden in einer Mischung aus 500 ml Schwarzen Tee (24 Teebeutel auf einen Liter Wasser, 30 Minuten

²⁶ Hawe Cleanic® Prophylaxepaste, Art. No. 3130, Hawe-Neos Dental, CH

²⁷ Hawe Pro-Cup®, Art. No.990/120, Hawe-Neos Dental, CH

²⁸ Kochsalz-Spüllösung 0,9 %, Delta Select, Pfullingen, D

²⁹ Westminster Schwarzer Tee, Ceylon Assam Mischung, Markus Kaffee GmbH & Co. KG, D

³⁰ Vendémiaire, Pinot-Noir, R Gillard SA Sion, FR

gezogen) und 500 ml eingekochtem Rotwein (fünf Minuten eingekocht) 7 Tage und 12 Stunden gelagert.

Alle Zähne wurden, wie schon zuvor, nach dem Verfärben mit fluoridfreier Polierpaste³¹ und Prophylaxe-Kelch³² gereinigt, um extrinsische Verfärbungen der Zahnoberfläche zu entfernen. Da die Behandlung der Zahnoberflächen mit Rotwein aufgrund seines niedrigen pH-Wertes zu einer gewissen Abnahme der Mikrohärtigkeit durch Demineralisierung führen kann (LUPI-PEGURIER et al., 2003), wurden die Proben zwei Wochen vor Versuchsbeginn zur Remineralisierung in künstlichem Speichel gelagert.

4.3 Herstellung der Versuchsmodelle

Die 288 Zähne wurden je Kieferzugehörigkeit in 144 Oberkiefer- und 144 Unterkieferzähne aufgeteilt. Dann wurden jeweils sechs Zähne desselben Kiefers zahnbogenförmig in einer runden Plastikschiene (mit Trennwand in der Mitte, die die spätere plane Rückseite des Modells darstellte) aufgestellt, indem der untere Teil jeder Zahnwurzel mit Knetmasse umschlossen wurde (Abb. 16a,b). Nach dieser Fixierung wurden sowohl die Wände als auch die restlichen Anteile der Zahnwurzeln mit Vaseline isoliert. Darauf wurde zur Modellherstellung ein kalthärtender Kunststoff³³ in die Plastikschiene appliziert, der die Versuchszähne im oberen Wurzel Drittel umschloss, ohne mit den Zahnkronen, die zudem mit Alufolie abgedeckt waren, in Kontakt zu kommen. Auf diese Weise resultierten Versuchsmodelle mit jeweils sechs Frontzähnen des Oberkiefers oder des Unterkiefers. Die Zähne wurden für jedes Oberkiefer- beziehungsweise Unterkiefermodell in Anlehnung an das F.D.I.-Schema³⁴ als 13 bis 23 oder 33 bis 43 bezeichnet (Abb. 16d). Nach dem Abhärten des Kunststoffes konnte nach Entfernung der Knetmasse im Wurzelbereich jeder Zahn des Modells sowohl unkompliziert entnommen als auch wieder exakt repositioniert werden (Abb. 16c). Um ein realistisches, dem Patientenmund ähnliches Aussehen zu simulieren und somit Fehlerquellen in der visuellen Farbbestimmung auszuschließen beziehungsweise die exakte Funktionsweise des computergestützten Farbmessgerätes zu gewährleisten, wurde zur Modellherstellung ein Kunststoff mit rötlicher Farbe verwendet, der üblicherweise zur Reparatur von Prothesen verwendet wird. Auf diese Weise wurde das Aussehen der Gingiva simuliert.

³¹ Hawe Cleanic® Prophylaxepaste, Art. No. 3130, Hawe-Neos Dental, CH

³² Hawe Pro-Cup®, Art. No.990/120, Hawe-Neos Dental, CH

³³ Paladur® (Monomer & Polymer), Heraeus Kulzer GmbH, 63450 Hanau, D

³⁴ F.D.I.-Schema (Fédération Dentaire Internationale): Gebissformel zur Einteilung menschlicher Zähne nach Quadrant und Zahnart

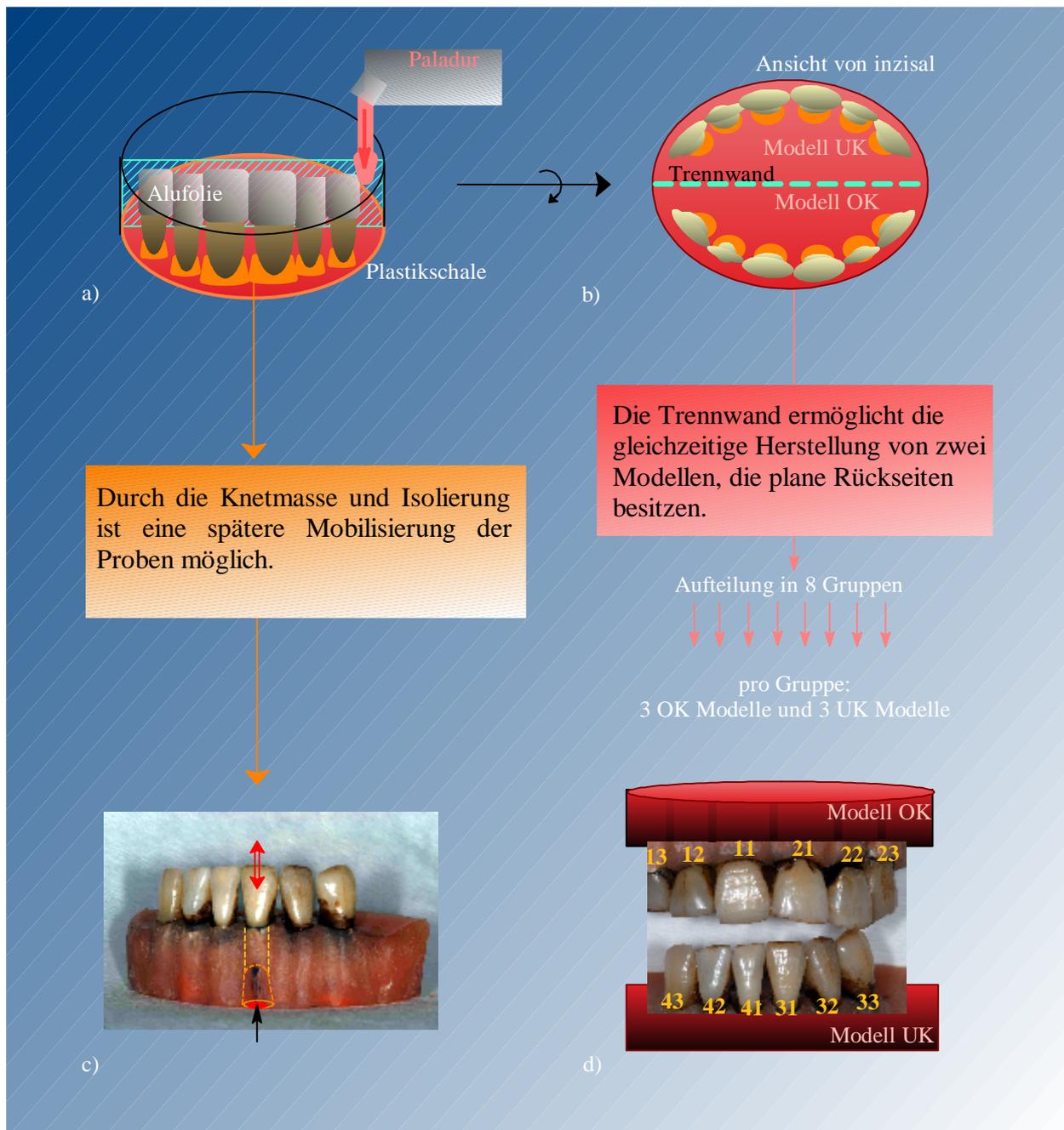


Abb. 16: Herstellung der Versuchsmodelle

4.4 Versuchsgruppen

4.4.1 Gruppeneinteilung für visuelle und computergestützte Farbbestimmungen

Für die Durchführung der im Rahmen dieser Studie durchzuführenden visuellen und computergestützten Farbbestimmungsmessungen wurden die 288 Zähne entsprechend den zu untersuchenden Materialien auf acht Gruppen mit jeweils 36 Zähnen aufgeteilt ($n=36$). Folglich bestand eine Gruppe aus 6 Versuchsmodellen, wobei für jede Gruppe eine Aufteilung in jeweils

drei Oberkieferzahnmodelle (13-23) und drei Unterkieferzahnmodelle (33-43) pro Gruppe gewählt wurde (Tab. 6a).

Tab. 6a: Gruppeneinteilung der Proben für die Farbbestimmungsmessungen

Gruppe	Bleichprodukt	Abkürzung	Anzahl der VM (OK / UK)	Anzahl der Proben pro VM (OK / UK)	n
1	VivaStylePaint On	VSPO1	6 (3 / 3)	(6 / 6)	36
2	VivaStylePaint On	VSPO2	6 (3 / 3)	(6 / 6)	36
3	Colgate Simply White	SW	6 (3 / 3)	(6 / 6)	36
4	VivaStylePaint On	VSPO3	6 (3 / 3)	(6 / 6)	36
5	VivaStyle	VS	6 (3 / 3)	(6 / 6)	36
6	Blend-a-med Whitestrips	WS	6 (3 / 3)	(6 / 6)	36
7	Odol-med3 Samtweiss	BK	6 (3 / 3)	(6 / 6)	36
8	Kontrollgruppe	KTRL	6 (3 / 3)	(6 / 6)	36

VM=Versuchsmodell, n=Anzahl der Proben pro Gruppe

4.3.2 Gruppeneinteilung für die Mikrohärtmessungen

Für die Durchführung von Mikrohärtmessungen im Rahmen dieser Studie wurden 192 Zähne (je Modell 12-22 oder 32-42) der insgesamt 288 zu bleichenden Zähne entsprechend den zu untersuchenden Materialien auf acht Gruppen mit jeweils 24 Zähnen aufgeteilt (n=24). Die Gruppeneinteilung sowie deren Bezeichnung erfolgten analog der Gruppeneinteilung für die visuellen und computergestützten Farbbestimmungen (Abb. 16d). Eine Gruppe bestand aus 6 Versuchsmodellen, wobei eine Aufteilung in jeweils drei Oberkieferzahnmodelle (12-22) und drei Unterkieferzahnmodelle (32-42) pro Gruppe gewählt wurde (Tab. 6b).

Tab. 6b: Gruppeneinteilung der Proben für die Knoop-Mikrohärtmessungen

Gruppe	Bleichprodukt	Abkürzung	Anzahl der VM (OK / UK)	Anzahl der Proben pro VM (OK / UK)	n
1	VivaStylePaint On	VSPO1	6 (3 / 3)	(4 / 4)	24
2	VivaStylePaint On	VSPO2	6 (3 / 3)	(4 / 4)	24
3	Colgate Simply White	SW	6 (3 / 3)	(4 / 4)	24
4	VivaStylePaint On	VSPO3	6 (3 / 3)	(4 / 4)	24
5	VivaStyle	VS	6 (3 / 3)	(4 / 4)	24
6	Blend-a-med Whitestrips	WS	6 (3 / 3)	(4 / 4)	24
7	Odol-med3 Samtweiss	BK	6 (3 / 3)	(4 / 4)	24
8	Kontrollgruppe	KTRL	6 (3 / 3)	(4 / 4)	24

VM=Versuchsmodell, n=Anzahl der Proben pro Gruppe

4.5 Verwendete Bleichmaterialien

In dieser In-vitro-Studie wurden ausschließlich niedrigkonzentrierte Bleichprodukte zur häuslichen Anwendung untersucht. Die als Wirkstoffe deklarierten Inhaltstoffe sowie deren Konzentration sind aus der Tabelle 7 ersichtlich. Die Produkte VivaStyle Paint On und VivaStyle enthielten als Wirkstoff Carbamidperoxid, das während der Behandlungsdauer Wasserstoffperoxid freisetzt. Aus dem Zerfall von 10%igem Carbamidperoxid des Produktes VivaStyle werden etwa 3,3 % Wasserstoffperoxid freigesetzt. Bei der chemischen Zersetzung des 6%igen Carbamidperoxid des VivaStyle Paint On Lackes wurden etwa 2 % Wasserstoffperoxid freigesetzt. Die Produkte Colgate Simply White und Blend-a-med Whitestrips enthielten als aktiven Bestandteil Wasserstoffperoxid, das ohne vorherigen chemischen Zerfall wirkt. Das Homebleaching-System Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur enthielt als Wirkstoff Natriumchlorit. In der Kontrollgruppe wurden die Probezähne in Leitungswasser gelagert.

Tab. 7: enthaltene Wirkstoffe

Produkt (Gruppe)	Abkürzung	Wirkstoff/Konzentration		
		CP	H ₂ O ₂	Natriumchlorit
VivaStyle Paint On (1)	VSPO1	•6 %	[~2 %]	-
VivaStyle Paint On (2)	VSPO2	•6 %	[~2 %]	-
Colgate Simply White (3)	SW	-	•5,9 %	-
VivaStyle Paint On (4)	VSPO3	•6 %	[~2, %]	-
VivaStyle (5)	VS	•10 %	[~3,3 %]	-
Blend-a-med Whitestrips (6)	WS	-	•5,9 %	-
Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (7)	BK	-	-	•
Kontrollgruppe (8)	KTRL	-	-	-

•=enthaltender Wirkstoff, [...%]= Konzentration von H₂O₂ nach Zerfall des CP (gerundete Werte)

Die Tabelle 8 fasst die Anwendungsart, die tägliche Dauer der Bleichbehandlung und den Anwendungszeitraum der Bleichmittel zusammen. Mit Ausnahme des Produktes der Gruppe 7 (BK) wurden alle ausgewählten Materialien über zwei Wochen angewendet. Das Produkt Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur wurde nach Herstellerangaben für einen Zeitraum von drei Wochen angewendet. Nach jedem Bleichvorgang wurden die Zähne drei Minuten unter fließendem Leitungswasser mit einer extraweichen Zahnbürste³⁵ gereinigt.

³⁵ Zahnbürste (extraweich), Meridol, GABA, Münchenstein, CH

Tab. 8: Anwendungsart und Anwendungsdauer

Produkt (Gruppe)	Anwendungsart	Anwendungsdauer	Zeitraum
VivaStyle Paint On (1)	aufpinseln	1 × täglich: 20 min	2 Wochen
VivaStyle Paint On (2)	aufpinseln	2 × täglich: 20 min	2 Wochen
Colgate Simply White (3)	aufpinseln	2 × täglich: 30 min	2 Wochen
VivaStyle Paint On (4)	aufpinseln	2 × täglich: 05 min	2 Wochen
VivaStyle (5)	individuelle Schiene	1 × täglich: 60 min	2 Wochen
Blend-a-med Whitestrips (6)	Polyethylenstreifen	2 × täglich: 30 min	2 Wochen
Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (7)	Drei-Komponenten-System inklusive Schiene	2 × täglich: 10 min	3 Wochen
Kontrollgruppe (8)	feuchtes Tuch	1 × täglich: 60 min	2 Wochen

4.5.1 VivaStyle Paint On

VivaStyle Paint On (Abb. 17), ein Lack zur Zahnaufhellung der Firma Ivoclar Vivadent³⁶ wurde mit Hilfe eines Pinsels auf die Zahnoberfläche aufgetragen, auf der es einen adhärenen weißlichen Belag bildete. VivaStyle Paint On wurde in drei verschiedenen Gruppen untersucht, da hier drei unterschiedliche Zeitvorgaben in der Anwendung verglichen werden sollten. In Gruppe 1 wurde das Produkt einmal täglich für 20 Minuten, in Gruppe 2 zweimal täglich für 20 Minuten und in Gruppe 4 zweimal täglich für 5 Minuten angewendet. Der Behandlungszeitraum betrug jeweils zwei Wochen. Als aktiver Bestandteil zur Bleichtherapie ist

**Abb. 17:** VivaStyle Paint On

Carbamidperoxid in einer Konzentration von 6 % enthalten, welches zu etwa 2 % Wasserstoffperoxid zerfällt. Weitere Bestandteile sind Ethanol, D-Panthenol, Pfefferminzöl und ein Zellosederivat. Der Zellulosezusatz soll die Haftung des Lackes auf der Zahnoberfläche verbessern.

³⁶ Ivoclar Vivadent, Liechtenstein

4.5.2 Colgate Simply White

Das Produkt Colgate Simply White ist ein transparentes Zahnaufhellungsgel der Firma



Colgate-Palmolive GmbH³⁷ (Abb. 18). Das Produkt wurde mit Hilfe eines Pinsels zweimal täglich für 30 Minuten über zwei Wochen auf die Zahnoberfläche aufgetragen. Der Pinsel ist als Bestandteil des Lieferumfangs in die Verschlusskappe des Produkts integriert. Als Wirkstoff enthält dieses Produkt Wasserstoffperoxid in einer Konzentration von 5,9 %. Zusätzlich enthaltene Bestandteile sind Alkohol, Wasser, PEG 12, Glycerin, Carbomer, Natrium Phosphate, BTH und Phosphorsäure.

Abb. 18: Colgate Simply White

4.5.3 VivaStyle

Das Home-Bleaching VivaStyle der Firma Ivoclar Vivadent³⁸ wurde in Gelform mittels einer



individuell hergestellten Schiene auf die Zähne aufgebracht und täglich für eine Stunde über individuell hergestellten Schiene auf die Zähne aufgebracht und täglich für eine Stunde über zwei Wochen angewendet (Abb.19). Die Konzentration an Carbamidperoxid von 10 % entspricht einer Konzentration von etwa 3,3 % Wasserstoffperoxid. Als weitere Bestandteile sind Glycerin, gepufferte Polycarbonsäure sowie Pfefferminzöl in diesem Produkt enthalten.

Abb. 19: VivaStyle

³⁷ Colgate-Palmolive GmbH, Hamburg, D

³⁸ Ivoclar Vivadent, Liechtenstein

4.5.4 Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur

Die Firma GlaxoSmithKline³⁹ bietet mit dem Produkt Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur ein Drei-Komponenten-System bestehend aus Zahncreme, Gelee und Aktivator an (Abb. 20). Nach dem Zähneputzen mit der Zahncreme für zwei Minuten wurde die Aktivatorflüssigkeit mittels integriertem Schwämmchen auf die zu bleichende labiale Zahnoberfläche aufgebracht (Stufe 1). Unmittelbar darauf folgte die Applikation des Gelees (Stufe 2), das zuvor auf ein individuell der Zahnreihe angepasstes Mundstück aufgebracht wurde. Dieses Vorgehen sollte zum Erreichen des optimalen Bleichresultates zweimal pro Tag für drei Wochen durch geführt werden. Dieses



Zahnweißsystem nutzt als Wirkstoff Chlorit (Natriumchlorit), welches in der Anwendungsstufe 1 über den Aktivator auf die Zähne aufgetragen wird. In der zweiten Anwendungsstufe wird durch das Gelee die Aufhellungsreaktion gestartet, bei der aktiver Sauerstoff entsteht, der dann die Zahnaufhellung bewirken soll.

Abb. 20: Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur

Als weitere Bestandteile sind in diesem Drei-Komponenten-System enthalten:

- Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur Aktivator: Aqua und Natrium Chlorite (Natriumchlorit)
- Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur Gelee: Aqua, Glycerin, Polysorbate 20, Aroma, Citric acid, Natrium Hydroxide und Methylparaben
- Odol-med3 Samtweiss Zahncreme: Aqua, Hydrated Silica, Sorbitol, Glycerin, Pentasodium Triphosphate, PEG-6, Natrium Lauryl Sulfate, Aroma, Titanium Dioxide, Xanthan gum, Natrium Hydroxide, CI 42090, CI 47005 und CI 73360. Des Weiteren ist in der Zahncreme Natriumfluorid (1100 ppm Fluorid) enthalten.

³⁹ GlaxoSmithKline, Brühl, D

4.5.5 Blend-a-med Whitestrips

Bei den Blend-a-med Whitestrips (Abb. 21) handelt es sich um Over the counter-Bleaching-Streifen der Firma Procter&Gamble⁴⁰, welche nach Herstellervorgaben zweimal täglich für zwei Wochen für jeweils eine halbe Stunde angewendet wurden. Der Abstand zwischen den beiden



Abb. 21: Blend-a-med Whitestrips

Applikationen betrug acht Stunden. Das Produkt besteht aus einem flexiblen Polyethylenstreifen, der als aktiven Wirkstoff Wasserstoffperoxid mit einer Konzentration von 6% trägt. Die weiteren Bestandteile sind gereinigtes Wasser, Glycerin, Saccharin, Carbopol 956, Natriumhydroxid, saures Natriumpyrophosphat und Natriumstannat.

4.5.6 Kontrollgruppe

Die Versuchszähne der Kontrollgruppe wurden täglich für 60 Minuten in frischem Leitungswasser gelagert.

4.5.7 pH-Werte der verwendeten Bleichmaterialien

Die pH-Werte der in dieser Studie untersuchten Bleichmaterialien wurden mit einem digitalen pH-Meter⁴¹ und einer speziellen pH-Elektrode⁴² gemessen. Die Bleichprodukte und das Leitungswasser der Gruppe 8 hatten bei einer Zimmertemperatur von 21 ± 2 °C zehn Minuten Kontakt mit der Elektrode, um einen stabilen Endmesswert zu erhalten. Um Mittelwerte zu erhalten, wurden für jedes Material der acht Gruppen drei Messungen durchgeführt. Das pH-Messgerät wurde initial mit Pufferlösungen⁴³ mit dem pH von 4 und 7 standardisiert. Die Elektrode wurde zwischen den drei Messungen des gleichen Produkts gründlich mit Leitungswasser gesäubert, um alle Spuren der zuvor getesteten Lösung zu entfernen. Vor der Testung einer anderen Lösung wurde das pH-Messgerät nach Säuberung mit destilliertem Wasser erneut mit

⁴⁰ Wick Pharma/ Procter&Gamble, Schwalbach, D

⁴¹ pH-/Redox-/Temperatur-Messgerät GMH3510 V2.3, Fa.Greisinger Regenstauf, Deutschland

⁴² semi-micro pH electrode, Orion Research, Boston, USA

⁴³ J.T. Baker buffered solution (pH 4/ pH7), Mallinckrodt Baker, Phillipsburg, USA

den Pufferlösungen (pH-Wert von 4 und 7) rekalibriert. Nach Beendigung der pH- Messungen wurde die Elektrode mit destilliertem Wasser und Cellulosetüchern⁴⁴ gesäubert. Um einen anschaulichen Vergleich zu den pH-Werten der Bleichmittel herzustellen, wurde neben dem pH-Wert vom Leitungswasser der Kontrollgruppe auch der pH-Wert von Coca-Cola⁴⁵ gemessen.

4.6 Herstellung von Bleichschienen

Zur regelrechten Anwendung des Zahnaufhellungsgels VivaStyle wurden Bleichschienen hergestellt, die den Angaben des Herstellers entsprachen. Auf Superhartgipsmodelle⁴⁶, die nach einer Alginatabformung⁴⁷ (GREENWALL, 2001) der Versuchsmodelle der Gruppe 5 hergestellt worden waren, wurde zuerst eine Platzhalterschiene⁴⁸ mit 0,8 Millimeter Stärke, dann eine Tiefziehschiene⁴⁹ mit 1,5 Millimeter Stärke in einem Vakuumformer⁵⁰ tiefgezogen.

Der Platzhalter erstreckte sich mit einem Abstand von einem Millimeter zur Schmelz-Dentin-Grenze über die gesamte labiale Fläche. Weiter überzog dieser das inzisale Viertel der lingualen beziehungsweise palatinalen Zahnfläche, sodass die Approximalkontakte ebenfalls erfasst wurden (Abb. 22). Für die Anwendung des Produktes Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur wurden die beiliegenden Kunststoffmundstücke individuell nach Herstellerangaben mit heißem Wasser an die Zahnreihen der Modelle der Gruppe 7 angepasst. Der Zwischenschritt der Herstellung von Superhartgipsmodellen wurde bei beiden Gruppen bewusst gewählt, um mögliche Veränderungen auf den Schmelzoberflächen durch die Herstellung und die Präparation der Bleichschienen ausschließen zu können.



Abb. 22: Gipsmodell mit Platzhalterfolie (links). Bleichschiene auf Oberkieferfrontzahnmodell *in vitro* (rechts).

⁴⁴ Kimwipes EX-L, Kimberly-Clark, Roswell, USA

⁴⁵ Coca-Cola, Coca-Cola Deutschland Verkauf GmbH & Co. KG, Berlin, D

⁴⁶ Tewaterock®, Kettenbach GmbH & Co. KG, Eschenburg, D

⁴⁷ Palgat Plus™, 3M ESPE AG, Seefeld, D

⁴⁸ Durufolen-W [0,8 mm], Dreve- Dentamid GmbH, Unna, D

⁴⁹ Erkoflex [1,5 mm], Erkodent® Erich Kopp GmbH, Pfalzgrafenweiler, D

⁵⁰ Erkopress ES 2002, Erkodent® Erich Kopp GmbH, Pfalzgrafenweiler, D

4.7 SpectroShade

Die digitale Farbbestimmung der Versuchszähne wurde mit dem Spektralphotometer SpectroShade der Firma MHT⁵¹ vorgenommen. Die computergestützten Farbmessungen wurden vor der Bleichbehandlung zum Zeitpunkt m0 und 24 Stunden nach Abschluss der letzten Bleichbehandlung (m1) durchgeführt. Das SpectroShade-System war in ein PC-Gehäuse integriert (Abb. 23). Das Spektralphotometersystem bestand aus einer Reihe von magnetischen Blenden, zwei Lichtleitern und einem Beugungsgitter, welches das zu messende Licht in die jeweiligen Spektralanteile zu fraktionieren vermag. Durch duale, digitale Intraoralkameras, welche durch optische Faserkabel mit dem Spektralphotometer verbunden waren, wurde eine Farbbestimmung optischer Daten ohne die Beeinflussung von Lichtverhältnissen oder anderer Konditionen, die eine rein visuelle Determinierung hätten beeinträchtigen können, möglich gemacht. Das Gerät bestimmte die Farbe der Versuchszähne, indem es den entsprechenden Farbabstand zu einer im Vorfeld gewählten konventionellen Farbskala festlegte.

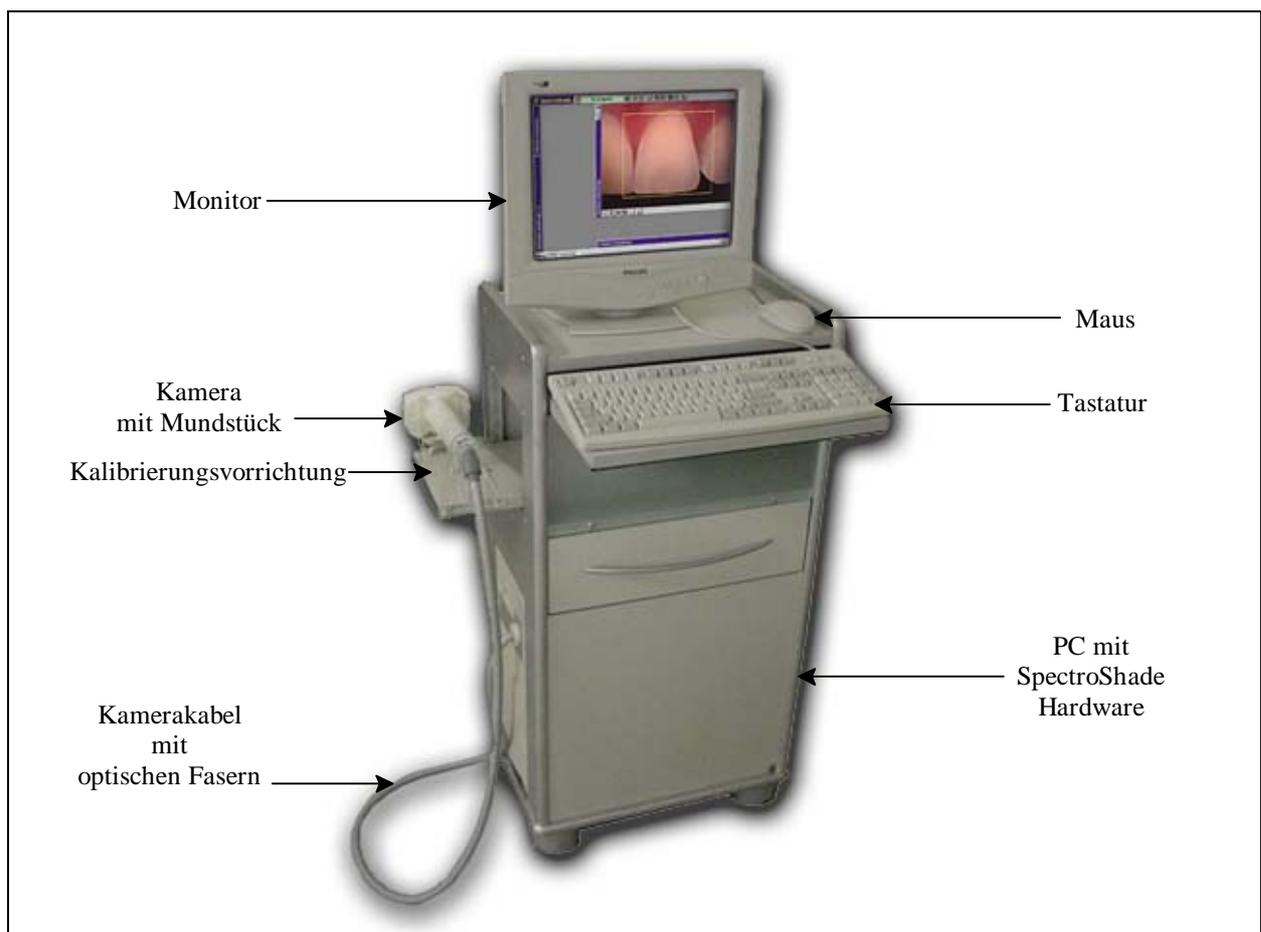


Abb. 23: SpectroShade-System⁵²

⁵¹ MHT™ Int., Niederhasli, CH

⁵² Abbildung entnommen aus: www.mht.ch

Die Messungen wurden in einem abgedunkelten Raum mit Hilfe einer Blackbox⁵³, um jegliche Art von Fremdlicht auszuschließen, durchgeführt. Zur elektronischen Farbbestimmung wurde die Optik des Handstückes in einem Winkel von 90° zur Zahnoberfläche vor dem zu messenden Zahn positioniert. Das Handstück mit PC-Verbindung und Mundstück für den Patienten enthielt eine Lichtquelle mit rotierendem Bewegungsgitter zur Spektralmessung und zwei Aufnahmekameras jeweils für Farbmessung und Livebild (Abb. 24). Des Weiteren eliminierten Polarisationsfilter Glanzlichter.

Für die bevorstehende Farbmessung wurde mit der Livekamera die zu messende Zahnoberfläche exakt fokussiert. Durch Betätigung des Aktivierungsschalters am Handstück begann die spektralphotometrische Farbmessung. Zunächst schaltete die Beleuchtung automatisch vom Weißlicht der Livekamera (Halogenlampe 12 Volt, 100 Watt) auf Spektrallicht mit einer Farbtemperatur von 6000 Kelvin um. Vor dem Austritt aus dem Handstück teilte sich der Lichtleiter, so das Objekt von zwei Seiten im 45° Winkel angestrahlt wurde. Das reflektierte Licht wurde von einem CCD-Photosensor (Charge Coupled Device) im Winkel von 0° am Handstück aufgefangen (Abb. 24). Die Lichtquelle projizierte nun nacheinander alle Wellenlängen im sichtbaren Spektrum des Lichtes auf das Objekt. Von diesem wurde das Licht reflektiert und innerhalb der folgenden 0,7 Sekunden von der Messkamera erfasst. Die photosensorischen Dioden des Gerätes fraktionierten nun das so empfangene Licht. Nach vier Sekunden waren die Messungen beendet und von jedem Bildpunkt lagen nun die Spektraldaten der Wellenlängen von 400 bis 720 nm, in Abständen von 20 nm gespeichert, vor. Das gemessene Areal umfasste dabei 18 x 14 mm (640 x 480 Pixel).

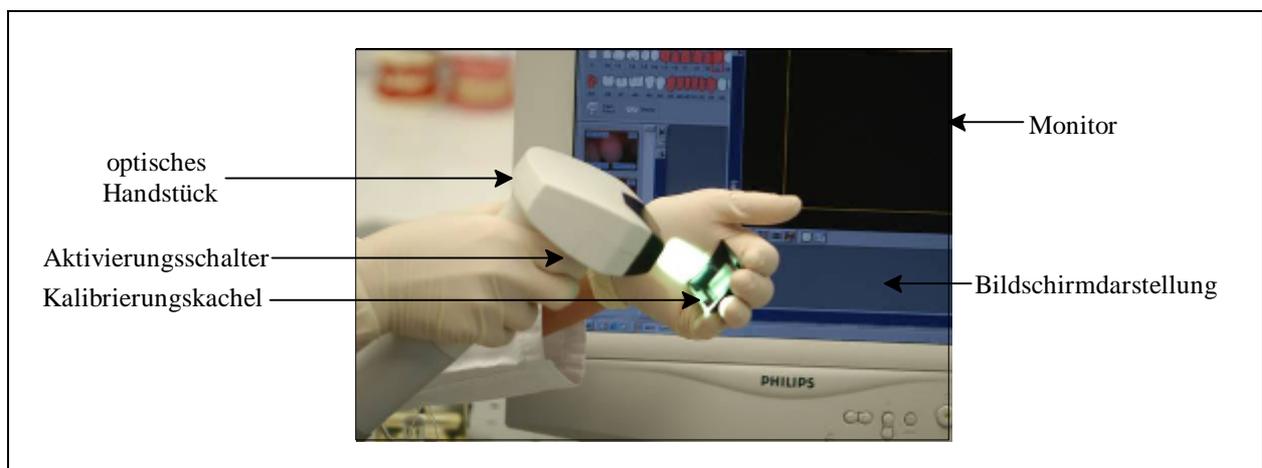


Abb. 24: SpectroShade-Handstück

⁵³ MHT™ Int., Niederhasli, CH

Die auf diese Weise erhaltenen Messwerte wurden danach vom System analysiert und in Farbkoordinaten gemäß des CIE-Koordinatensystems umgewandelt. Diese Koordinaten wurden nun mit den in den Datenbanken des Systems gespeicherten Daten gängiger industrieller Farbschlüssel (in dieser Untersuchung Vita Classic und Chromoscop Complete) verglichen. Das Ergebnis stellte eine Farbkarte des gemessenen Objektes mit exakten Farbdefinitionen und Abweichungen zum Industriefarbschlüssel dar. Zusätzlich konnte die Transluzenz des Objektes auf der Farbskala angezeigt werden. Das resultierende Bild belegte einen Speicherplatz von etwa 30 Kilobytes auf der Festplatte des Rechners. Das System arbeitete mit einer Farbtoleranz, die kleiner als $\Delta E 2$ ist. Dieser Toleranzwert wird vom menschlichen Auge nicht als Unterschied erkannt. Es wurden die drei Versuchszähne jeder Untereinheit gemessen. Von jedem Versuchszahn wurden jeweils drei Aufnahmen vor (1. Messung = m0) und nach (2. Messung = m1) dem Bleichen durchgeführt. Diese wurden aus dem temporären Speicher durch die „drag and drop“-Option in der Datenbank des Systems gespeichert (Abb. 25). Die Farbbestimmung durch das SpectroShade wurde durch den Vergleich mit einer zuvor gewählten Datenbank, bestehend aus mit den standardisierten Farbskalen korrelierenden Bildern, vorgenommen. In dieser Studie wurden sowohl die Datenbanken der Ivoclar Chromoscop Complete-Skala als auch die Vita Classic-Farbskala zur Farbbestimmung gewählt. Vor der automatischen Farbbestimmung durch das System mussten die Bilder zunächst manuell so rotiert werden, dass die Zahnhäse nach oben zeigten. Diese Voreinstellung des Bildmaterials war zum Ausschluss von Fehlinterpretationen des Systems notwendig, da die voreingestellten Referenzbilder von Farbskalen in den Datenbanken in der gleichen Ausrichtung vorlagen. Überdies waren zum Teil auch Angleichungen der vom Rechner gefundenen Zahnform nötig.

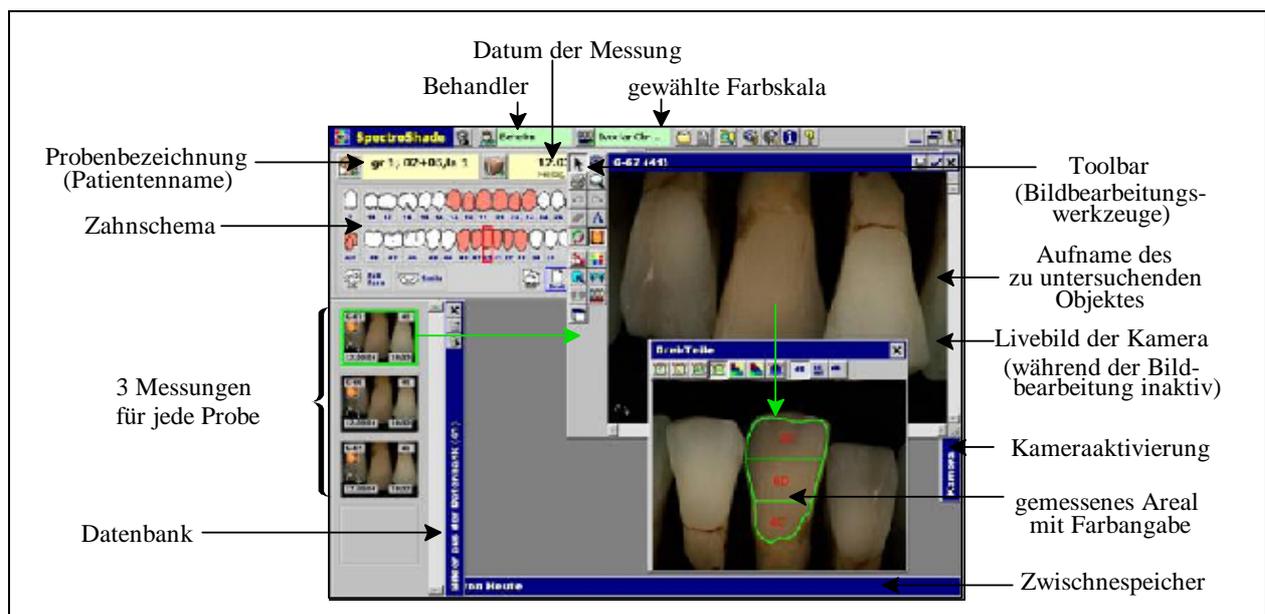


Abb. 25: Darstellung der SpectroShade-Software

4.8 Farbmessung mit visueller Farbskala

Die Farbmessung wurde, verblindet mit der Ivoclar Chromascop Complete-Farbskala⁵⁴ (Abb. 26), unmittelbar vor und 24 Stunden nach Abschluss der letzten Bleichbehandlung zum Zeitpunkt m1 durchgeführt. Dabei wurde das mittlere Drittel der vestibulären Fläche jedes Zahnes betrachtet und dokumentiert. Die Messungen wurden immer in demselben Behandlungszimmer, an identischer Position, zu identischer Tageszeit und mit identischer Beleuchtung von derselben Person durchgeführt.



Abb. 26: Ivoclar Vivadent Chromascop Complete-Farbskala, gelb umrandet sind die Farben 010 bis 040 (links), visuelle In-vitro-Messung mit Farbskala (rechts)

4.9 Messung der Knoop-Mikrohärte

Zur Feststellung von Veränderungen der Schmelzoberfläche während der Bleichbehandlung wurden auf den Schmelzoberflächen von 192 Probezähnen Messungen der Knoop-Mikrohärte vorgenommen. Jede der acht Gruppen enthielt 24 Proben ($n=24$). Die Bezeichnung der acht Gruppen, der jeweils untersuchten Bleichmittel und deren Bezeichnung wurden identisch mit denen der Farbbestimmung gewählt. Veränderungen der Mikrohärte einer Zahnoberfläche lassen Rückschlüsse auf Änderungen der mineralischen Zusammensetzung sowohl auf als auch in tieferen Bereichen von Schmelz und Dentin zu (WHITE & FEATHERSTONE, 1992). So können Mineralverluste, bereits weit bevor sie klinische Relevanz erlangen, nachgewiesen werden.

⁵⁴ Chromascop® Complete, Ivoclar Vivadent GmbH, Ellwangen, D

4.9.1 Methodik

CRAIG und PEYTON (1958) beschrieben die Mikrohärteuntersuchung von Schmelz und Dentin. Für die Durchführung der vorliegenden Untersuchung stand das Gerät Klein-Härteprüfer Durimet der Firma Leitz⁵⁵ zur Verfügung. Die Proben wurden unmittelbar nach der Entnahme aus dem künstlichen Speichel auf speziellen Objektträgern aus Kunststoff mit einem Tropfen Sekundenkleber im Bereich des mittleren Wurzeldrittels fixiert. Dann erfolgte die Härtemessung im Bereich der planparallelen Schmelzflächen (Abb. 27c). Jede Härtemessung wurde für die Belastungszeit von 30 Sekunden mit einer Prüfkraft von 1,0 N (≈ 100 g) durchgeführt. Pro Messung wurden jeweils drei Eindrücke im Abstand von 100 μm gesetzt (Abb. 27d). Die Messung der großen Eindruckdiagonalen erfolgte unmittelbar nach der Prüfung mit dem Knoop-Diamanten bei 100- beziehungsweise 400-facher Vergrößerung. Die Messergebnisse wurden mit Hilfe der „Tabellen zur Bestimmung der Knoophärte mit dem Klein-Härteprüfer Durimet“⁵⁶ bestimmt. Die Tabellen berechnen sich nach der Gleichung 10. Darin bedeuten KH die Knoophärte in kg/mm^2 , P die Prüfkraft in Gramm und l die Länge der großen Eindruckdiagonalen in μm .

$$\text{KH} = \frac{14,23 \times 10^3 \times \text{P}}{l^2} \quad \text{Gleichung 10}$$

4.9.2 Präparation der Messfläche

Für die Messung der Knoophärte wurde an den Versuchszähnen, jeweils im inzisalen Approximalbereich anschrägend, eine Messfläche präpariert. Es wurden hierbei Schleifmaschinen des Typs Phoenix Alpha⁵⁷ mit Siliziumkarbid (SiC)-Nassschleifpapier⁵⁸ benutzt. Zum Planschleifen wurden die zu präparierenden Zähne mit einem Druck von 10 bis 20 N und bei 150 Umdrehungen in der Minute auf SiC-Papier (1200er Körnung; Korngröße: 15 μm) platziert, bis daraus eine plane Fläche resultierte. Mit gleichem Druck und gleicher Umdrehungszahl wurde anschließend der Feinschliff mit extrafeinem SiC-Papier (4000er Körnung; Korngröße: 5 μm) vorgenommen (Abb. 27a). Während des gesamten Vorgangs wurde das Schleifpapier mit Wasser feucht gehalten und gekühlt.

⁵⁵ E. LEITZ, Wetzlar, D

⁵⁶ E. LEITZ, Wetzlar, D

⁵⁷ Phoenix Alpha, Buehler, Düsseldorf, D

⁵⁸ Silicon Carbide Grinding Paper (wet) P1200P&4000, Buehler, Düsseldorf, D

4.9.3 Herstellung der Objektträger

Für das exakt senkrechte Auftreffen des Knoop-Diamanten wurden individuelle, an die Versuchszähne angepasste Objektträger benötigt (Abb. 27b). Diese wurden aus Kunststoff⁵⁹ hergestellt. Die Basalfläche wurde parallel zur Tischebene ausgerichtet. Die Versuchszähne wurden anschließend mit der präparierten Fläche, ebenfalls parallel zur Tischfläche, nach oben ausgerichtet und an der Basalfläche mit Kunststoff fixiert. Dadurch war einerseits gewährleistet, dass die Zähne starr auf dem Objektträger befestigt werden konnten, andererseits jedoch auch relativ leicht wieder zu entfernen waren. Vor der Durchführung der Mikrohärtemessungen wurden die Versuchszähne zusätzlich mit Sekundenkleber an der während aller Messungen ungenutzten zervikalen Zahnrückseite und mittleren Wurzeloberfläche fixiert (Abb. 27c).

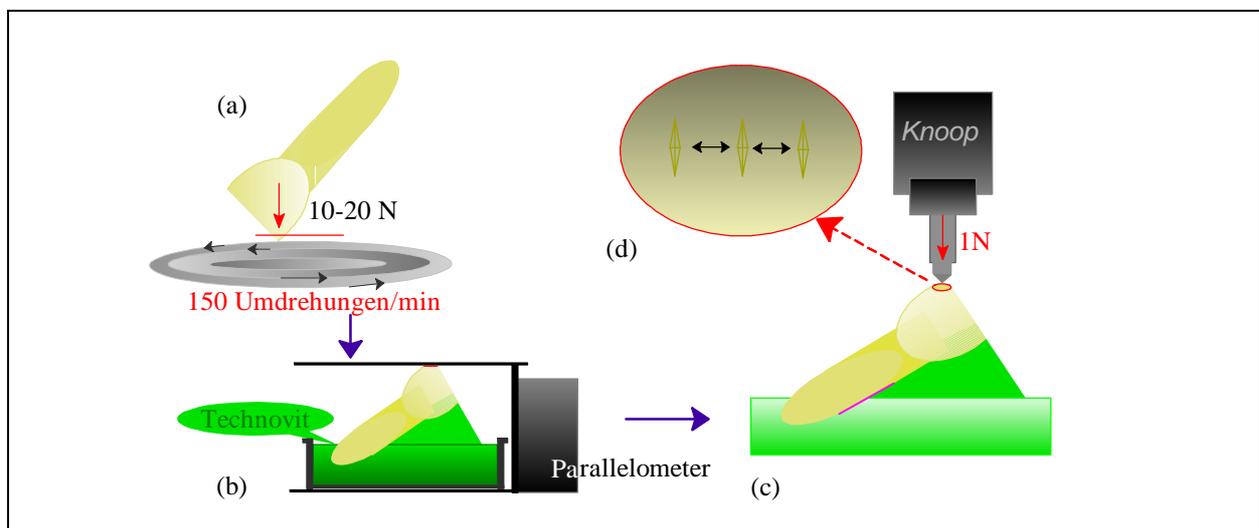


Abb. 27: Knoop-Mikrohärte Messung: Präparation der Messfläche (a), Objektträgerherstellung (b), Mikrohärtemessung des fixierten Zahnes (c), Vergrößerung der drei Messeindrücke mit 100 µm Abstand (d)

4.10 Künstlicher Speichel

Um möglichst mundgetreue Verhältnisse zu schaffen, die zum Erreichen von akzeptablen Messergebnissen unabdingbar sind (WILLE et al., 2003), wurden sämtliche Versuchszähne zwei Wochen vor Versuchsbeginn bis zum Ende der Messungen ständig in künstlichem Speichel gelagert. Der künstliche Speichel, in dem die Proben aufbewahrt waren, wurde täglich gewechselt, um ein gleichbleibendes Ionenmilieu beziehungsweise den identischen pH-Wert ($6,9 \pm 0,1$) zu gewährleisten. Mit dem Beginn der Lagerung zwei Wochen vor den Messungen sollte darüber hinaus sichergestellt werden, dass eine schon vorhandene Demineralisation des

⁵⁹ Technovit 4071®, Heaeus Kulzer, Wehrheim, D

Schmelzes, bedingt zum Beispiel durch die vorherige Anwendung der rotweinhaltigen Verfärbungslösung (LUPI-PEGURIER et al., 2003), remineralisiert werden. Die Zusammensetzung von künstlichem Speichel (Remineralisationslösung) nach BUSKES und CHRISTOFFERSEN (1985) ist aus der Tabelle 9 ersichtlich.

Tab. 9: Zusammensetzung Remineralisationslösung nach BUSKES und CHRISTOFFERSEN (1985)

Inhaltsstoff	Ansatz	Konzentration in mmol/l	Molare Masse in g/mol	Menge
CaCl ₂ × 2H ₂ O	5 l	1,5	147,02	1,103 g
KH ₂ PO ₄	5 l	0,9	136,09	0,612 g
HEPES 1M	5 l	20		100 ml
KOH 1M	5 l		56,11	ad pH 7 (ca.15 ml)
Thymol	5 l			in Spuren
Aqua dest.	5 l		18	ad 5 l

Die Zusammensetzung dieser Remineralisationslösung wurde für die Durchführung der Versuche übernommen. Die Versuchszähne wurden mit Ausnahme des kurzen Moments der Bleichmittelapplikation und des Bleichvorgangs permanent in künstlichem Speichel bei 37 °C im Wärmeschrank gelagert⁶⁰. Auf diese Weise wurde ein Austrocknen der Proben vermieden und für die Versuchszähne aller Gruppen gleiche Rahmenbedingungen geschaffen.

4.11 Simulation der Mundhöhle

Während der Bleichanwendung wurden die Versuchszähne mit in Remineralisationslösung getränkten Cellulosetüchern⁶¹ bedeckt und im Wärmeschrank gelagert. Auf diese Weise wurde die Beschaffenheit der Mundhöhle sowohl in Bezug auf Dunkelheit und Feuchtigkeit als auch in Hinsicht der Benetzung der Zahnoberflächen mit Speichel bei Mundschluss simuliert. Die Versuchszähne wurden während der Einwirkzeit des jeweiligen Bleichmittels im Wärmeschrank bei 37 °C gelagert, um beim Bleichvorgang konstant eine mundähnliche Temperatur zu gewährleisten.

⁶⁰ Wärmeschrank BR 6000, Heraeus Kulzer, Wehrheim, D

⁶¹ Kimwipes EX-L, Kimberly-Clark, Roswell, USA

4.12 pH-Messungen

Die pH-Werte der in dieser Studie untersuchten Bleichmittel, vom Leitungswasser der Gruppe 8, von Coca-Cola und vom künstlichen Speichel wurden mit einem digitalen pH- Meter⁶² und einer spezieller pH-Elektrode⁶³ gemessen. Das pH-Messgerät wurde initial mit Pufferlösungen⁶⁴ mit dem pH von 4 und 7 standardisiert und jedes Mal vor Testung einer anderen Lösung recalibriert. Nach Beendigungen der pH- Messungen wurde die Elektrode mit destilliertem Wasser und Cellulosetüchern⁶⁵ gesäubert.

4.13 Statistische Software

Zum Auswerten der Messungen wurde die frei im Handel erhältliche statistische Software SPSS-WIN⁶⁶ verwendet.

4.14 Quantitative und statistische Auswertung

4.14.1 SpectroShade und Farbmessung mit konventioneller Farbskala

Die Farbveränderungen wurden mit dem SpectroShade-Farbmessgerät unter Verwendung der Parameter der Chromascop Complete- sowie der Vita Classic-Skala gemessen. Die Farbmessung mit konventioneller Farbskala wurde mit dem Chromascop Complete-Farbring durchgeführt. Zur quantitativen Auswertung der ermittelten Werte wurden jeweils die Gruppenmittelwerte vor dem Beginn der Versuchsdurchführung (m0) und nach der Bleichanwendung (m1) mit den jeweiligen Standardabweichungen errechnet. Anschließend wurde die Differenz zwischen den Mittelwerten der Messungen m0 und m1 für jede der acht Gruppen mit dem t-Test für abhängige Stichproben beurteilt. Das Signifikanzniveau betrug dabei 5 %. Für den Vergleich, welche der Differenzen der acht Gruppenmittelwerte m0-m1 sich signifikant voneinander unterscheiden, wurden die Gruppen untereinander mit dem Kruskal-Wallis-Test und paarweise mit dem Mann-Whitney-U-Test (zweiseitig) untersucht. Aufgrund der Berechnung mehrerer Einzelvergleiche und der

⁶² pH-/Redox-/Temperatur-Messgerät GMH3510 V2.3, Fa.Greisinger, Regenstein, D

⁶³ semi-micro pH electrode, Orion Research, Boston, USA

⁶⁴ J.T. Baker buffered solution (pH 4/ pH7), Mallinckrodt Baker, Phillipsburg, USA

⁶⁵ Kimwipes EX-L, Kimberly-Clark, Roswell, USA

⁶⁶ SPSSWIN, release 12.0, SPSS, Chicago, IL, USA

daraus resultierenden α -Fehler-Kumulierung, wurde mit der Bonferroni-Korrektur (Faktor 28) eine α -Fehler-Adjustierung von $\alpha=0,05$ auf $\alpha'=0,0018$ vorgenommen.

4.14.2 Korrelationen der Farbmesswerte

Zur Überprüfung des Zusammenhangs zwischen den verschiedenen Farbbestimmungsmethoden wurde die Korrelation der Messwerte berechnet und diese auf Signifikanz geprüft. In dieser Studie richtete sich das Hauptaugenmerk hinsichtlich der Korrelation primär auf den Zusammenhang zwischen den visuell und den computergestützt bestimmten Chromascop Complete-Farbwerten. Neben der deskriptiven Gegenüberstellung der Resultate für jede der Untersuchungsmethoden und Berechnung der Übereinstimmung, wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman berechnet. Des Weiteren wurde der Korrelationskoeffizient nach Spearman zwischen den Vita-Messwerten und den Messwerten der Chromascop Complete-Farbskala (jeweils visuell und computergestützt) errechnet, um darzustellen, welcher Zusammenhang zwischen den Messwerten der unterschiedlichen Farbskalen besteht.

4.14.3 Knoop-Mikrohärte

Zur qualitativen Auswertung der Knoop-Mikrohärtemessungen wurde zunächst eine deskriptive Statistik erstellt. In dieser wurde für jeden der drei Messwerte jeweils für den Zeitpunkt m_0 (Beginn der Versuchsdurchführungen), m_1 (unmittelbar nach den Bleichvorgängen) und m_2 (nach sechswöchiger Lagerung in künstlichem Speichel) der Mittelwert mit der jeweiligen Standardabweichung berechnet. Des Weiteren wurden die Änderungen der Mikrohärtewerte zwischen Messung m_0 und Messung m_1 , zwischen Messung m_1 und Messung m_2 und zwischen den Messungen m_0 und m_2 errechnet. Primär richtete sich hierbei das Hauptaugenmerk auf die statistische Analyse der Veränderungen zwischen den Messungen m_0 und m_1 . Zusätzlich sollten jedoch darüber hinaus auch die Veränderungen zwischen den Messungen m_1 zu m_2 und m_0 zu m_2 betrachtet werden. Die Werte der Unterschiede der Mittelwerte innerhalb der jeweiligen Gruppe wurden für jede der acht Gruppen statistisch mit dem Wilcoxon-Test (zweiseitig) ausgewertet und auf Signifikanz geprüft. Zu diesem Zweck wurde eine Bonferroni-Korrektur mit dem Faktor 8 durchgeführt, um eine α -Fehler-Adjustierung vorzunehmen. Daraus resultierte für das 5%ige Signifikanzniveau ($\alpha=0,05$) ein α' -Wert von 0,006. Für die Annahme eines hochsignifikanten Ergebnisses ($\alpha=0,01$) ergab sich ein α' -Wert von 0,001. Die Signifikanzen der

Unterschiede zwischen den acht Gruppen wurden mit dem Kruskal-Wallis-Test und anschließend als Einzelvergleiche, jeweils paarweise, mit dem Mann-Whitney-U-Test (zweiseitig) untersucht. Sowohl für die Primär- als auch für die Sekundäranalyse wurde das Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$ auf $\alpha'=0,0018$ adjustiert (Bonferroni-Korrektur mit Faktor 28), da alle möglichen Paarungen der acht Gruppen geprüft wurden (multiples Testen).

4.14.4 Darstellung der Messwerte als Box-and-whisker plots

Zur grafischen Darstellung der numerischen Werte der Farb- und Knoop-Mikrohärtemessungen wurden in den jeweiligen Abschnitten der Kapitel 5.2, 5.3 und 5.4 zur Objektivierung Box-and-whisker plots (Boxplots) verwendet. Der Boxplot ist eine Fünf-Punkte-Zusammenfassung bestehend aus den Quartilenwerten („Viertelwerte“) Q_{25} und Q_{75} , dem Median (Q_{50}) und den Endpunkten der Whisker (Abb. 28). Das Rechteck, das durch die Quartile Q_{25} und Q_{75} bestimmt ist, wird als Box bezeichnet. Durch die Länge der Box ist der Interquartilsabstand (interquartile range, IQR) abzulesen. Dieser Bereich umfasst 50 % der Verteilung der Werte und ist Maß der Streuung, welche durch die Differenz des oberen und unteren Quartils (Q_{25} und Q_{75}) bestimmt ist. Als weiteres Quantil ist der Median (Zentralwert Q_{50}) in der Box eingezeichnet, welcher durch seine Lage innerhalb der Box einen Eindruck von der Schiefe der den Daten zugrunde liegenden Verteilung vermittelt. Der Median mittelt die Verteilung der Werte in jeweils zwei gleichgroße Teile und darf daher nicht mit dem Mittelwert verwechselt werden. Als Whisker werden die horizontalen Linien bezeichnet. Die Länge der Whisker beträgt maximal das 1,5-fache des Interquartilsabstands ($+1,5 \times \text{IQR}$: „oberer Whisker“ und $-1,5 \times \text{IQR}$: „unterer Whisker“). Werte, die über dieser Grenze liegen, werden separat in das Diagramm eingetragen und als Ausreißer bezeichnet. Ausreißer, die zwischen $\pm 1,5 \times \text{IQR}$ und $\pm 3 \times \text{IQR}$ liegen werden als („milde“) Ausreißer bezeichnet und mit einem Kreis gekennzeichnet. Werte, die über $\pm 3 \times \text{IQR}$ liegen, werden dagegen als Extremwerte („extreme“ Ausreißer) mit einem Stern gekennzeichnet.

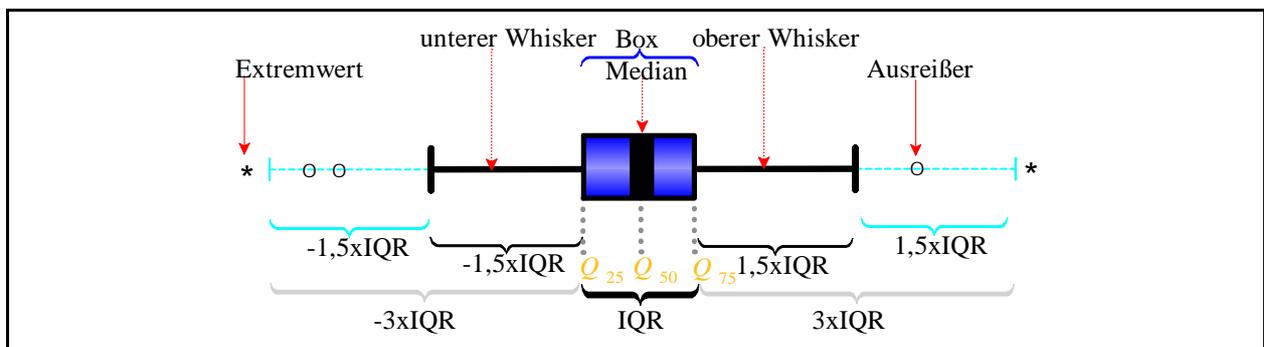


Abb. 28: Box-and-whisker plot

4.15 Chronologischer Ablauf der Versuchsdurchführungen

Nachfolgend sind die Versuchsdurchführungen zusammenfassend in chronologischem Ablauf dargestellt. Zur besseren Übersicht wird der chronologische Ablauf der Versuchsdurchführungen im Anschluss daran in Tabelle 10 grafisch dargestellt.

Zwei Wochen vor Versuchsbeginn wurden die Versuchszähne, aufgeteilt in acht Versuchsgruppen, in künstlichem Speichel gelagert. Zum darauf folgenden Zeitpunkt m_0 wurden Farbbestimmungen, verblindet mit konventioneller Farbskala und computergestützt mit SpectroShade, durchgeführt. Im Rahmen der computergestützten Farbbestimmung mit dem SpectroShade-Farbmessgerät wurden während jedem Farbmessungsdurchgang je Zahn jeweils drei Messungen durchgeführt. Auf diese Farbbestimmungen folgten die Knoop-Mikrohärtemessungen. Hierbei wurden für jede Gruppe pro Messungsdurchgang ebenso drei Messungen durchgeführt. Anschließend wurde der Bleichvorgang zeitlich entsprechend den Herstellerangaben der jeweiligen Home-Bleachings *in vitro* mit den Materialien der jeweiligen Gruppen innerhalb von 14 Tagen durchgeführt. Lediglich bei der Gruppe 7 (BK) betrug das Bleichintervall entsprechend der Herstellerangaben 21 Tage. 24 Stunden nach Abschluss der Bleichbehandlungen zum Zeitpunkt m_1 folgten wieder die verblindete Farbbestimmung mit der konventionellen Farbskala und die computergestützte Farbmessung mit SpectroShade (3×). Danach wurden erneut Knoop-Mikrohärtemessungen (3×) der Versuchszähne vorgenommen. Eine weitere Bestimmung der Knoop-Mikrohärte der Proben folgte zum Zeitpunkt m_2 nach weiteren sechs Wochen (3×).

Während jedes Bleichvorganges wurden die Versuchszähne, die mit den jeweiligen Bleichsystemen behandelt wurden, mit in künstlichem Speichel getränkten Tüchern überdeckt. Nach jedem Bleichvorgang wurden die Versuchszähne unter fließendem Leitungswasser mit einer extraweichen Zahnbürste⁶⁷ gereinigt. Es wurde bewusst eine extraweiche Zahnbürste gewählt, um die Validität der Ergebnisse nicht durch Putzabtrag der Zahnoberfläche zu gefährden. In der Zwischenzeit befanden sich die Versuchszähne permanent bei 37 °C in künstlichem Speichel im Brutschrank⁶⁸.

⁶⁷ Meridol® Zahnbürste(mikrofein), GABA, Münchenstein, CH

⁶⁸ Wärmeschrank BR 6000, Fa. Heraeus Kulzer, Wehrheim, D

Tab. 10: Versuchsdurchführungen

	Zeitpunkt (Gruppe)	durchgeführte Tätigkeit	verwendetes Gerät
↓	m0	Farbbestimmung visuell (1×) Farbbestimmung computergestützt (3×) Farbbestimmung computergestützt (3×) Knoop-Mikrohärtemessungen (3×)	Chromascop Complete-Farbskala SpectroShade (Chromascop Complete-Farbskala) SpectroShade (Vita Classic-Farbskala) Klein-Härteprüfer Durimet
↓	14 Tage (1-6, 8)	Bleichvorgang	entsprechend den Herstellerangaben
↓	21 Tage (7)	Bleichvorgang	entsprechend den Herstellerangaben
↓	m1	Farbbestimmung visuell (1×) Farbbestimmung computergestützt (3×) Farbbestimmung computergestützt (3×) Knoop-Mikrohärtemessungen (3×)	Chromascop Complete-Farbskala SpectroShade (Chromascop Complete-Farbskala) SpectroShade (Vita Classic-Farbskala) Klein-Härteprüfer Durimet
↓	6 Wochen	↓	↓
	m2	Knoop-Mikrohärtemessungen (3×)	Klein-Härteprüfer Durimet

5. ERGEBNISSE

5.1. pH-Werte der verwendeten Bleichmaterialien

Bei dem „whitening gel“ des Produkts Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (BK) wurde ein pH-Wert von 3,7 gemessen (Gruppe 7). Dieser Wert stellt den geringsten pH-Wert aller in dieser Studie untersuchten Bleichprodukte dar. Der höchste pH-Wert (7,34) ergab sich bei dem „accelerator gel“, welches ebenso einen Bestandteil des Drei-Komponenten-Systems Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur darstellt (Gruppe 7). Ein ähnlicher pH-Wert (7,05) wurde beim Zahnaufhellungslack VivaStyle Paint On der Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 4 (VSPO3) gemessen. Das Homebleaching-Produkt VivaStyle (VS) mit 10% Carbamidperoxid erreichte einen pH-Wert von 6,0. Die 5,9 % Wasserstoffperoxid enthaltenden Bleichprodukte Colgate Simply White (SW) und Blend-a-med Whitestrips (WS) hatten ähnlich hohe pH-Werte (4,7 sowie 5,2). Die pH-Werte für jedes in dieser Studie untersuchte Produkt werden in der Tabelle 11 dargestellt. Der pH-Wert des Leitungswassers, das in der Kontrollgruppe (KTRL) benutzt wurde, betrug 7,26. Es wurde darüber hinaus ein Wert von 2,49 bei der pH-Messung von Coca-Cola⁶⁹ gemessen.

Tab. 11: pH-Werte der verwendeten Bleichmaterialien (Mittelwerte)

Gruppe	Produkt	Abkürzung	pH-Wert
1	VivaStyle Paint On	VSPO1	7,05
2	VivaStyle Paint On	VSPO2	7,05
3	Colgate Simply White	SW	4,7
4	VivaStyle Paint On	VSPO3	7,05
5	VivaStyle	VS	6,0
6	Blend-a-med Whitestrips	WS	5,2
7	Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur: -accelerator gel	BK	7,3
7	Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur: -whitening gel	BK	3,7
8	Kontrollgruppe (H ₂ O)	KTRL	7,26

⁶⁹ Coca-Cola Deutschland Verkauf GmbH & Co. KG, Berlin, D

5.2 Spectroshade

5.2.1 Chromascop Complete-Farbskala

Die statistischen Auswertungen zeigen, dass die durch das Spektralphotometer mit den Parametern der Chromascop Complete-Skala ermittelten Messwerte in den Gruppen 1 bis 7 nach dem zweiten Messintervall (m1) im Bezug auf die Werte der ersten Messung (m0) signifikant verringert waren ($p < 0,05$; t-Test), während in der Kontrollgruppe (Gruppe 8) kein bedeutender Unterschied ($p > 0,05$) auftrat. Die Mittelwerte der Messungen von m0 und m1 mit den jeweiligen Standardabweichungen sind aus der Tabelle 12 ersichtlich. Zusätzlich werden in dieser Tabelle die Differenzen der Mittelwerte (m0-m1) mit den jeweiligen p-Werten angegeben.

Tab. 12: Ergebnisse der computergestützten Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala (CC) zu den Messzeitpunkten m0 und m1

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW in CC-Rängen	SD in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der MW in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der SD in CC-Rängen	p-Wert der Differenz
1 (VSPO1)	m0	36	23,2	1,4	9,6	4,3	<0,0005
	m1	36	13,7	4,5			
2 (VSPO2)	m0	36	22,8	2,7	9,6	4,3	<0,0005
	m1	36	12,9	4,6			
3 (SW)	m0	36	22,3	2,6	13,6	4,3	<0,0005
	m1	36	8,8	3,8			
4 (VSPO3)	m0	36	23,5	1,1	8,9	3,9	<0,0005
	m1	36	14,6	4,4			
5 (VS)	m0	36	22,9	1,9	11,8	4,5	<0,0005
	m1	36	11,2	5,0			
6 (WS)	m0	36	22,2	3,9	15,1	4,3	<0,0005
	m1	36	7,1	2,9			
7 (BK)	m0	36	22,3	2,4	5,7	3,0	<0,0005
	m1	36	16,6	4,7			
8 (KTRL)	m0	36	23,2	1,7	0,0	0,0	1,000
	m1	36	23,2	1,7			

Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) (angegeben in Farbrängen auf der CC-Farbskala) sowie deren Differenzen (in Farbabstufungen auf der CC-Farbskala) mit p-Wert ($p \leq 0,05$: signifikanter Wert, t-Test), n = Anzahl der Proben

Der größte Unterschied der Messwerte von m0 zu m1 ergab sich in der Gruppe 6, in der das Produkt Blend-a-med Whitestrips (WS) verwendet wurde. Die Differenz der Messwerte m0 zu m1 betrug $15,1 \pm 4,3$ Farbabstufungen der Chromascop Complete-Farbskala. In absteigender

Reihenfolge der Messwertdifferenzen m0 zu m1 wurden für den „Paint-on“-Lack Colgate Simply White (SW) der Gruppe 3 ($13,6 \pm 4,3$), das Schienenbleichverfahren VivaStyle (VS) der Gruppe 5 ($11,8 \pm 4,5$) und den zweimal täglich für 20 Minuten angewendeten „Paint-on“-Lack VivaStyle Paint On (VSPO2) der Gruppe 2 ($10,0 \pm 3,9$) immer geringere Veränderungen festgestellt. Darauf folgten die Messwerte der Gruppen 1 ($9,6 \pm 4,3$) und der Gruppe 4 ($8,9 \pm 3,9$). In diesen wurde das Produkt VivaStyle Paint On jeweils einmal täglich für 20 Minuten (VSPO1) beziehungsweise zweimal täglich für 5 Minuten (VSPO3) verwendet. In beiden Gruppen wurde eine ähnliche Differenz der Messwerte m0 zu m1 festgestellt. Für das Drei-Komponenten-System Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (BK), welches in der Gruppe 7 verwendet wurde, ergab sich die niedrigste Differenz (m0-m1) aller untersuchten Bleichmittel ($5,7 \pm 3,0$). Die Messwerte der Gruppe 8 (KTRL) veränderten sich nicht (0 ± 0). Die Ergebnisse der Tabelle 12 sind in der Abbildung 29 grafisch als Box-and-whisker plots zu den Zeitpunkten m0 und m1 dargestellt.

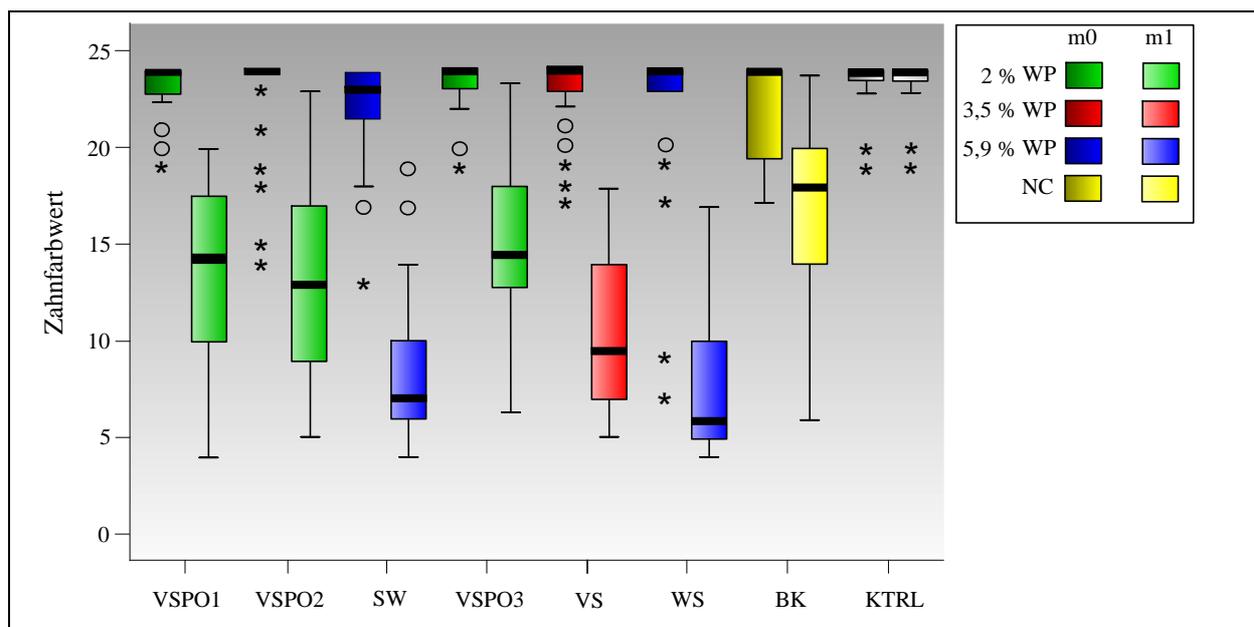


Abb. 29: Zahnfarbwerte der computergestützten Farbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala zu den Zeitpunkten m0 und m1 für alle Gruppen (1 bis 8, n=36) als Box-and-whisker plots mit jeweiligen Quartilen und Medianen (dicke schwarze Linien), die Ordinate gibt die Farbränge der Chromascop Complete-Skala von hell (1) bis dunkel (24) wieder. Ausreißer sind als Kreise dargestellt. Sterne kennzeichnen Extremwerte. WP=Wasserstoffperoxid, NC=Natriumchlorit.

In der folgenden Tabelle 13 sind die p-Werte der Einzelvergleiche der Farbwertveränderungen, die mit dem Mann-Whitney-U-Test (mit Bonferroni-Korrektur) ermittelt wurden, ersichtlich. Hierbei wurden die Differenzen zwischen den Mittelwerten der Messungen m0 und m1 (als Maß für die Änderung der Farbwerte) von allen acht Gruppen paarweise miteinander verglichen. Beide Darstellungen zeigen, dass sich die Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 4 (VSPO3), in

denen der „Paint-on“-Lack mit der niedrigsten Wasserstoffperoxidkonzentration (2 %) unterschiedlich lange angewendet wurde, nicht signifikant voneinander unterschieden ($p < 0,0018$). Ebenso wurde kein signifikanter Unterschied zwischen diesen drei Gruppen und dem 3,3 % Wasserstoffperoxid enthaltenden Homebleaching-Produkt VivaStyle der Gruppe 5 (VS) aufgedeckt. Demgegenüber unterschieden sich aber die Messwerte der Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 4 (VSPO3) signifikant von den Messwerten der Gruppen 3 (SW) und 6 (WS), in denen Präparate mit einer höheren Konzentrationen von 5,9 % Wasserstoffperoxid angewendet wurden.

Zwischen den 3,3 % und 5,9 % Wasserstoffperoxid enthaltenden Produkten VivaStyle (VS) und Blend-a-med3 Whitestrips (WS) war ein signifikanter Unterschied auszumachen. Das ebenfalls 5,9 % Wasserstoffperoxid enthaltende Produkt Colgate Simply White (SW) unterschied sich konträr dazu jedoch nicht signifikant von dem 3,3 % Wasserstoffperoxid enthaltenden Produkt VivaStyle (VS). Die Produkte der Gruppen 3 (SW) und 6 (WS), die beide eine Wasserstoffperoxidkonzentration von 5,9 % aufweisen, unterschieden sich bezüglich der gemessenen Differenzen der Farbwerte nicht signifikant voneinander. Die Differenzwerte der Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2), 3 (SW), 4 (VSPO3), 5 (VS) und 6 (WS) unterschieden sich signifikant von denen der Gruppe 7 (BK), in der das auf Natriumchlorit basierende Bleichprodukt Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur verwendet wurde ($p < 0,0018$). Die Differenzen der Farbmesswerte von m_0 zu m_1 aller in dieser Studie untersuchten Bleichmittel (Gruppe 1–7) unterschieden sich signifikant von der Kontrollgruppe (KTRL), in der die Proben in Leitungswasser gelagert wurden.

Tab. 13: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen m_0 - m_1 zwischen den acht Gruppen (Mann-Whitney-U-Test, Bonferroni) bei computergestützter Farbbestimmung mit Chromascope Complete-Farbskala

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,505						
3 (SW)	<0,0005	0,001					
4 (VSPO3)	0,672	0,279	0,001				
5 (VS)	0,029	0,073	0,105	0,007			
6 (WS)	<0,0005	<0,0005	0,102	<0,0005	<0,0005		
7 (BK)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	
8 (KTRL)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005

$p \leq 0,0018$ = signifikanter Wert

In dieser Studie wurde mit dem SpectroShade-Farbmessgerät (Chromascope Complete-Skala) festgestellt, dass alle verwendeten Bleichmittel *in vitro* eine Aufhellung der Versuchszähne bewirkten. Die höchste Aufhellungseffektivität war bei dem Foliensystem der Gruppe 6 (Blend-a-med Whitestrips), die niedrigste Aufhellungseffektivität bei dem Produkt der Gruppe 7 (Odol-

med3 Samtweiss Beauty-Kur) zu erkennen. Bei der Kontrollgruppe mit Leitungswasser wurde keine signifikant bedeutsame Aufhellung beobachtet ($p > 0,05$; t-Test).

5.2.2 Vita Classic-Farbskala

Im Rahmen der statistischen Auswertungen der Daten, die mit der Vita Classic-Farbskala durch das Spektralphotometer bestimmt wurden, zeigte der Vergleich der Messwerte m_0 und m_1 in allen Gruppen, in denen Bleichmittel zur Anwendung gekommen waren, eine Verringerung der Messwerte zum Zeitpunkt m_1 ($p < 0,05$; t-Test). In der Gruppe 8 (Kontrollgruppe) kam es dagegen zu keiner bedeutenden Verringerung der Werte ($0,03 \pm 0,2$ Farbabstufungen der Vita Classic-Farbskala, $p > 0,05$; t-Test). Die Mittelwerte der Messungen von m_0 und m_1 mit den jeweiligen Standardabweichungen sind in der Tabelle 14 dargestellt. Zusätzlich werden in dieser Tabelle die Differenzen der Mittelwerte ($m_0 - m_1$) sowie die dazu gehörenden p-Werte angegeben.

Tab. 14: Ergebnisse der computergestützten Farbbestimmung mit Vita Classic- Farbskala (VC) zu den Messzeitpunkten m_0 und m_1

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW in CC-Rängen	SD in CC-Rängen	Differenz ($m_0 - m_1$) der MW in CC-Rängen	Differenz ($m_0 - m_1$) der SD in CC-Rängen	p-Wert der Differenz
1 (VSPO1)	m_0	36	15,9	0,5	6,6	4,1	<0,0005
	m_1	36	9,3	4,2			
2 (VSPO2)	m_0	36	15,3	2,1	6,1	3,9	<0,0005
	m_1	36	9,2	4,2			
3 (SW)	m_0	36	15,3	2,0	9,8	3,4	<0,0005
	m_1	36	5,4	3,0			
4 (VSPO3)	m_0	36	15,9	0,5	5,8	3,6	<0,0005
	m_1	36	10,1	3,8			
5 (VS)	m_0	36	15,6	1,2	7,3	4,0	<0,0005
	m_1	36	8,3	4,3			
6 (WS)	m_0	36	15,5	1,3	11,3	2,2	<0,0005
	m_1	36	4,2	2,2			
7 (BK)	m_0	36	16,0	0	4,4	4,3	<0,0005
	m_1	36	11,6	4,3			
8 (KTRL)	m_0	36	15,9	0,3	0,03	0,2	0,324
	m_1	36	15,9	0,4			

Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) (angegeben in Farbrängen auf der CC-Farbskala) sowie deren Differenzen (in Farbabstufungen auf der CC-Farbskala) mit p-Wert ($p \leq 0,05$: signifikanter Wert, t-Test), n = Anzahl der Proben

Die größte Differenz der Messwerte wurde nach der Verwendung des Bleichmittels Blend-a-med Whitestrips (WS) in der Gruppe 6 gefunden ($11,3 \pm 2,2$). Die geringste Differenz der Mittelwerte von m0 zu m1 wurde nach der Verwendung des Produktes Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (BK) in der Gruppe 7 ($4,4 \pm 4,3$) gefunden. Zwischen den Werten der Gruppe 6 und Gruppe 7 konnten in absteigender Reihenfolge der Differenzen der Mittelwerte die Messwerte der Gruppen 3 (SW: $9,8 \pm 3,4$), 5 (VS: $7,3 \pm 4,0$), 1 (VSPO1: $6,6 \pm 4,1$), 2 (VSPO2: $6,1 \pm 3,9$) und 4 (VSPO3: $5,8 \pm 3,6$) ausgemacht werden. Die Ergebnisse der Tabelle 14 sind in der Abbildung 30 grafisch als Box-and-whisker plots zu den Zeitpunkten m0 und m1 dargestellt.

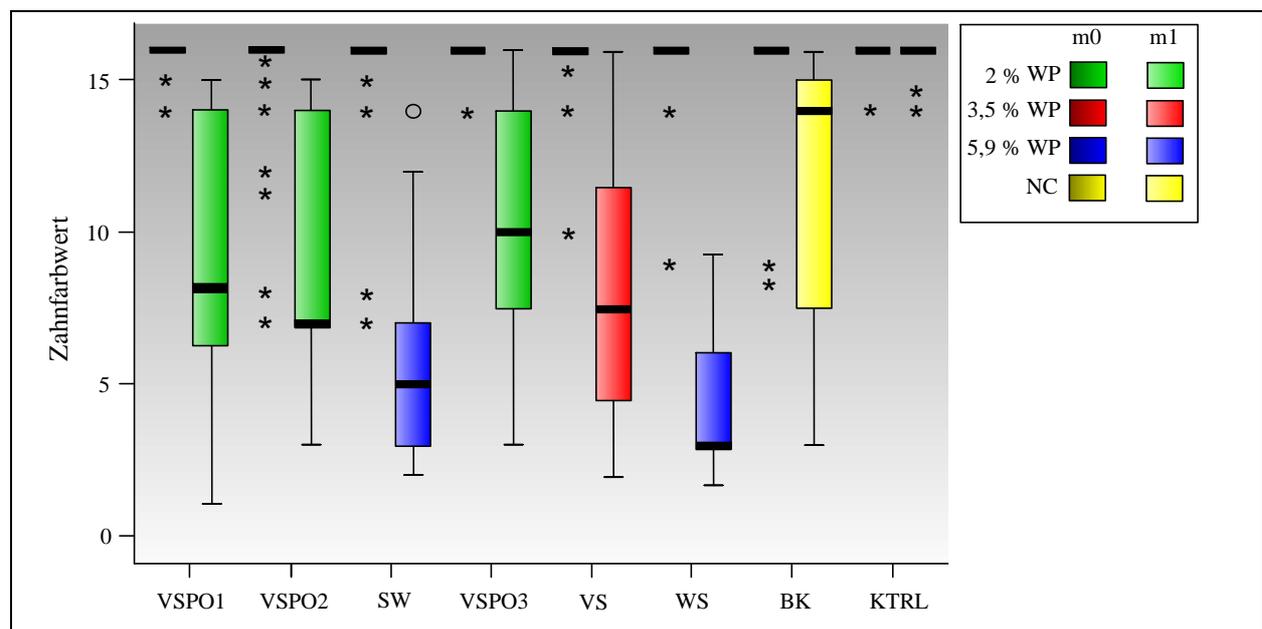


Abb. 30: Zahnfarbwerte der computergestützten Farbbestimmung mit Vita-Farbskala zu den Zeitpunkten m0 und m1 für alle Gruppen (1 bis 8, n=36) als Box-and-whisker plots mit jeweiligen Quartilen und Medianen (dicke schwarze Linien), die Ordinate gibt die Farbränge der Vita-Farbskala von hell (1) bis dunkel (16) wieder, Ausreißer sind als Kreise dargestellt, Sterne kennzeichnen Extremwerte, WP=Wasserstoffperoxid, NC=Natriumchlorit.

In der folgenden Tabelle 15 sind die p-Werte der Einzelvergleiche der Farbwertveränderungen, die mit dem Mann-Whitney-U-Test (mit Bonferroni-Korrektur) ermittelt wurden, ersichtlich. Hierbei wurden die Differenzen zwischen den Mittelwerten der Messungen m0 und m1 (als Maß für die Änderung der Farbwerte) von allen acht Gruppen paarweise miteinander verglichen. Signifikante Werte ($p < 0,0018$) sind hierbei dunkel unterlegt. Beide Darstellungen zeigen, dass sich die Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2), 4 (VSPO3) und 5 (VS), in denen die Bleichprodukte VivaStyle Paint On und VivaStyle mit den niedrigen Wasserstoffperoxid-Konzentrationen von 2 % und 3,3 % unterschiedlich lange angewendet wurden, nach der Farbbestimmung mit der Vita Classic-Farbskala, nicht signifikant voneinander unterschieden. Die Messwerte der Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 4 (VSPO3) unterschieden sich jedoch signifikant von den

Messwerten der Gruppen 3 und 6, in denen die Präparate Colgate Simply White (SW) und Blend-a-med Whitestrips (WS) mit der höheren Konzentration von jeweils 5,9 % angewendet wurden. Die Gruppe 6 (WS) unterschied sich signifikant von der Gruppe 5 (VS). Die Werte der Gruppen 3 (SW) und 6 (WS) unterschieden sich nicht statistisch bedeutsam voneinander. Demgegenüber unterschieden sich jedoch die Gruppe 3 (SW) und die Gruppe 6 (WS) signifikant von der Gruppe 7, in der das auf Natriumchlorit basierende Bleichprodukt Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (BK) verwendet wurde. Die Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2), 4 (VSPO3) und 5 (VS) unterschieden sich dagegen nicht signifikant von der Gruppe 7 (BK). Alle Gruppen, in denen Bleichpräparate verwendet wurden (Gruppen 1-7), unterschieden sich signifikant von der Gruppe 8 (KTRL), in der die Proben in Leitungswasser gelagert wurden.

Tab. 15: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen m0-m1 zwischen den acht Gruppen (Mann-Whitney-U-Test, Bonferroni) bei computergestützter Farbbestimmung mit Vita Classic-Farbskala

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,793						
3 (SW)	<0,0005	<0,0005					
4 (VSPO3)	0,359	0,585	<0,0005				
5 (VS)	0,465	0,217	0,005	0,091			
6 (WS)	<0,0005	<0,0005	0,101	<0,0005	<0,0005		
7 (BK)	0,013	0,031	<0,0005	0,088	0,004	<0,0005	
8 (KTRL)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005

p≤0,0018 = signifikanter Wert

Folglich wurde in dieser Studie nach der Durchführung der computergestützten Messung mit der Vita Classic-Farbskala festgestellt, dass alle verwendeten Bleichmittel *in vitro* eine Aufhellung der Versuchszähne bewirken. Die höchste Aufhellungseffektivität wurde bei dem Folienbleichsystem Blend-a-med Whitestrips, die niedrigste Aufhellungseffektivität bei dem Dreikomponenten-System Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur erkannt. Bei der Kontrollgruppe mit Leitungswasser wurde keine Veränderung beobachtet (p<0,05).

Im Gegensatz zur computergestützten Farbbestimmung mit der Chromascop Complete-Skala, wurde bei der computergestützten Farbmessung mit der Vita Classic-Skala kein signifikanter Unterschied zwischen dem niedrig konzentrierten „Paint-on“-Lack VivaStyle Paint on und dem Natriumchlorit enthaltenden Bleichmittel Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur festgestellt.

5.3 Farbmessung mit konventioneller Farbskala

Wie aus der Tabelle 16 ersichtlich wird, zeigten die statistischen Auswertungen, dass die visuell mit Chromascop Complete-Farbskala gemessenen Werte zum Zeitpunkt der zweiten Messung (m1) im Bezug auf die Messungen vor den Bleichvorgängen (m0) in allen Gruppen erheblich ($p < 0,05$; t-Test) verringert waren. Die Mittelwerte der Messwerte der visuellen Farbestimmung mit den korrespondierenden Standardabweichungen sowie die p-Werte der Differenz der Mittelwerte von m0 zu m1 sind in der Tabelle 16 zusammengefasst.

Tab. 16: Ergebnisse der visuellen Farbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala (CC) zu den Messzeitpunkten m0 und m1

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW in CC-Rängen	SD in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der MW in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der SD in CC-Rängen	p-Wert der Differenz
1 (VSPO1)	m0	36	22,1	1,4	10,8	3,0	<0,0005
	m1	36	11,3	2,6			
2 (VSPO2)	m0	36	22,2	2,8	10,4	4,5	<0,0005
	m1	36	11,8	4,2			
3 (SW)	m0	36	21,7	2,8	13,8	3,3	<0,0005
	m1	36	7,9	2,1			
4 (VSPO3)	m0	36	23,0	0,9	10,8	2,6	<0,0005
	m1	36	12,2	2,6			
5 (VS)	m0	36	23,0	0,9	12,9	3,3	<0,0005
	m1	36	10,1	3,2			
6 (WS)	m0	36	21,7	2,9	14,1	3,7	<0,0005
	m1	36	7,6	2,8			
7 (BK)	m0	36	21,7	2,9	8,9	3,8	<0,0005
	m1	36	12,8	3,6			
8 (KTRL)	m0	36	22,8	1,8	1,5	1,9	<0,0005
	m1	36	21,3	2,4			

Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) (angegeben in Farbrängen auf der CC-Farbskala) sowie deren Differenzen (in Farbabstufungen auf der CC-Farbskala) mit p-Wert ($p \leq 0,05$: signifikanter Wert, t-Test), n = Anzahl der Proben

Der größte Unterschied der Messwerte war nach Verwendung des Folienbleichsystems Blend-a-med Whitestrips (WS) auszumachen ($14,1 \pm 3,7$ Farbabstufungen der Chromascop Complete-Farbskala). Die Differenz der Mittelwerte von m0 zu m1 unterschied sich hiervon nur geringfügig ($13,8 \pm 3,3$) in der Gruppe 3 (Colgate Simply White). Diesen Werten folgen die der Gruppe 5 (VS: $12,9 \pm 3,3$), in der das Produkt VivaStyle verwendet wurde. In der Gruppe 1 (VSPO1: $10,8 \pm 3,0$), der Gruppe 4 (VSPO3: $10,8 \pm 2,6$) und der Gruppe 2 (VSPO2: $10,4 \pm 4,5$), in welchen das Zahnaufhellungsprodukt VivaStyle Paint On mit unterschiedlicher Anwendungs-

dauer untersucht wurde, ließen sich etwa die gleichen Verringerungen der Differenz der Mittelwerte von m0 zu m1 erkennen. Mit der visuellen Farbbestimmung mit der Chromascop Complete-Farbskala wurde in der Gruppe 7 die geringste Veränderung der Differenzen der Mittelwerte der untersuchten Bleichmittel festgestellt (Odol-med3 Saftweiss Beauty-Kur: $8,9 \pm 3,8$). Die Mittelwerte der Gruppe 8, welche als Kontrollgruppe eingerichtet war, verringern sich um $1,5 \pm 1,9$ Farbabstufungen auf der Chromascop Complete-Farbskala. Die Ergebnisse der Tabelle 16 sind in der Abbildung 31 grafisch als Box-and-whisker plots zu den Zeitpunkten m0 und m1 dargestellt.

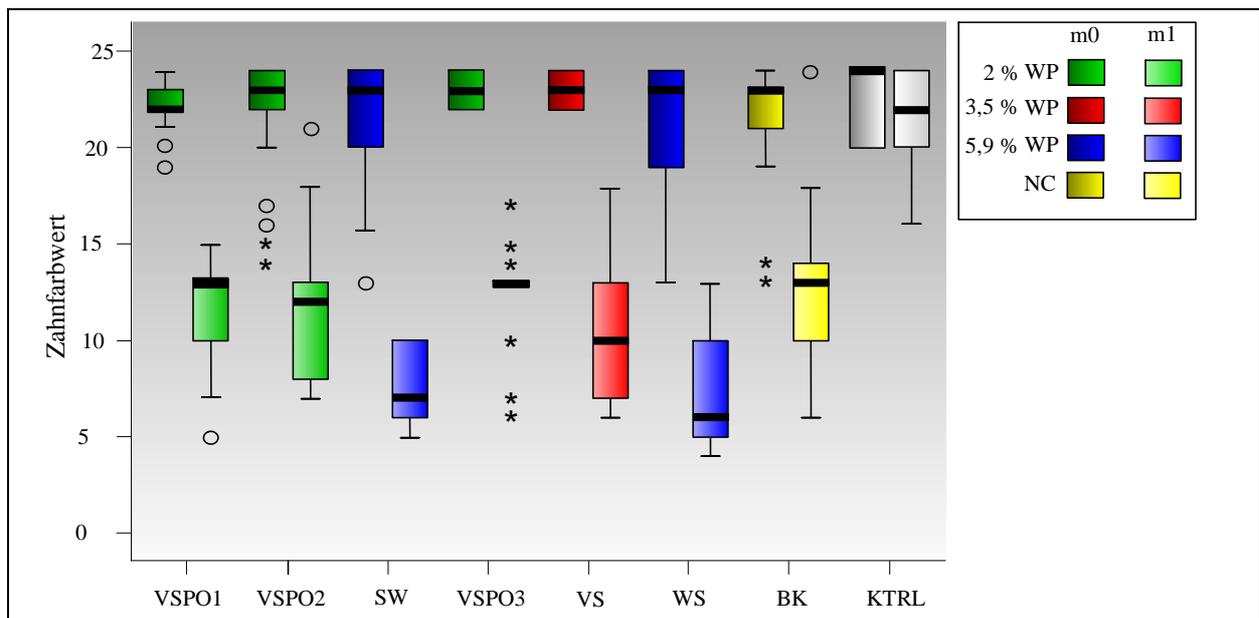


Abb. 31: Zahnfarbwerte der visuellen Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala zu den Zeitpunkten m0 und m1 für alle Gruppen (1 bis 8, n=36) als Box-and-whisker plots mit jeweiligen Quartilen und Medianen (dicke schwarze Linien), die Ordinate gibt die Farbränge der Chromascop Complete-Skala von hell (1) bis dunkel (24) wieder, Ausreißer sind als Kreise dargestellt, Sterne kennzeichnen Extremwerte, WP=Wasserstoffperoxid, NC=Natriumchlorit.

In der folgenden Tabelle 17 sind die p-Werte der Einzelvergleiche der Farbwertveränderungen, die mit dem Mann-Whitney-U-Test (mit Bonferroni-Korrektur) ermittelt wurden, ersichtlich. Hierbei wurden die Differenzen zwischen den Mittelwerten der Messungen m0 und m1 (als Maß für die Änderung der Farbwerte) von allen acht Gruppen paarweise miteinander verglichen. Signifikante Werte ($p < 0,0018$) sind hierbei dunkel unterlegt.

Beide Darstellungen lassen erkennen, dass sich die Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 4 (VSPO4), in denen das Produkt Vivastyle Paint On mit der niedrigsten Wasserstoffperoxidkonzentration (2% WP) unterschiedlich lange angewendet wurde, nicht signifikant voneinander unterscheiden. Demgegenüber unterschieden sich die Messwerte der Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 4 (VSPO3) signifikant von den Messwerten der Gruppen 3 und 6, in denen die

Präparate Colgate Simply White (SW) und Blend-a-med Whitestrips (WS) mit einer Konzentration von jeweils 5,9 % Wasserstoffperoxid angewendet wurden. Die visuelle Farbbestimmung deckte zwischen den beiden Gruppen 1 (VSPO1) und 4 (VSPO3) und der Gruppe 5, in der das Homebleaching-Produkt VivaStyle (VS) mit 3,3% Wasserstoffperoxid verwendet wurde, jeweils einen signifikanten Unterschied auf. Zwischen den Gruppen 2 (VSPO2) und 5 (VS) wurde jedoch kein bedeutsamer Unterschied gefunden. Die Gruppen 5 (VS), 3 (SW) und 6 (WS) unterschieden sich außerdem signifikant von Gruppe 7, in der das Bleichprodukt Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (BK) mit Natriumchlorit verwendet wurde. Die Differenzen der Messwerte (m0-m1) der Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 4 (VSPO3) unterschieden sich dagegen nicht bedeutsam von der Gruppe 7 (BK). Alle Gruppen, in denen Bleichpräparate verwendet wurden, unterschieden sich signifikant von der Gruppe 8, in der die Proben in Leitungswasser gelagert worden waren. Aus der Darstellung der Box-and-whisker plots zum Zeitpunkt m0 war im Vergleich mit den computergestützten Werten eine größere Streuung der Messwerte (baseline) zu erkennen.

Tab. 17: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen m0-m1 zwischen den acht Gruppen (Mann-Whitney-U-Test, Bonferroni) bei visueller Farbbestimmung mit Chromascope Complete-Farbskala

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,794						
3 (SW)	<0,0005	0,003					
4 (VSPO3)	0,902	0,581	<0,0005				
5 (VS)	0,001	0,012	0,347	<0,0005			
6 (WS)	<0,0005	0,001	0,747	<0,0005	0,217		
7 (BK)	0,034	0,063	<0,0005	0,035	<0,0005	<0,0005	
8 (KTRL)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005

p<0,0018 = signifikanter Wert

Die Auswertung der mit Chromascope Complete-Farbring gefundenen Messwerte dieser Studie zeigt, dass es bei allen verwendeten Bleichmitteln *in vitro* zu einer messbaren Aufhellung der Versuchszähne kam. Die höchste Aufhellungseffektivität war bei dem Produkt Blend-a-med Whitestrips, die niedrigste Aufhellungseffektivität bei dem Zahnaufhellungssystem Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur zu erkennen. Bei der Kontrollgruppe mit Leitungswasser wurde – im Gegensatz zu den mittels SpectroShade gefundenen Messwerten – eine signifikante Aufhellung beobachtet (p>0,05).

5.4 Übereinstimmungen der unterschiedlichen Farbmessmethoden

Beim direkten Vergleich der beiden Chromascope Complete-Farbbestimmungsmethoden (visuell und Spektralphotometer) kam es in 45,8 % der Fälle zu einer Übereinstimmung der Messwerte. Mit der visuellen Farbmessmethode wurden jedoch durchschnittlich höhere Messwerte als mit der digitalen Farbmessung gemessen. Die Mittelwerte der bestimmten Zahnfarben waren nach der visuellen Farbmessung durchschnittlich um $1,2 \pm 5,2$ Farbränge höher als nach Anwendung der computergesteuerten Farbmessung. Die computergesteuerte Farbmessung führte durchschnittlich in allen Fällen außer in Gruppe 6 zu geringeren Messwerten (Tab. 12, 16). Der Korrelationskoeffizient nach Spearman für die visuell und computergestützt bestimmten Chromascope Complete-Werte betrug $r=0,9$ ($p<0,01$). In der Abbildung 32 sind diese Werte als Streudiagramm dargestellt. Die visuell und computergestützt bestimmten Chromascope Complete-Farbmesswerte wurden zusätzlich jeweils mit den computergestützt bestimmten Vita Classic-Farbmesswerten korreliert (Abb. 33, 34). Dabei betrug der Korrelationskoeffizient nach Spearman für die Werte der visuellen Farbmessung mit Chromascope Complete-Skala und den computergestützt ermittelten Vita Classic-Farbmesswerten $r=0,83$ ($p<0,01$). Der Korrelationskoeffizient nach Spearman für die computergestützten Farbmesswerte, die zum einen mit Chromascope Complete-Skala und zum anderen mit der Vita Classic-Skala bestimmt worden waren, betrug $r=0,8$ ($p<0,01$).

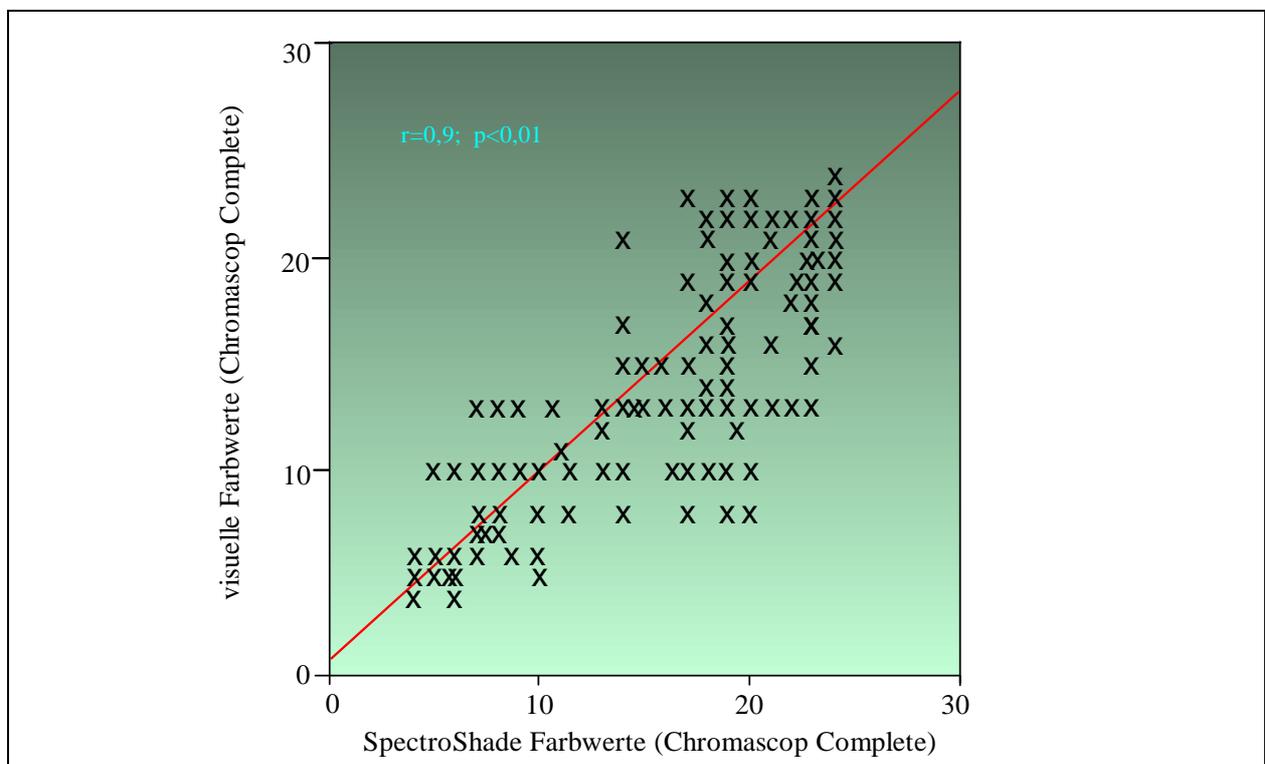


Abb. 32: Streudiagramm der visuell und computergestützt bestimmten Chromascope Complete-Zahnfarbwerte mit Korrelationsgerade, Korrelationskoeffizient (Spearman) und p-Wert.

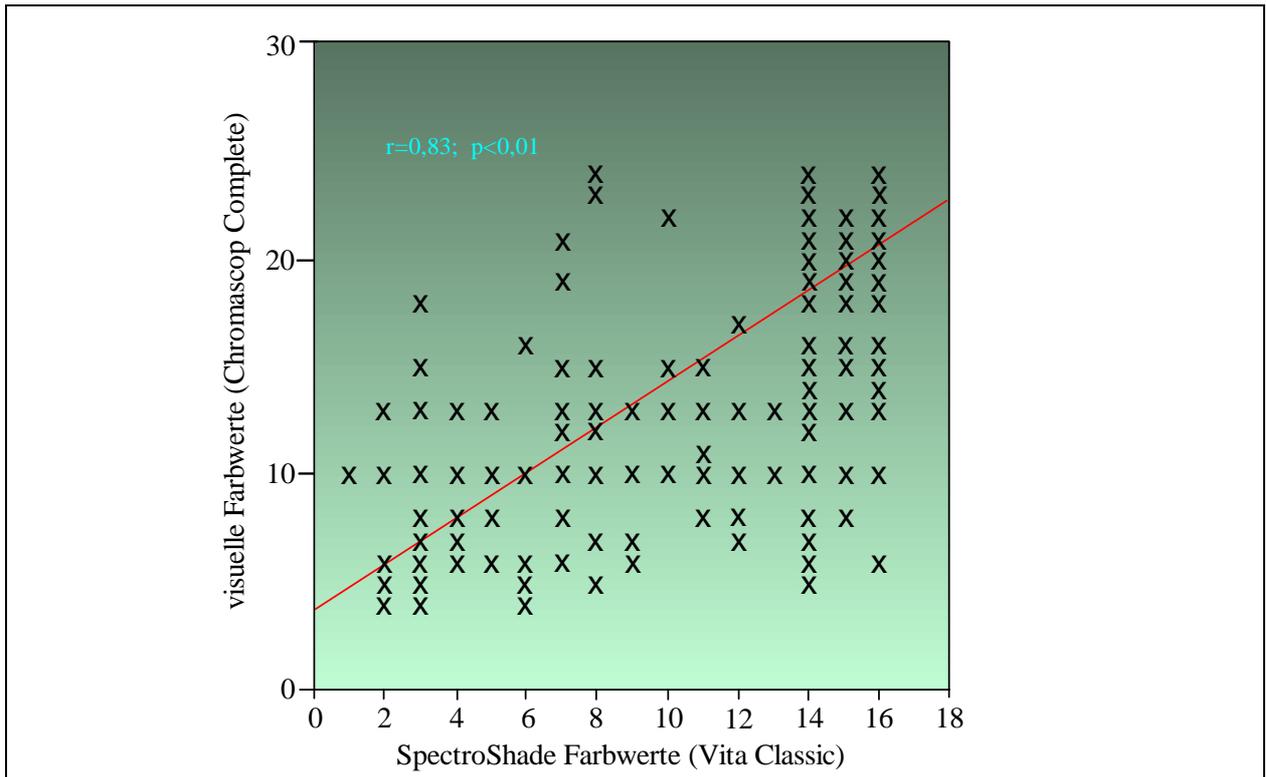


Abb. 33: Streudiagramm der visuell bestimmten Chromascop Complete-Farbwerte und der computergestützt bestimmten Vita Classic-Farbwerte mit Korrelationsgerade, Korrelationskoeffizient (Spearman) und p-Wert.

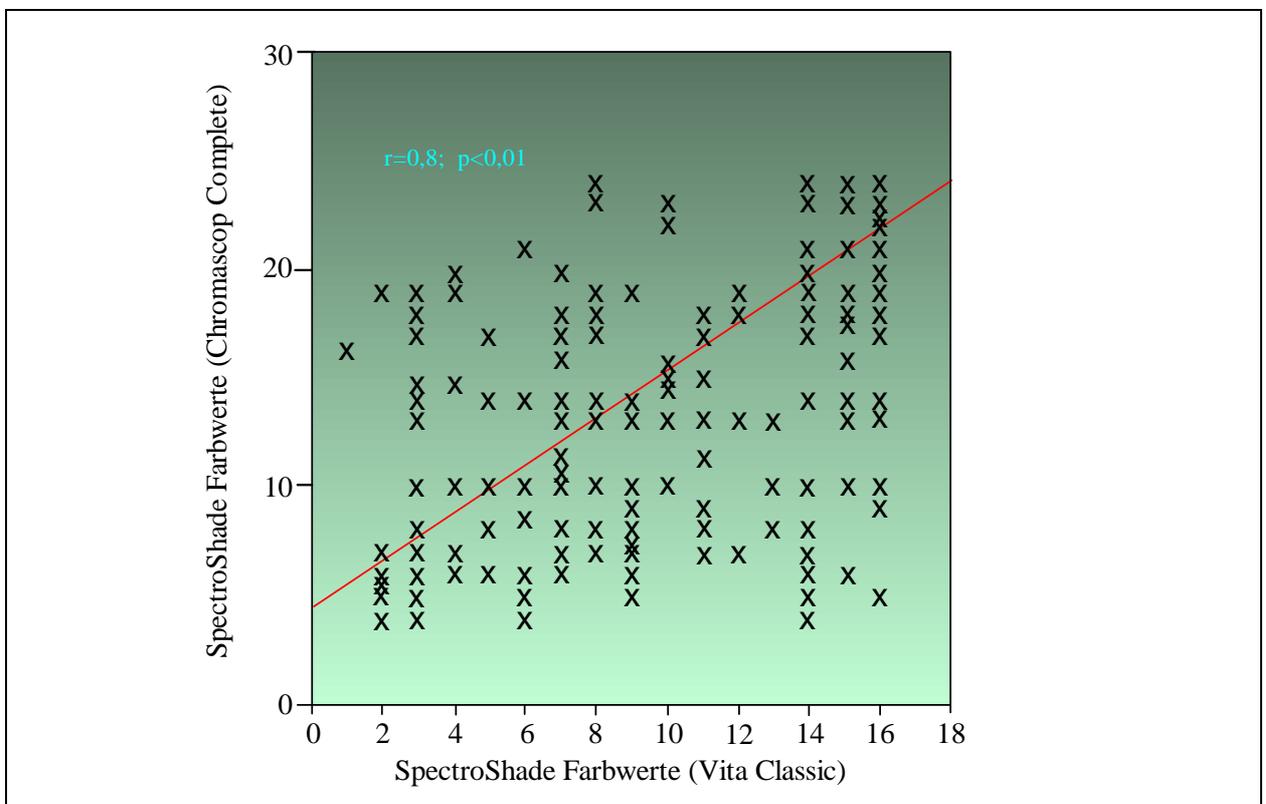


Abb. 34: Streudiagramm der computergestützt bestimmten Chromascop Complete und Vita Classic-Zahnfarbwerte mit Korrelationsgerade, Korrelationskoeffizient (Spearman) und p-Wert.

5.5 Knoop-Mikrohärte

Als Grundwerte (m_0) wurden Werte von 254 KHN (± 60 ; Gruppe 3) bis 305 KHN (± 88 ; Gruppe 5) festgestellt. Die Mikrohärtewerte für das zweite Messintervall (m_1) nach der Bleichbehandlung betragen zwischen 113 KHN (± 20 ; Gruppe 7: Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur) und 292 KHN (± 80 ; Gruppe 5: VivaStyle). Für die Messungen nach Lagerung im künstlichen Speichel (m_2) betragen die Werte zwischen 177 KHN (± 35 ; Gruppe 7: Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur) und 314 KHN (± 82 ; Gruppe 5: VivaStyle). Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Messungen der Knoop-Mikrohärte auf den Schmelzoberflächen zu den Zeitpunkten m_0 , m_1 und m_2 sind in den Tabellen 18 a und b dargestellt. Ebenso sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen der Knoop-Mikrohärtewerte zwischen der Messung vor und nach der Bleichbehandlung (m_0-m_1), nach Bleichbehandlung und Lagerung in künstlichem Speichel (m_1-m_2) und innerhalb des gesamten Intervalls der Versuchsdurchführungen (m_0-m_2) in den Tabellen 18 a und b wiedergegeben. Zudem sind für die Differenzen der Messwerte die entsprechenden p-Werte angegeben, wobei signifikante Werte besonders hervorgehoben sind.

Die statistischen Auswertungen zeigen, dass sich die Mikrohärtewerte in den Gruppen 3, 6 und 7, in denen die Bleichprodukte Colgate Simply White (SW), Blend-a-med Whitestrips (WS) und Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (BK) verwendet wurden, nach der Bleichbehandlung im Bezug zu den Grundwerten (m_0-m_1) erheblich verringerten ($p < 0,001$; Wilcoxon-Test). Demgegenüber waren in den Gruppen 1, 2 und 4, in denen der Bleichlack VivaStyle Paint On (VSPO 1, 2, 3) unterschiedlich lange verwendet wurde, keine signifikanten Differenzen der Werte nach der Bleichbehandlung (m_1) in Bezug zu den Grundwerten (m_0) zu beobachten ($p > 0,006$). Auch für das schienenbasierte Homebleaching VivaStyle (VS), das in der Gruppe 5 verwendet wurde, ergaben sich im Intervall m_0-m_1 keine signifikanten Unterschiede ($p > 0,006$). Die Werte der Kontrollgruppe (KTRL) veränderten sich hierbei ebenfalls nicht signifikant ($p > 0,006$).

Die Auswertungen der Messreihen unmittelbar nach der Bleichbehandlung (m_1) und nach der sechswöchigen Lagerung in künstlichem Speichel (m_2) deckten signifikante Unterschiede für die Messwerte der Gruppen 4 (VSPO3) und 5 (VS) ($p < 0,006$) und für die Gruppen 3 (SW), 6 (WS) und 7 (BK) sogar hoch signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) auf. Dagegen waren in den Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 8 (KTRL) für dieses Zeitintervall keine signifikanten Unterschiede festzustellen ($p > 0,006$).

Beim Vergleich der Werte der Messungen vor dem Bleichen (m0) und nach der Lagerung in künstlichem Speichel (m2) waren lediglich für die Gruppe 1 (VSPO1) signifikante ($p < 0,006$) und für die Gruppe 7 (BK) sogar hochsignifikante ($p < 0,001$) Unterschiede zu beobachten. Die Anzahl der untersuchten Proben war in der Gruppe 7 (BK) für die Messung m2 verringert ($n=23$), da ein Zahn dieser Gruppe während der dritten Mikrohärtmessung der Messung m2 frakturierte. Infolgedessen änderte sich ebenso die Anzahl der untersuchten Proben für die Berechnung der Differenzen m1-m2 und m0-m2 in dieser Gruppe ($n=23$).

Tab. 18a: Mittelwerte und Standardabweichungen der Knoop-Mikrohärte zu den Zeitpunkten m0, m1, m2 sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen m0-m1, m1-m2 und m0-m2 mit p-Werten für die Gruppen 1 bis 4

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW (KHN)	SW (KHN)	p-Wert der Differenz
1 (VSPO1)	Messzeitpunkt				
	m0	24	256,7	83,6	
	m1	24	259,0	88,7	
	m2	24	265,6	86,0	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	-2,3	20,3	0,57
	m1-m2	24	-6,6	17,1	0,03
	m0-m2	24	-8,8	13,3	0,003*
2 (VSPO2)	Messzeitpunkt				
	m0	24	278,9	75,2	
	m1	24	287,8	70,2	
	m2	24	295,7	75,1	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	-8,9	27,2	0,49
	m1-m2	24	-7,9	20,7	0,10
	m0-m2	24	16,8	27,0	0,01
3 (SW)	Messzeitpunkt				
	m0	24	254,3	59,7	
	m1	24	190,9	67,5	
	m2	24	267,6	59,4	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	63,4	56,3	<0,0005**
	m1-m2	24	-76,7	47,7	<0,0005**
	m0-m2	24	-13,3	34,9	0,05
4 (VSPO3)	Messzeitpunkt				
	m0	24	273,0	78,5	
	m1	24	263,4	74,6	
	m2	24	274,8	73,3	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	9,6	30,1	0,10
	m1-m2	24	-11,5	18,5	0,005*
	m0-m2	24	-1,8	26,9	0,44

MW=Mittelwert, SW= Standardabweichung, n=Anzahl der Proben, signifikante Unterschiede sind hervorgehoben ($p > 0,006$ n.s., $p \leq 0,006$ *, $p \leq 0,001$ **, Wilcoxon-Test, Bonferroni), m0=Mikrohärtemessung vor dem Bleichen, m1= Mikrohärtemessung unmittelbar nach dem Bleichen, m2= Mikrohärtemessung nach 6 Wochen Lagerung in Remineralisationslösung

Tab. 18b: Mittelwerte und Standardabweichungen der Knoop-Mikrohärte zu den Zeitpunkten m0, m1, m2 sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen m0-m1, m1-m2 und m0-m2 mit p-Werten für die Gruppen 5 bis 8

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW (KHN)	SW (KHN)	p-Wert der Differenz
5 (VS)	Messzeitpunkt				
	m0	24	305,1	87,8	
	m1	24	292,2	80,2	
	m2	24	314,4	81,5	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	12,8	62,6	0,36
	m1-m2	24	-22,1	38,5	0,002*
m0-m2	24	-9,3	36,4	0,17	
6 (WS)	Messzeitpunkt				
	m0	24	282,8	81,6	
	m1	24	190,6	67,0	
	m2	24	278,3	79,6	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	92,2	50,2	<0,0005**
	m1-m2	24	-87,7	51,7	<0,0005**
m0-m2	24	4,5	44,6	0,93	
7 (BK)	Messzeitpunkt				
	m0	24	271,9	51,8	
	m1	24	113,5	20,3	
	m2	24	177,2	34,8	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	158,4	59,7	<0,0005**
	m1-m2	24	-64,1	25,4	<0,0005**
m0-m2	24	97,0	63	<0,0005**	
8 (KTRL)	Messzeitpunkt				
	m0	24	285,0	106,7	
	m1	24	274,4	94,8	
	m2	24	285,0	96,9	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	10,7	38,5	0,15
	m1-m2	24	-10,6	33,4	0,08
m0-m2	24	0,1	22,2	0,89	

MW=Mittelwert, SW= Standardabweichung, n=Anzahl der Proben, signifikante Unterschiede sind hervorgehoben ($p>0,006$ n.s., $p\leq 0,006$ *, $p\leq 0,001$ **, Wilcoxon-Test, Bonferroni), m0=Mikrohärtemessung vor dem Bleichen, m1= Mikrohärtemessung unmittelbar nach dem Bleichen, m2= Mikrohärtemessung nach 6 Wochen Lagerung in Remineralisationslösung

Die Messwerte der Tabellen 18 a und b und sind in Abbildung 35 grafisch als Box-and-whisker plots dargestellt. Aus dieser Darstellung wird ersichtlich, dass die stärkste Härtereduktion bei den Versuchszähnen der Gruppe 7 (BK) vorlag. Auch die Härte der Zähne der Gruppen 3 (SW) und 6 (WS) verringerte sich nach den Bleichbehandlungen signifikant. Jedoch war nach der Lagerung in künstlichem Speichel bei diesen drei Gruppen ebenso eine deutliche Zunahme der Mikrohärte im Bezug zu den direkt nach dem Bleichen gemessenen Werten (m1-m2) festzustellen. Lediglich die Schmelzoberflächen der Gruppe BK erlangten die Härte ihrer anfänglichen Grundwerte nicht wieder ($p<0,001$, Wilcoxon-Test). Die Gruppen 1 (VSPO1),

2 (VSPO2), 4 (VSPO3) sowie 5 (VS) und die Kontrollgruppe (KTRL) zeigten keine bedeutenden Änderungen der Mikrohärtung nach dem Bleichen.

Während der Remineralisierungsphase (m1-m2) kam es in den Gruppen 3 (SW), 4 (VSPO3), 5 (VS), 6 (WS) und 7 (BK) zu einer signifikanten Zunahme der Mikrohärtung. Die Oberflächenmikrohärtung der Probenzähne der Gruppe 1 (VSPO1) war nach der Bleichbehandlung und daran anschließender Lagerung in künstlichem Speichel (m0-m2) sogar signifikant angestiegen ($p < 0,006$).

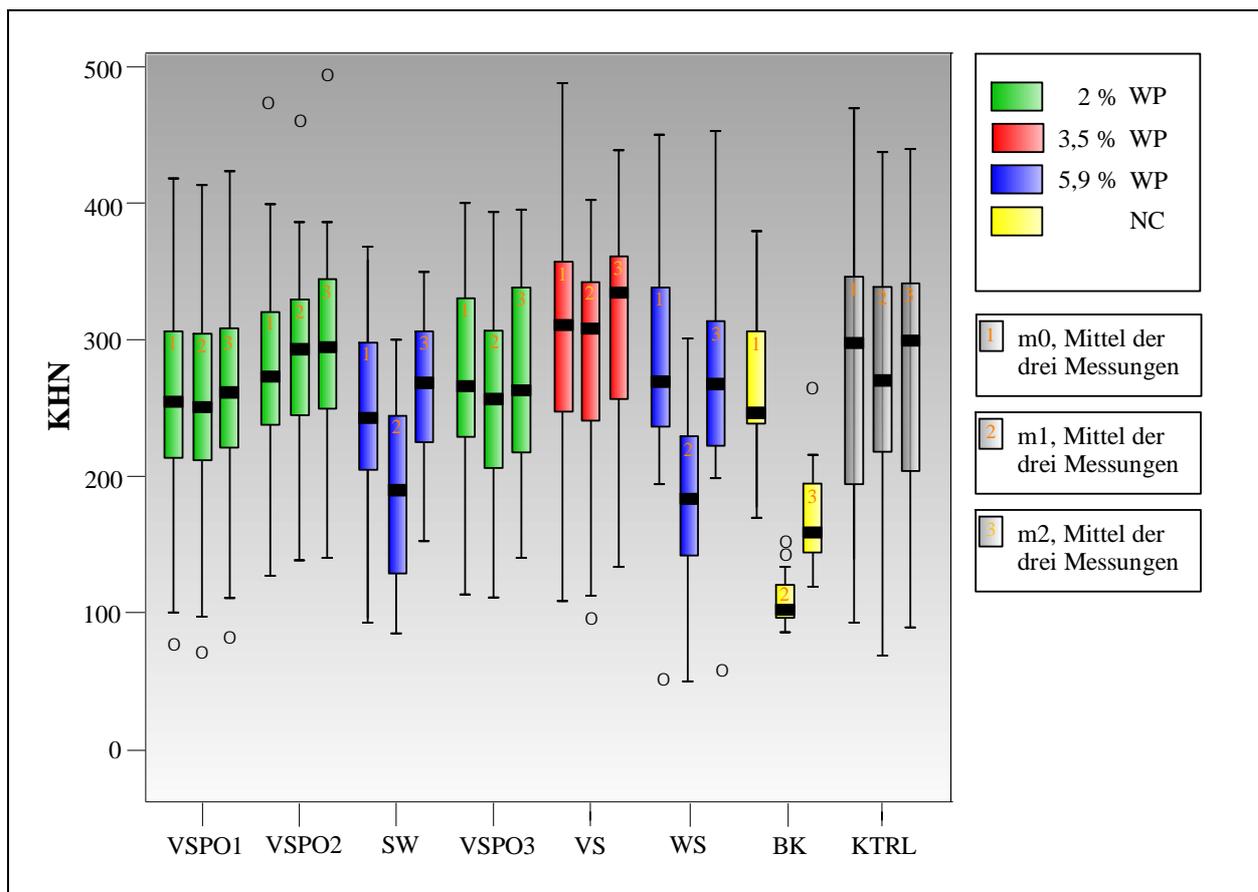


Abb. 35: Darstellung der Knopp-Mikrohärtung (KHN) zu den Zeitpunkten m0, m1 und m2 für die Gruppen 1 bis 8 als Box-and-whisker plots. WP= Wasserstoffperoxid, NC= Natriumchlorid. Die dicken schwarzen Linien stellen die Mediane dar. Ausreißer sind als Kreise gekennzeichnet.

Die Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Tests zum Vergleich der Differenzen der Mikrohärtungswerte zwischen den acht Gruppen sind in den nachstehenden Tabellen 19, 20 und 21 wiedergegeben, wobei signifikante Werte zur besseren Übersicht dunkel unterlegt wurden. Die Differenzen der Mittelwerte sind vor und nach dem Bleichen (m0-m1, Tab 19), nach Bleichbehandlung und nach der Lagerung in künstlichem Speichel (m1-m2, Tab. 20) und vor der Bleichbehandlung und der sechswöchigen Einlagerung (m0-m2, Tab 21) errechnet worden. Aus den Tabellen 19, 20 und 21 wird ersichtlich, dass sich die Differenzen der Knoop-Mikrohärtungswerte der Gruppen 1 (VSPO1),

2 (VSPO2) und 4 (VSPO3), in denen der „Paint-on“-Lack auf Basis von 2 % Wasserstoffperoxid mit unterschiedlicher Anwendungsdauer verwendet wurde, nach den Zeitintervallen m0-m1, m1-m2 und m1-m2 nicht signifikant voneinander unterschieden. Zudem wurden zu den drei Zeitintervallen (m0-m1, m1-m2, m0-m2) keine signifikanten Unterschiede jener Differenzen der Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO2) und 4 (VSPO3) zu den jeweiligen Differenzen der Gruppe 5 (VS: 3,3 % Wasserstoffperoxid) und der Kontrollgruppe (KTRL) festgestellt. Die Mikrohärtedifferenzen der Bleichmittel der Gruppen 3 (SW) und 6 (WS) – mit jeweils 5,9 % Wasserstoffperoxid – unterschieden sich untereinander zu keinem der drei Zeitintervalle signifikant. Im Zeitintervall m0-m1 unterschieden sich die Gruppen 3 (SW) und 6 (WS) dagegen jedoch signifikant von den Gruppen 1 (VSPO1), 2 (VSPO 2), 4 (VSPO3), 5 (VS), 7 (BK) sowie von der Kontrollgruppe. Die Mikrohärtedifferenzen der Gruppen 3 (SW) und 6 (WS) unterschieden sich nach dem Intervall m0-m2 nur noch von der Gruppe 7 (BK). Die Mikrohärtedifferenzen des Natriumchlorit enthaltenden Bleichmittels der Gruppe 7 (BK) unterschieden sich nach dem Intervall m0-m1 signifikant von allen anderen Gruppen.

Nach dem Zeitintervall m1-m2 unterschieden sich die Mikrohärtedifferenzen der Gruppe 7 (BK) von allen Gruppen außer denen der Gruppen 3 (SW) und 6 (WS). Die Mikrohärtedifferenzen der Gruppe 7 (BK) unterschieden sich nach dem Zeitintervall m0-m2 signifikant von allen anderen Gruppen (VSPO1, VSPO 2, VSPO3, SW, VS, WS, KTRL). Diese Gruppen wiesen für die jeweiligen Mikrohärtedifferenzen nach dem Zeitintervall m0-m2 keine signifikanten Unterschiede zueinander auf.

Für das Zeitintervall m0-m1 unterschieden sich nur die Differenzen der Gruppen 6 (WS) und 7 (BK) signifikant von der Differenz der Kontrollgruppe, während sich nach dem Intervall m1-m2 neben diesen Differenzen ebenfalls die Differenz der Gruppe 3 (SW) signifikant von der der Kontrollgruppe unterschied. Im Zeitintervall der Messung vor der Bleichbehandlung bis nach sechs Wochen Lagerung in künstlichem Speichel (m0-m2) unterschied sich lediglich die Differenz der Mikrohärtewerte der Gruppe 7 (BK) von der entsprechenden Differenz der Messwerte der Kontrollgruppe.

Tab. 19: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen der Knoop-Mikrohärtewerte zwischen den acht Gruppen im Zeitintervall m0-m1

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	1						
3 (SW)	<0,0005	<0,0005					
4 (VSPO3)	0,103	0,070	0,001				
5 (VS)	0,167	0,095	0,002	0,726			
6 (WS)	<0,0005	<0,0005	0,073	<0,0005	<0,0005		
7 (BK)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	
8 (KTRL)	0,122	0,097	0,002	0,918	0,902	<0,0005	<0,0005

Signifikante Werte ($p \leq 0,0018$, Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni-Korrektur) sind grau unterlegt.

Tab. 20: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen der Knoop-Mikrohärtewerte zwischen den acht Gruppen im Zeitintervall m1-m2

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,869						
3 (SW)	<0,0005	<0,0005					
4 (VSPO3)	0,317	0,458	<0,0005				
5 (VS)	0,076	0,224	<0,0005	0,477			
6 (WS)	<0,0005	<0,0005	0,578	<0,0005	<0,0005		
7 (BK)	<0,0005	<0,0005	0,371	<0,0005	<0,0005	0,097	
8 (KTRL)	0,805	0,984	<0,0005	0,711	0,240	<0,0005	<0,0005

Signifikante Werte ($p \leq 0,0018$, Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni-Korrektur) sind grau unterlegt.

Tab. 21: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen der Knoop-Mikrohärtewerte zwischen den acht Gruppen im Zeitintervall m0-m2

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,030						
3 (SW)	0,496	0,853					
4 (VSPO3)	0,550	0,089	0,232				
5 (VS)	0,861	0,439	0,695	0,386			
6 (WS)	0,224	0,073	0,143	0,578	0,332		
7 (BK)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	
8 (KTRL)	0,240	0,037	0,122	0,726	0,244	0,853	<0,0005

Signifikante Werte ($p \leq 0,0018$, Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni-Korrektur) sind grau unterlegt.

6. DISKUSSION

6.1 Diskussion von Material und Methode

6.1.1 Versuchszähne

Die Aufhellungsfähigkeit der Bleichtherapie *in vivo* unterliegt vom Prinzip her der chemischen Gesetzmäßigkeit der Oxidation von chromogenen Verbindungen auf molekularer Ebene (KIELBASSA & ZANTNER, 2001). Diese Bleichfähigkeit wurde auch *in vitro* bei Untersuchungen verschiedener zur Zahnaufhellung anwendbarer Bleichmittel gefunden (LEONARD et al., 1998; WHITE et al., 2003; WIEGAND, 2005). In der vorliegenden Studie sollten unter anderem die Aufhellungseffektivität und mögliche strukturelle Veränderungen der Zahnhartsubstanzen von Versuchszähnen durch die jeweiligen Bleichmaterialien aufgezeigt werden. Die Wahl der zu untersuchenden Zahnhartsubstanzen zum Zweck dieser Untersuchungen fiel in dieser Studie auf menschliche Versuchszähne. In-vitro-Proben aus menschlichem Zahnmaterial kamen schon im Rahmen von Studien ähnlicher Thematik zur Anwendung (BEN-AMAR et al., 1995; POTOCNIK et al., 2000; AUSCHILL et al., 2002; SULIEMAN et al., 2003).

Von verschiedenen Autoren wurden in der Vergangenheit jedoch auch in *In-vitro*-Untersuchungen zu ähnlichen Themen Rinderzähne herangezogen (KWON et al., 2002; ATTIN et al., 2003; TAM et al., 2005; WIEGAND, 2005). Diese weisen in ihrer Zusammensetzung eine hohe Kompatibilität zur humanen Zahnhartsubstanz auf (ESSER, 1998) und sind leichter in größeren Mengen verfügbar als das humane Pendant. Jedoch weisen diese auch gewisse Unterschiede zur humanen Zahnhartsubstanz auf. So ist zum Beispiel der bovine Schmelz poröser als humaner Schmelz (EDMUNDS et al., 1988). Die erhöhte Porosität des Rinderzahnschmelzes könnte eine erhöhte Penetrationsmöglichkeit der zu untersuchenden Bleichmittel zur Folge haben. Dadurch könnte es zu einer Verbesserung der Effektivität der Bleichmittel kommen, was letztendlich zu falschen Rückschlüssen bezüglich der Aufhellungsfähigkeit führen würde. Überdies beschrieben ZIMMERMANN und HOPP (2006) den Fehlschlag, Rinderzähne mit verschiedenen Farblösungen gleichmäßig einfärben zu können, und versuchten zu diesem Zweck, Prüfkörper aus Mammut-Elfenbein zu verfärben. Mit diesen sollte eine einfache, standardisierte und reproduzierbare Methode zur Testung von Bleichmitteln gefunden werden. Beim Mammut-Elfenbein handelt es sich jedoch um eine eher dem menschlichen Zahnbein ähnliche Substanz, mit einer weichen Oberfläche und einer durch eine knorpelähnliche Zwischensubstanz hohen elastischen Verformbarkeit. Die Anwendung von Elfenbeinproben in dieser Studie mit dem Ziel der

Beurteilung von Veränderungen menschlicher Schmelzoberflächen durch verschiedene Bleichmittel hätte Ergebnisse mangelnder Kompatibilität zu den zugrunde liegenden Fragestellungen aufgrund der strukturellen Unterschiede zwischen den Materialien befürchten lassen.

6.1.2 Verfärbung der Versuchszähne

Die Genese extrinsischer Verfärbungen wird von verschiedenen Autoren als externe Auflagerung von Chromogenen verschiedener Art auf die Zahnoberfläche beschrieben (WEBER, 1999a; SCHMIDSEDER et al., 1998; KIELBASSA & WRBAS, 2000b; GREENWALL 2001). Externe Zahnverfärbungen lassen sich unter Einsatz von Polierpasten oder Pulverstrahlgeräten beseitigen. Bei diesen Verfärbungen ist in der Regel keine Bleichtherapie indiziert (ATTIN und KIELBASSA, 1995).

Intrinsische Verfärbungen resultieren durch Chromogene verschiedener Art, die innerhalb der Zahnhartsubstanz lokalisiert sind und somit durch eine Zahnreinigung von außen nicht entfernbar sind. Um sicherzustellen, dass es sich bei den im Rahmen dieser Studie zu bleichenden Diskolorationen nicht um extrinsische Verfärbungen handelte, wurden sämtliche Zahnoberflächen vor Versuchsdurchführung von außen gründlich gesäubert. Auf diese Weise resultierten Proben, die ausschließlich intrinsisch verfärbt waren. Zur Verfärbung wurden Rotwein und Schwarztee verwendet. Diese Mittel wurden schon in vorherigen In-vitro-Studien zur Verfärbung von Testkörpern angewendet (GULTZ et al., 1999; JOINER et al., 2004b; ZIMMERMANN & HOPP, 2006). SULIEMAN, ADDY und REES (2003) stellten in einer Untersuchung fest, dass menschliche Versuchszähne, die mit Tee intern eingefärbt waren, ein reproduzierbares In-vitro-Modell zum Evaluieren von Bleichmaterialien darstellen. Dieses Modell kann (mit der Einschränkung, keine In-situ- oder In-vivo-Daten zu erhalten) dazu verwendet werden, viele Aspekte des Bleichens vitaler Zähne zu untersuchen (SULIEMAN et al., 2003).

Bei den verwendeten menschlichen Versuchszähnen war jedoch festzustellen, dass der Grad der Verfärbungen der einzelnen Proben unterschiedlich ausfiel. So war es nicht möglich, bei allen Versuchszähnen nach Einfärbung die gleiche Zahnfarbe als Ausgangswert zu erreichen, da natürliche Zähne aufgrund von Form, Grundfarbe, Zahnhartsubstanzdicke und Oberflächenbeschaffenheit variieren. Jedoch wurde vor den Bleichtherapien durch die exakte Bestimmung der Ausgangszahnfarbe jeder einzelnen Probe sowohl durch digitale Farbmessung mittels SpectroShade als auch durch visuelle Farbestimmung unter Verwendung der beiden konventionellen Farbskalen sichergestellt, dass eine Zahnfarbe von mindestens A3 auf der Vita Classic-Farbskala erreicht war. Hierbei muss kritisch angemerkt werden, dass Diskolorationen,

die Patienten veranlassen, Home-Bleaching-Materialien zu verwenden, oft nicht dieses hohe Ausmaß an Verfärbung darstellen. Dennoch wurde dieser hohe Grad an Verfärbung für die Proben gewählt, um allen Bleichmaterialien zu ermöglichen, ein genügendes Wirkungsspektrum aufzeigen zu können. In der Literatur finden sich Angaben, welche die Wahl solcher Verfärbungen menschlicher Versuchszähne zum Zweck der Untersuchung von verschiedenen Bleichmitteln bestätigen (NATHOO et al., 2002; BRUNTON, 2004; DELIPERI et al., 2005).

Die Verwendung eines nichthumanen Probenmaterials, wie von Zimmermann und Hopp (2006) vorgeschlagen, hätte nach dessen Verfärbung eine annähernd gleiche Ausgangsfarbe aller zu untersuchenden Proben zur Folge gehabt. Jedoch wäre bei der Verwendung nichthumanen Materials die Validität der *In-vitro*-Daten in Bezug auf die Beurteilung von Oberflächenveränderungen des menschlichen Zahnschmelzes und der Bleicheffizienz der jeweiligen Homebleaching-Methoden auf menschliche Zahnhartsubstanzen beeinträchtigt worden. Darüber hinaus stehen zukünftig noch weitere Untersuchungen aus, um die Übertragbarkeit der Effizienz dieses Verfahrens auf humane Zähne zu untersuchen (ZIMMERMANN & HOPP, 2006).

In verschiedenen Studien wurden interne Verfärbungen durch die Einlagerung der Versuchszähne in Blut und die daraus resultierende Farbänderung durch das Hämoglobin beschrieben (HORN et al., 1998; ARI et al., 2002). Die Versuchszähne durch Hämoglobin zu verfärben, erschien in der vorliegenden Studie mit dem Ziel der Untersuchung der Aufhellungseffektivität von Bleichmitteln zur häuslichen Anwendung nicht notwendig, da durch Rotwein und Tee eine ausreichende Diskoloration erreicht wurde.

6.1.3 Künstlicher Speichel

In der Literatur beschrieben verschiedene Autoren von *In-vitro*-Studien zur Thematik des Zahnbleichens die Verwendung von natürlichem menschlichen Speichel (ARI et al., 2002; SPALDING et al., 2003; WHITE et al., 2003). Demgegenüber lassen sich aber auch *In-vitro*-Studien finden, die künstlichen Speichel als Aufbewahrungsmedium und Remineralisationsflüssigkeit verwenden (JOSEY et al., 1996; RODRIGUES et al., 2001; BASTING et al., 2003; DE OLIVEIRA, 2003; ATTIN et al., 2004). Die in dieser *In-vitro*-Studie verwendeten Proben wurden in künstlichem Speichel gelagert, um zum einen die klinische Situation der Mundhöhle zu simulieren und zum anderen die experimentellen Bedingungen zu standardisieren. Sowohl für Speichel natürlicher Genese als auch bei künstlich hergestellten Speichellösungen sollte berücksichtigt werden, dass Speichel als wichtiges Schutzsystem anzusehen ist, welches auch bei der *In-vitro*-Versuchsdurchführung nicht außer Acht gelassen werden darf. Speichel spielt eine

wichtige Rolle bei der Remineralisation von Zahnschmelz (ATTIN et al., 2000). In verschiedenen In-vitro-Studien wurde Speichel als Remineralisationslösung verwendet, um Schmelzläsionen wieder zu härten (BUSKES et al., 1985; MEYER-LUECKEL et al., 2004). Daher wurden die Proben zwei Wochen vor Versuchsbeginn in künstlichem Speichel gelagert, um deren Schmelzoberflächen einheitlich zu remineralisieren. Von einer Demineralisation der Schmelzproben war nach der Anwendung der Färbelösung auszugehen, da diese Rotwein enthielt. Beim Kontakt von Rotwein mit Schmelzoberflächen von länger als 120 Sekunden kann es aufgrund des niedrigen pH-Wertes zu Demineralisierungen kommen (LUPI-PEGURIER et al., 2003).

Während des Zeitraums der Bleichanwendung bis zur Beendigung der letzten Mikrohärtmessungen (sechs Wochen nach dem Abschluss der Bleichtherapie) wurden die Versuchszähne ebenfalls in künstlichem Speichel gelagert, um die Remineralisierungsvorgänge des Speichels in der klinischen Situation zu berücksichtigen. *In vivo* ist die Zusammensetzung von menschlichem Speichel je nach Alter, Geschlecht und Zustand des Individuums starken Schwankungen unterworfen. Die Zusammensetzung hängt letztlich sowohl von der Sekretionsrate, dem Stimulationsgrad, der Art und Dauer der Stimulation als auch vom Funktionszustand der vorherrschenden Speicheldrüse ab. Die Konzentrationen von Calcium und Phosphat der Remineralisationslösung betragen 1,53 mM beziehungsweise 0,9 mM. Diese Werte sind etwa so hoch wie der durchschnittliche Inhalt von natürlichem menschlichen Speichel (POFF et al., 1997). Die in Hinsicht auf die erwähnten Mineralstoffe als übersättigt zu bezeichnende künstliche Speichellösung unterlag keinen individuellen Schwankungen und gewährleistete so konstante, reproduzierbare Versuchsbedingungen. Bei Übertragung der in dieser Studie unter In-vitro-Bedingungen gefundenen Werte auf die klinische Situation muss jedoch die Individualität des menschlichen Speichels berücksichtigt werden. Des Weiteren muss auch kritisch angemerkt werden, dass niedrige pH-Werte der getesteten Bleichprodukte *in vitro* nicht durch die im natürlichen Speichel wirksamen Puffersysteme, wie zum Beispiel den Bikarbonatpuffer, verändert werden konnten.

6.1.4 Simulation der Mundhöhle *in vitro*

Bei Betrachtung der Effizienz von Bleichmaterialien *in vivo* wurde beschrieben, dass unter einer Bleichschiene in geschlossenem Mund eine Temperatur von etwa 37 °C herrscht. Dagegen wird bei einer In-Office-Sitzung bei offenem Mund lediglich eine Temperatur von etwa 30 °C erreicht (ZIMMERMANN & HOPP, 2006). Die Anwendung der in dieser Studie untersuchten Bleichmaterialien soll entsprechend den jeweiligen Gebrauchsanweisungen bei geschlossenem Mund

erfolgen. Daher wurden die Versuchszähne nach Applikation der Bleichmaterialien bei einer Temperatur von 37 °C in einem Brutschrank gelagert, um die Temperatur den klinischen Verhältnissen bei geschlossenem Mund anzupassen. Diese Temperatur wurde von verschiedenen Autoren bei Verwendung von künstlichem Speichel ebenfalls gewählt (DE FREITAS et al., 2002; LOPES et al., 2002).

Es ist äußerst schwierig, die Art und das Ausmaß der Speichelpenetration in flüssige Bleichgele, Bleichstreifen oder Bleichschienen bei In-vitro-Untersuchungen zu simulieren (ATTIN et al., 2005). Daher wurden die Proben während des Bleichvorgangs mit feuchten Baumwolltüchern bedeckt. Diese waren zuvor mit künstlichem Speichel getränkt worden. Auf diese Weise wurde berücksichtigt, dass die Zähne unter in vivo-Bedingungen während der mundgeschlossenen Anwendung von Bleichmitteln mit Speichel in Berührung kommen. Insbesondere ist diese Tatsache bei der Anwendung von Bleichgelen (Gruppen 1-4) und Bleichstreifen, die nicht eng anliegen (Gruppe 6), zu berücksichtigen. Aufgrund seiner benetzenden, spülenden und abpuffernden Funktion besteht die Möglichkeit, dass geringe Mengen von Speichel in das aufgetragene Gel diffundieren (ZANTNER et al., 2007) oder dass geringe Mengen von Gel abgespült werden. Durch die abpuffernde Funktion besteht die Möglichkeit, dass der pH-Wert des Bleichmittels verändert wird. Zudem kommt es durch die Diffusion des Speichels in das Bleichgel zu einer Verdünnung des Bleichwirkstoffes. Die Möglichkeit der Speichelpenetration in das Bleichgel beziehungsweise deren zuvor beschriebene Folgen, die zu einer Änderung in der Kinetik der jeweiligen Bleichmittel führen können, wurden durch die Verwendung von feuchten Baumwolltüchern simuliert. Hierbei muss aber beachtet werden, dass es sich lediglich um eine Simulation der Speicheldiffusion handelt, die *in vivo* durchaus ein anderes Ausmaß annehmen könnte. So konnte die Möglichkeit der erhöhten Speichelpenetration in das Bleichgel durch individuelle Faktoren nicht berücksichtigt werden. Solche Faktoren stellen zum Beispiel Zungendruck, Mundbewegungen oder Abtransport von Bleichgel durch Unterdruck beim Schluckreflex dar.

6.1.5 Verwendete Farbskalen

In dieser Studie wurden zur visuellen Farbestimmung sowohl die Vita Classic-Farbskala als auch die Chromascop Complete-Farbskala angewendet. HUGO et al. (2005) bezeichneten die Vita Classic-Skala als den Farbring, der in der Zahnmedizin bis dato am häufigsten verwendet wurde und bis heute als Standard gilt. Dennoch wurde für diesen Farbring der Nachteil festgestellt, dass die Spanne der enthaltenen Farben nicht das komplette Spektrum von

natürlichen und gebleichten Zahnfarben abdeckt (GOODKIND et al., 1987; SCHWABACHER et al., 1990). Desweiteren sind die Farbdifferenzen (ΔE) und die Abstände der Helligkeitswerte (ΔL) keineswegs äquidistant und variieren erheblich (STOLL et al., 2008).

Um diesen Nachteilen bei der Verwendung der Vita Classic-Farbskala Rechnung zu tragen und die Aufhellungseffektivität der angewendeten Bleichmittel *in vitro* valide darzustellen, kam daher in dieser Untersuchung sowohl für die visuelle als auch für die digitale Farbmessung die Chromascop Complete-Farbskala zur Anwendung. Diese Farbskala besitzt acht Farbstufen mehr als der bisherige Standard der Vita Classic-Skala. Vor allem im Bereich der hellen Farben soll mit der Chromascop Complete-Farbskala eine differenziertere Messung ermöglicht werden. Die ΔE - und ΔL -Werte variieren im Gegensatz zur Vita Classic-Farbskala nicht so stark.

Die Messreihen, die mit der Vita Classic-Farbskala durchgeführt wurden, erfolgten, um einen Vergleich zu älteren Messwerten von in der Vergangenheit durchgeführten Studien zur Untersuchung von verschiedenen Bleichmitteln zu erhalten. Des Weiteren wurden die Korrelationen der Vita-Messwerte mit den Messwerten der Chromascop Complete-Farbskala (visuell und computergestützt) errechnet, um generell darzustellen, inwiefern die Messwerte der unterschiedlichen Farbskalen übereinstimmen. Anschließend sollten mögliche Unterschiede der Messwerte zwischen den angewendeten Farbskalen aufgrund des zuvor beschriebenen Nachteils durch direkten Vergleich der Resultate der Messungen dargestellt werden (siehe 6.2.3.3).

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Die pH-Werte der Bleichmittel

Die in dieser In-vivo-Studie untersuchten Bleichmittel besaßen pH-Werte unterschiedlichen Ausmaßes. Niedrige pH-Werte sind für eine Härteminderung des Zahnschmelzes durch Demineralisation und darüber hinaus für das Entstehen von Erosionen verantwortlich zu machen (LUSSI et al., 1995; ATTIN et al., 2003). Nach der Anwendung des Bleichprodukts Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur (BK, Gruppe 7), welches als Wirkstoff Natriumchlorit enthielt, wurden erheblich stärkere Minderungen der Mikrohärtigkeit gefunden als bei den Bleichprodukten der übrigen Gruppen. Im Vergleich zur Oberflächenhärtigkeit des Zahnschmelzes der anderen Gruppen nach Bleichanwendung zum Zeitpunkt m1 waren die Messwerte der Gruppe 7 (BK) signifikant geringer. Darüber hinaus wurden noch sechs Wochen nach Remineralisation in künstlichem Speichel bei Betrachtung der Knoop-Mikrohärtigkeit verminderte Werte in dieser Gruppe gefunden, die die Grundwerte von m0 nicht wieder erreichten. Neben dem Bleichwirkstoff war in einem

Bestandteil dieses Bleichmittelsystems Zitronensäure als stark saure Komponente enthalten. Die pH-Wert-Messung ergab einen niedrigen Wert von 3,7 für diesen Bleichmittelbestandteil des Dreikomponenten-Systems. Es ist daher zu hinterfragen, inwiefern die Reduktion der Mikrohärtigkeit der Schmelzoberfläche bei Verwendung des natriumchloridhaltigen Produkts auf den niedrigen pH-Wert dieses sauren Bleichmittelbestandteils zurückzuführen ist. SHANNON et al. (1993) stellten die Vermutung an, dass mit abfallender Azidität eines Bleichmittels die Wahrscheinlichkeit von Veränderungen der Schmelzoberfläche zu steigen scheint. FEATHERSTONE et al. (1983) machten pH-Werte unter 5,5 für Schmelzdeminalisationen verantwortlich. Bei der Beurteilung des Ausmaßes der Oberflächenveränderungen durch Bleichprodukte sollte also die Azidität des verwendeten Produktes nicht außer Acht gelassen werden.

6.2.2 Aufhellung der Versuchszähne

Alle in dieser Studie untersuchten Bleichmittel führten *in vitro* nach der jeweiligen Anwendungszeit zu einer signifikanten Aufhellung der Versuchszähne. Zum Vergleich der Effektivität der einzelnen Bleichmittel untereinander scheint die hier gewählte Vorgehensweise adäquat. Bei Einschätzung der Aufhellungseffektivität der verwendeten Bleichmittel ist jedoch die Tatsache zu beachten, dass die Zahnfarben zum Zeitpunkt vor dem Bleichvorgang (m1) sehr dunkel waren, um den Bleichmitteln im Rahmen der Bleichbehandlung ein genügendes Wirkungsspektrum einzuräumen. Es ist hierbei kritisch zu hinterfragen, ob die in dieser Studie ermittelten Aufhellungseffektivitäten auch bei Zähnen mit geringer Diskoloration in vollem Umfang zu finden sind. Diese kritische Sicht bei der Einschätzung der Wirksamkeit der verwendeten Bleichmittel muss auch bei der Betrachtung der Art der Verfärbung aufrechterhalten werden. So ist es fraglich, ob Verfärbungen anderer Genese bei Zähnen *in vivo* ein exakt gleiches Bleichverhalten aufweisen, wie es bei Diskolorationen mit Rotwein und Tee bei extrahierten Zähnen der Fall war. Der Bleichmechanismus der Aufhellung durch Oxidation der für die Verfärbung verantwortlichen chemischen Verbindungen ist jedoch gleich. Bei dem in dieser Studie durchgeführten Vergleich der Aufhellungseffektivitäten von verschiedenen Bleichprodukten ist dabei kein Einfluss auf die Ergebnisse zu erwarten. Bei der Einschätzung der Aufhellungseffektivität sollte zudem berücksichtigt werden, dass keine Probezähne mit hoher Transluzenz des Schmelzes verwendet wurden. Diese erscheinen nach der Bleichbehandlung eher grau als weiß (GREENWALL, 2001).

6.2.3 Messwerte der Zahnfarbveränderungen

6.2.3.1 Chromascop Complete-Farbskala

Die Verwendung von unterschiedlich konzentriertem Wasserstoffperoxid (2 %, 3,3 % und 5,9 %) hatte, gemessen mit der Chromascop Complete-Farbskala, unterschiedliche Aufhellungen der untersuchten Proben zur Folge. Die höchste Aufhellungseffektivität wurde sowohl visuell als auch computergestützt für die höchst konzentrierten Bleichmittel Blend-a-med Whitestrips (WS) und Colgate Simply White (beide 5,9 % WP) gefunden. Die Verwendung des niedrig konzentrierten Bleichlackes VivaStyle Paint On (2 % WP) hatte nach den Farbmessungen – trotz der Variation der Anwendungsdauer in drei verschiedenen Gruppen – die geringste Aufhellungseffektivität der untersuchten Bleichmittel auf Wasserstoffperoxidbasis. Mit der computergestützten Farbbestimmung konnten mit der Chromascop Complete-Farbskala signifikante Unterschiede zwischen dem niedrigst konzentrierten Bleichmittel (2 % WP) und den höchst konzentrierten Bleichmitteln (5,9 % WP) aufgedeckt werden. Ebenso konnte ein signifikanter Unterschied des Aufhellungsvermöges zwischen dem 5,9 % Wasserstoffperoxid enthaltenden Zahnaufhellungsstreifen (WS) und einem Bleichmittel auf Basis von 3,3 % Wasserstoffperoxid (VivaStyle, VS) gemessen werden. Zwischen diesem Bleichmittel auf Basis von 3,3 % Wasserstoffperoxid und den „Paint-on“-Lacken mit 5,9 % und 2% Wasserstoffperoxid bestanden numerische Unterschiede zwischen den Differenzen der Mittelwerte (m_0 zu m_1). Jedoch haben sich diese nach der Berechnung mit dem Mann-Whitney-U-Test (Bonferoni-korrektur: $\alpha' = 0,0018$) als nicht signifikant herausstellt. Dennoch ist aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie zu ersehen, dass die Konzentration von Wasserstoffperoxid – entgegen verschiedentlich publizierter Ergebnisse vorangegangener Studien – eindeutig einen Einfluss auf die Aufhellungseffektivität der angewendeten Bleichprodukte hatte.

6.2.3.2 Übereinstimmung zwischen visueller und digitaler Messung

Die in dieser In-vitro-Studie mittels konventioneller Farbskala gemessenen Chromascop Complete-Werte zeigten, dass das menschliche Auge fähig ist, signifikante Farbunterschiede zwischen zwei Proben zu detektieren. Trotz der bekannten Fehlermöglichkeiten bei der Farbbestimmung mit dem bloßen Auge wurden signifikante Unterschiede der Aufhellungseffektivität für das 2 % Wasserstoffperoxid enthaltende Bleichprodukt zu den jeweils höher konzentrierten Bleichmitteln (3 % und 5,9 % WP) festgestellt. Zwischen diesen höher

konzentrierten Bleichmitteln konnte jedoch mittels visueller Farbmessung vom menschlichen Augen kein signifikanter Unterschied mehr beobachtet werden. Die computergestützte Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Skala (SpectroShade) detektierte dagegen auch unter den höher konzentrierten Produkten (3,3 % und 5,9 % WP) signifikante Aufhellungsunterschiede. Der signifikante Unterschied der Aufhellung für das 2 % Wasserstoffperoxid enthaltende Bleichprodukt zu den höher konzentrierten Bleichmitteln wurde auch mit der computergestützten Methode festgestellt. Die computergesteuerte Farbbestimmung mit der Chromascop Complete-Skala ergab zusätzlich signifikante Unterschiede unter den Gruppen, die Wasserstoffperoxid enthielten (2 %, 3,3 %, 5,9 % WP) und der Gruppe mit Natriumchlorit als Bleichmittel. Mit der visuellen Farbbestimmung wurde dagegen weder ein Unterschied zwischen dem niedrig konzentrierten „Paint-on“-Lack (2% WP) und dem Natriumchlorit-Bleichsystem noch ein Unterschied zwischen dem Natriumchlorit-Bleichsystem und dem 3,3 % Wasserstoffperoxid enthaltenden Bleichgel erkannt. Demnach lieferte die computergesteuerte Farbbestimmung mit SpectroShade in diesen Fällen eindeutig differenziertere und somit aussagekräftigere Messwerte.

Dennoch ergab der Vergleich der beiden Chromascop Complete-Farbbestimmungsmethoden (visuell und Spektralphotometer) in 45,8 % der Fälle eine Übereinstimmung der jeweiligen Messwerte. Die vom verblindeten Untersucher mit Farbring bestimmten Farben wurden jedoch durchschnittlich um $1,2 \pm 5,2$ Farbgrade höher empfunden als die vom Computer gemessenen Farbwerte. Der hohe Korrelationskoeffizient nach Spearman von $r=0,9$ zeigte einen starken gleichsinnigen Zusammenhang zwischen den digital und visuell gemessenen Messwerten ($p<0,01$). Jedoch wiesen die vor dem Bleichvorgang visuell mit dem „Farbring“ bestimmten Zahnfarbengrundwerte (m_0 =baseline) im Vergleich zu den Grundwerten, die computergestützt errechnet worden waren, eine signifikant breitere Streuung auf. Mit der computergestützten Farbbestimmungsmethode waren folglich exaktere Messungen möglich. Darüber hinaus wurde zwischen den Messzeitpunkten m_0 und m_1 mit der visuellen Farbbestimmung eine Aufhellung der Proben der Kontrollgruppe (KTRL) festgestellt, die lediglich mit Leitungswasser behandelt worden war. Bei der Messung der Kontrollgruppe mit SpectroShade wurden dagegen keine Veränderungen festgestellt. Die Objektivität der computergestützten Messmethode wurde somit deutlich aufgezeigt.

Die Werte der visuellen Farbbestimmung könnten andererseits die subjektive Beeinflussung des menschlichen Auges beziehungsweise die psychische Suggestion durch die Erwartungshaltung des verblindeten Untersuchers, dass während der Behandlung eine Aufhellung stattgefunden haben müsste, aufzeigen. Im Rahmen dieser In-vitro-Untersuchung wurde zwar festgestellt, dass

das menschliche Auge bei der Farbmessung mit der konventionellen Farbskala konstante Werte erfasst, es bei dieser Messung jedoch gleichzeitig zu gewissen Abweichungen (bedingt durch subjektive Beeinflussung) kommt. CULPEPPER zeigte 1970, dass die visuelle Farbbestimmung in vielen Fällen nicht verlässlich und unpräzise war. Der Eindruck von Farbe mit dem bloßen Auge ist vielmehr subjektiv (nicht objektiv oder exakt messbar) und wird daher von jedem Individuum in der Wahrnehmung unterschiedlich eingestuft (CULPEPPER, 1970; WYSZEKI et al., 1982; BROWING, 2003). HUGO et al. (2005) beschrieben das Sehen als Zusammenwirken verschiedener Prozesse wie physische Faktoren der Umgebung, physiologische Prozesse der Augen und psychologische Zustände des menschlichen Gehirns. Alle diese variablen Faktoren, die potenzielle Fehlerquellen darstellen, sollten durch die instrumentelle Farbmessung (Kolorimetrie) ausgeschlossen werden, was das Erhalten von neutralen, reproduzierbaren Ergebnissen zur Folge hat (HUGO et al., 2005). PAUL et al. (2002) und KOHLMAYER et al. (2002) zeigten darüber hinaus gute Ergebnisse der Reproduzierbarkeit valider Messwerte von verschiedenen Spektrometern auf.

Dennoch zeigt die hohe Korrelation der in dieser Studie visuell bestimmten Farbwerte mit den digitalen Pendanten, dass unabhängig von den subjektiven Messungenauigkeiten durchaus konstante Relationen bestehen. Beide Farbbestimmungsmethoden sind zur Beobachtung von Farbveränderungen gewissen Grades geeignet. Das verwendete Spektralphotometer lieferte jedoch differenziertere und reproduzierbare Werte, die im Vergleich zur visuellen Farbbestimmung auch geringere Farbunterschiede signifikant aufdeckten. Daher scheint das in dieser Untersuchung angewendete Spektralphotometer der visuellen Farbbestimmung aufgrund der höheren Objektivität überlegen zu sein. Die Anwendung des Spektralphotometers stellt somit eine viel versprechende Methode dar, um klinische Zahnfarbveränderungen zu messen, die zum Beispiel im Rahmen von Zahnaufhellungen in der zahnärztlichen Praxis auftreten oder im Rahmen von klinischen Studien detektiert werden sollen. Als weiterer Vorteil der computer-gesteuerten Farbbestimmung ist die hohe Standardisierung dieser Methode zu betrachten, die Reproduzierbarkeit gewährleistet, welche durch die visuelle Farbringbestimmung nicht erreicht wird.

6.2.3.3 Vergleich mit der Vita Classic-Farbskala

Die Vita Classic-Skala, welche in der Zahnmedizin am häufigsten angewendet wird, ist bis heute als Standard anzusehen (HUGO et al., 2005). Dennoch wurden für diese Farbskala verschiedene Nachteile in Bezug auf die Vollständigkeit der Spanne der enthaltenen Zahnfarben festgestellt

(GOODKIND et al., 1987; SCHWABACHER et al., 1990; ZANTNER et al., 2006b). In der vorliegenden Studie sollte unter anderem die Fragestellung erörtert werden, ob die Chromascop Complete-Farbskala der Vita Classic-Farbskala tatsächlich überlegen ist. Aus diesem Grund wurde die computergestützte Auswertung der zuvor mit Spectroshade aufgenommenen Bilder sowohl mit der Chromascop Complete-Farbskala als auch mit der Vita Classic-Farbskala durchgeführt. Die so erhaltenen Messwerte wurden dann verglichen. Die Ergebnisse der Farbveränderungen, die computergestützt mit Vita Classic-Farbskala ermittelt wurden, waren denen der Chromascop Complete-Farbskala ähnlich. Der Korrelationskoeffizient nach Spearman zwischen den computergestützten Vita Classic-Farbmesswerten und den Werten der visuellen Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Skala, lässt mit $r=0,83$ ($p<0,01$) auf eine hohe Korrelation schließen. Der Korrelationskoeffizient zwischen den computergestützten Farbmesswerten, die zum einen mit der Chromascop Complete-Skala und zum anderen mit der Vita Classic-Skala bestimmt worden waren, betrug $0,8$ (Spearman, $p<0,01$). Somit war in diesem Fall ebenfalls eine annähernd gleichhohe Korrelation gegeben.

Der signifikante Unterschied zwischen dem niedrig konzentrierten Präparat mit 2 % Wasserstoffperoxidkonzentration und den höher konzentrierten Präparaten (3,3 % und 5,9 % WP) und auch die signifikanten Unterschiede der Bleichmittel mit der Kontrollgruppe, die Leitungswasser enthielt, konnte auch bei der Anwendung der Vita Classic-Farbskala aufgezeigt werden (Mann-Whitney-U-Test, $p>0,0018$). Auch für das Produkt der Gruppe 7 (BK), das Natriumchlorit enthielt, wurden mit der Vita Classic-Farbskala signifikante Unterschiede zu den Produkten, die 5,9 % Wasserstoffperoxid enthielten, aufgedeckt. Im Gegensatz zu den Messwerten mit der Chromascop Complete-Farbskala wurde jedoch kein Unterschied zwischen sämtlichen Messwerten der Gruppen 1, 2 und 4 (jeweils VSPO mit 2 % WP) mit den Messwerten der Gruppe 7 (BK) festgestellt. Ebenso wurde bei der computergestützten Messreihe mit der Vita Classic-Farbskala kein signifikanter Unterschied zwischen der Aufhellungseffektivität des 3,3 % Wasserstoffperoxid enthaltenden Bleichmittels und dem Bleichsystem auf Natriumchloritbasis gefunden (Mann-Whitney-U-Test, $p>0,0018$).

Beim Vergleich der Messwerte dieser Untersuchung zeigte sich, dass mit der Chromascop Complete-Farbskala differenziertere Ergebnisse im Vergleich zu denen der Vita Classic-Farbskala erzielt wurden. Bei der Beurteilung der Ergebnisse aller Untersuchungen von Bleichmitteln und Bleichmethoden, die nur mit der Vita Classic-Farbskala durchgeführt worden sind, sollte daher bedacht werden, dass diese einen gewissen Grad an Ungenauigkeit aufweisen könnten.

6.2.4 Applikationsdauer

In einer Literaturübersicht zum Bleichen von Zähnen bezeichnete JOINER (2006) die Anwendungsdauer neben der Konzentration als Schlüsselfaktor. So war bezüglich des Einflusses der Applikationsdauer auf die Zahnfarbänderung in dieser In-vitro-Studie ein signifikanter Einfluss zu erwarten. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde jedoch gezeigt, dass die Variation der Anwendungsdauer bei dem Produkt, das 2 % Wasserstoffperoxid enthielt (VivaStyle Paint On), keinen signifikanten Einfluss auf die Zahnaufhellung hatte. Die Länge der Anwendungsdauer von niedrigkonzentrierten Bleichmitteln zur häuslichen Anwendung scheint demnach keinen Einfluss auf die Aufhellungseffektivität zu haben. Zu erklären wäre dies mit der Tatsache, dass die hauptsächliche Reaktion der nach Zerfall des Wasserstoffperoxidmoleküls entstandenen Sauerstoffradikale mit den Farbmolekülen innerhalb des Zahnes während der ersten Minuten nach der Applikation des Bleichmittels stattfindet (FASANARO, 1992). Daher konnte mit der geringfügigen Abänderung der Anwendungsdauer zwischen 10 und 20 Minuten in der vorliegenden Studie mit einem Produkt, das im Übrigen für eine kurzzeitige Anwendungsdauer konzipiert wurde, kein signifikanter Einfluss auf die Aufhellungseffektivität beobachtet werden. Die zweimalige Anwendung (VSPO2 & VSPO3) konnte im Vergleich zur nur einmal am Tag durchgeführten Anwendung (VSPO1) ebenfalls keinen signifikanten Unterschied für dieses Produkt aufzeigen.

6.2.5 Natriumchlorit

Das Natriumchlorit enthaltende Produkt der Gruppe 7 (Odol-med 3 Samtweiss Beauty-Kur) hellte die Versuchszähne *in vitro* nicht so stark auf wie alle anderen in dieser Studie untersuchten Bleichmittel, die Wasserstoffperoxid enthielten. Daraus lässt sich schließen, dass natürlich auch die Art des Wirkstoffes für die Aufhellungseffektivität *in vitro* von Bedeutung ist. Es stellt sich in diesem Zusammenhang die Frage, ob Bleichmittel auf Basis von Natriumchlorit gegenüber Wasserstoffperoxid enthaltenden Bleichmitteln *in vivo* ebenfalls eine geringere Aufhellungseffektivität besitzen.

6.2.6 Veränderungen der Knoop-Mikrohärte

Die Knoop-Mikrohärtemessungen zeigten, dass die größte prozentuale Härtereduktion bei Verwendung des Produktes Odol-med 3 Samtweiss Beauty-Kur (Natriumchlorit) resultierte. Auch die Härte der Zähne, die mit den Bleichprodukten Blend-a-med Whitestrips und Colgate Simply White behandelt worden waren (beide 5,9 % WP), verringerte sich nach den Bleichbehandlungen signifikant. Jedoch war nach der Lagerung in künstlichem Speichel bei diesen drei Gruppen eine signifikante Zunahme der Mikrohärte in Bezug zu den direkt nach dem Bleichen gemessenen Werte festzustellen. Lediglich die Schmelzoberflächen, die mit Odol-med 3 Samtweiss Beauty-Kur gebleicht worden waren, erlangten die Härte ihrer anfänglichen Grundwerte nicht wieder zurück ($p < 0,001$, Wilcoxon-Test). Die Produkte VivaStyle Paint On und VivaStyle, die Wasserstoffperoxidkonzentrationen von 2 % bis 3,3 % besitzen, zeigten ebenso wie die Zähne der Kontrollgruppe keine offensichtlichen Änderungen der Mikrohärte nach dem Bleichen. Signifikante Unterschiede der Mikrohärtewerte durch unterschiedliche Wirkzeiten beim Produkt VivaStyle Paint On konnten nicht beobachtet werden. Es wurde also in dieser Studie gezeigt, dass die Konzentration und die Art der untersuchten Wirkstoffe die Mikrohärte *in vitro* beeinflussten. Die Wirkdauer bei der Untersuchung des Produktes VivaStyle Paint On beeinflusste die Oberflächenhärte jedoch nicht signifikant.

Für die Messung der Knoop-Härte wurde im inzisalen Approximalbereich der Versuchszähne eine plane Messfläche präpariert. Somit wurde ein geringer Anteil der Schmelzoberfläche entfernt. Obwohl in der Vergangenheit in verschiedenen Untersuchungen festgestellt wurde, dass diese äußere Schmelzstruktur härter als der innere Schmelz sei (KARLSTRÖM et al., 1931; CALDWELL et al., 1957), stellten CRAIG und PEYTON (1958) fest, dass es keinerlei signifikante Härteunterschiede des Schmelzes zwischen Schmelz-Dentin-Grenze und Schmelzoberfläche gibt. Neuere Daten widersprechen diesem jedoch und lassen erkennen, dass entsprechend der Mineraldichte die Schmelzoberfläche härter als tiefere Schmelzschichten ist (SCHEMEL et al., 1984). Daher wurden in dieser Untersuchung alle Schmelzproben durch die zweiwöchige Lagerung in künstlichem Speichel remineralisiert und somit auch die präparierten Messflächen in einheitlicher Weise wieder gehärtet.

Nach GUSTAFSON und KLING (1948) können verschiedene Messwerte für die Härte innerhalb des Schmelzes beobachtet werden, die jedoch auf Änderungen der Ausrichtung des Eindringkörpers zurückzuführen sind. Daher wurden in der vorliegenden Studie die planen Messflächen der Proben vor der Mikrohärtemessung parallel zur Tischoberfläche ausgerichtet, sodass die Achse des Eindringkörpers senkrecht zu dieser verlief. So wurden Ungenauigkeiten der Werte aufgrund

der zuvor erörterten Messungenauigkeit ausgeschlossen. Messungenauigkeiten aufgrund von natürlichen Strukturvariationen des Schmelzes konnten nicht ausgeschlossen werden. Diese Strukturanomalien treten in der Entwicklung des Individuums durch temporär fehlerhafte Ameloblastensezernierung sowie präeruptiv oder posteruptiv durch Spannungsphänomene infolge raschen Temperaturwechsels und Drucks auf (SCHRÖDER, 2000a). Zentrale Schneidezähne weisen in 80 % bis 90 % der Fälle klinisch sichtbare Schmelzsprünge auf (ZACHRISSON et al., 1980). SCHRÖDER (2000a) kommt zu dem Schluss, dass die als Strukturfehler interpretierten Variationen der Schmelzstruktur und der Mineralisationsdichte sowohl im Inneren des Schmelzes als auch an seiner Oberfläche sehr häufig vorkommen, diese jedoch nur zu etwa 4 % klinisch ohne Spezialbeleuchtung sichtbar sind.

Es ist bei Evaluation der Knoop-Mikrohärte Daten zu beachten, dass verschiedene Faktoren der Schmelzhärtung während der abschließenden Remineralisationsphase *in vitro* nicht beachtet werden konnten. So führen Speichelfluss, Pufferkapazität des Speichels, orale Hygiene (BITTER et al., 1998), Behandlung mit Fluoriden (FLAITZ et al., 1996; ATTIN et al., 1997) sowie längere Remineralisationszeiten nach der Bleichbehandlung *in vivo* zu einem stärkeren Anstieg der Mikrohärte (RODRIGUES et al., 2001).

Die Oberflächenmikrohärte der Probenzähne der Gruppe 1, in der der VivaStyle Paint On-Lack täglich für 20 Minuten angewendet wurde (VSPO1), war nach der Bleichbehandlung und daran anschließender Lagerung in künstlichem Speichel (m0-m2) signifikant angestiegen ($p < 0,006$, Wilcoxon-Test). RODRIGUES et al. (2001) und DE OLIVEIRA et al. (2003) beschrieben in der Vergangenheit signifikante Anstiege der Schmelzmikrohärte nach Bleichbehandlungen mit Carbamidperoxid. Eine den Zahnschmelz härtende Wirkung des in dieser Studie verwendeten Lackes VivaStyle Paint On kann jedoch höchstwahrscheinlich ausgeschlossen werden, da in den beiden Gruppen, in denen dieses Bleichmittel ebenfalls zur Anwendung kam (VSPO2 & VSPO3), keine signifikanten Härtezunahmen festgestellt wurden. Es ist vielmehr kritisch zu hinterfragen, ob der Zeitraum der Lagerung in künstlichem Speichel, welcher nach der Verfärbung der Probenzähne mit Tee und Rotwein erfolgte, lang genug gewählt war, die Zähne dieser Gruppe ausreichend zu remineralisieren. Eine unvollständige Remineralisation der Proben vor der Bleichbehandlung und eine weitere Remineralisierung während der Lagerung in der Remineralisationsflüssigkeit könnte die weitere Zunahme der Oberflächenhärte erklären.

7. Schlussfolgerungen

Diese Untersuchung zeigte:

1. Die Konzentration von Wasserstoffperoxid hatte *in vitro* einen signifikanten Einfluss auf die Aufhellungseffektivität der untersuchten Bleichprodukte zur häuslichen Anwendung. Mit der computergestützten Farbbestimmung konnten für die verschiedenen Präparate mit 2 %, 3,3 % und 5,9 % Wasserstoffperoxid signifikante Unterschiede festgestellt werden. Die stärkste Aufhellung wurde bei der Verwendung der höchsten Wasserstoffperoxidkonzentration (5,9 %) festgestellt.

2. Die Variation der Anwendungsdauer hatte bei Anwendung des Bleichmittels mit 2 % Wasserstoffperoxidkonzentration *in vitro* keinen signifikanten Einfluss auf die Zahnaufhellung.

3. Das Natriumchlorit enthaltende Bleichmittel führte *in vitro* zu einer signifikanten Aufhellung der untersuchten Probezähne. Jedoch wurde für dieses Produkt mit der computergestützten Farbmessung mit Chromascop Complete-Farbskala eine signifikant niedrigere Aufhellungseffektivität als für die Bleichmittel auf Wasserstoffperoxidbasis (2 %, 3,3 % und 5,9 %) beobachtet.

4. *In vitro* waren Änderungen der Mikrohärtigkeit der behandelten Schmelzoberflächen nach der Bleichanwendung der Produkte mit 5,9 % Wasserstoffperoxid festzustellen. Diese waren nach einer Remineralisierungsphase im künstlichen Speichel wieder zu den Ausgangswerten zurückgekehrt. Die Verwendung der Präparate mit niedrigeren Wasserstoffperoxidkonzentrationen hatte keine Oberflächenveränderungen zur Folge. Nach dem Gebrauch des Präparates auf Natriumchloritbasis wurden dagegen signifikante Veränderungen der Oberflächenmikrohärtigkeit der Proben beobachtet. Die Mikrohärtigkeit der Proben dieser Gruppe war nach der sechswöchigen Remineralisierungsphase nicht zu den Grundwerten zurückgekehrt.

5. Die für die Bleichmittel mit 5,9 % Wasserstoffperoxid und Natriumchlorit gemessenen niedrigen pH-Werte unterstützen in Hinsicht auf die resultierenden Mikrohärtigkeitswerte die Aussagen verschiedener Studien, dass die Azidität eines Bleichmittels die Wahrscheinlichkeit von Schmelzveränderungen zu beeinflussen scheint.

6. Der Vergleich der Farbbestimmungsmethoden zeigte *in vitro* eine hohe Korrelation. Die computergestützte Farbbestimmungsmethode lieferte jedoch objektive und reproduzierbare Werte und schien somit der visuellen Farbbestimmung überlegen zu sein. Die computergestützte Farbbestimmung ist eine vielversprechende Methode, um klinische Zahnfarbveränderungen zu beobachten.

8. Zusammenfassung

In dieser In-vitro-Studie wurde die Aufhellungseffektivität verschiedener Bleichprodukte zur häuslichen Anwendung mit niedrig konzentrierten Wirkstoffen (Carbamidperoxid=CP, Natriumchlorit=NC, Wasserstoffperoxid=WP) untersucht. Zu diesem Zweck kam sowohl die visuelle Farbbestimmung als auch die computergestützte Farbmessung (SpectroShade) zur Anwendung. Der Schmelz der Versuchszähne wurde zusätzlich mit Knoop-Mikrohärtemessungen auf Oberflächenveränderungen untersucht. Nach der Verfärbung der Versuchszähne folgten die Bleichbehandlungen (Gruppen 1-6 & 8: 14 Tage, Gruppe 7: 3 Wochen) in folgenden Gruppen: 1. VivaStyle Paint On (6 % CP=2 % WP, 1×20 min.), 2. VivaStyle Paint On (6 % CP = 2 % WP, 2×20 min.), 3. Colgate Simply White (5,9 % WP, 2×30 min.), 4. VivaStyle Paint On (6 % CP=2 % WP, 2×5 min.), 5. VivaStyle (3,3 % WP, 2×30 min.), 6. WhiteStrips (5,9 % WP, 2×30 min.), 7. BeautyKur (NC, 2×10 min.), 8. Kontrollgruppe (Leitungswasser, 60 min.).

Vor und nach der Bleichtherapie wurden die Farben mit Chromascop Complete-Farbskala visuell und computergestützt gemessen. Zusätzlich wurde computergestützt mit der Vita Classic-Farbskala gemessen. Die Mikrohärtemessungen wurden vor (m0), nach (m1) der Bleichtherapie und sechs Wochen nach Lagerung in künstlichem Speichel (m2) durchgeführt. Alle in dieser In-vitro-Studie untersuchten Bleichmittel führten im Vergleich zur Kontrollgruppe zu einer signifikanten Aufhellung (t-Test; $p > 0,0005$). Höhere Konzentrationen von Wasserstoffperoxid führten dabei zu einer stärkeren Bleichwirkung. Die Verwendung von Natriumchlorit zeigte das geringste Aufhellungsvermögen. Trotz unterschiedlicher Anwendungsdauer des Bleichmittels VivaStyle Paint On wurde keine signifikante Änderung der Aufhellungseffektivität beobachtet.

Der Vergleich der Farbbestimmungsmethoden ergab eine hohe Korrelation von $r=0,9$ (Spearman). Das verwendete Photospektrometer lieferte jedoch objektive und reproduzierbare Werte, und scheint daher im Vergleich mit der visuellen Farbbestimmung überlegen zu sein. Die computergesteuerte Farbbestimmung ist eine viel versprechende Methode, um klinische Zahnfarbveränderungen zu beobachten.

Bei Anwendung der Bleichmittel mit 2 % WP und 3,3 % WP kam es zu keiner signifikanten Änderung der Mikrohärte. Nach der Anwendung der Bleichmittel mit 5,9 % WP wurden auf den Schmelzoberflächen signifikante Härtereduktionen festgestellt (Wilcoxon-Test; $p > 0,0005$). Diese kehrten jedoch nach der sechswöchigen Lagerung in künstlichem Speichel zu den Grundwerten zurück. Bei Anwendung des Produktes auf Natriumchloritbasis resultierten signifikante Verringerungen der Oberflächenmikrohärte, die auch nach sechswöchiger Remineralisierungsphase in künstlichem Speichel nicht zu den Ausgangswerten zurückkehrten.

9. Summary

This in-vitro study analyzed the bleaching efficacy of various tooth whiteners for home use with a low concentration of active substances (carbamide peroxide=CP, sodium chlorite=SC, hydrogen peroxide=HP). To this end both the visual tooth shade determination and the computer-aided tooth shade determination (SpectroShade) was applied. At the same time the enamel of the specimen was examined for a change of the surface by using Knoop microhardness measurements. After staining 288 anterior teeth the following bleaching procedures were carried out in groups as follows (group 1–6 & 8: for 2 weeks; group 7: for 3 weeks): 1. VivaStyle Paint On (6 % CP=2 % WP, 1 x 20 min.), 2. VivaStyle Paint On (6 % CP = 2 % HP, 2 x 20 min.), 3. Colgate Simply White (5,9 % HP, 2 x 30 min.), 4. VivaStyle Paint On (6 % CP =2 % HP, 2 x 5 min.), 5. VivaStyle (3,3 % HP, 2 x 30 min.), 6. WhiteStrips (5,9 % HP, 2 x 30 min.), 7. BeautyKur (SC, 2 x 10 min.), 8. the control group (tap water, 60 min.).

Before and after the bleaching the shades of the teeth were measured visually and computer-aided by using the tooth shade guide Chromascop Complete. In addition the shades were determined computerized with the tooth shade guide Vita Classic. A measurement of the microhardness of the teeth was done before (m0) and after (m1) the bleaching and 6 weeks after the storage in artificial saliva (m2). Each bleaching agent tested in this in-vitro study lead to a significant lightening of the tooth color in comparison to the control group (t-Test; $p > 0,0005$). A higher concentration of hydrogen peroxide resulted in a stronger bleaching effect. The application of sodium chlorite showed the least whitening effect. A different period of time of applying VivaStyle paint on did not show a significant difference with regard to the lightening of the color of the tooth. The comparison of methods of tooth color determination showed a high correlation of $r = 0,9$ (Spearman). But the spectrophotometer showed more reproducible and objective data and seems to be superior to the visual determination, therefore. The computer-aided tooth color determination is a promising method to monitor clinical changes of the color of the tooth. The use of whiteners with 2 % WP and 3,3 % WP did not lead to any significant change of the microhardness. After applying bleaching agents with 5,9 % WP, a significant reduction of hardness on the surface of the enamel was observed (Wilcoxon-Test; $p > 0,0005$). However, these reverted to baseline after the six-week-long storage in artificial saliva. The application of the product containing sodium chlorite caused significant reductions of the microhardness, which did not revert to the baseline values even after the period of remineralization in artificial saliva for six weeks.

10. Literaturverzeichnis

- Alonso de la Pena V, Balboa Cabrita O (2006). Comparison of the clinical efficacy and safety of carbamide peroxide and hydrogen peroxide in at-home bleaching gels. *Quintessence Int*, 37: 551-556
- Al-Qunaian TA, Matis BA, Cochra MA (2006). In vivo kinetics of bleaching gel with three-percent hydrogen peroxide within the first hour. *Oper Dent*, 28: 236-241
- Araujo EM, Baratieri LN, Vieira LC, Ritter AV (2003). In situ effect of 10% carbamide peroxide on microhardness of human enamel: function of time. *J Esthet Restor Dent*, 15: 166-174
- Attin T (1998). Sicherheit und Anwendung von Bleichtherapien mit Carbamidperoxid. *Dtsch Zahnärztl Z*, 53: 11-16
- Attin T, Buchalla W, Gollner M, Hellwig E (2000). Use of variable remineralization periods to improve the abrasion resistance of previously eroded enamel. *Caries Res*, 34: 48-52
- Attin T, Burgmaier GM, Paque F (2001). Neues zur Zahnaufhellung mit Carbamidperoxid-haltigen Gelen. *Zahnärztl Mitt*, 91: 468-472
- Attin T, Hickel R (2000). Wissenschaftliche Stellungnahme: Bleichen von verfärbten Zähnen. Stellungnahme der DGZMK 6/95 V2.0, Stand 7/00
- Attin T, Kielbassa AM (1995). Die Bleichbehandlung- ein fester Bestandteil ästhetischer Zahnheilkunde. *Zahnärztl Mitt*, 22: 2674-2681
- Attin T, Kielbassa AM, Schwanenberg M, Hellweg E (1997). Effect of fluoride treatment on remineralization of bleached enamel. *J Oral Rehabil*, 24: 282-286
- Attin T, Meyer K, Hellwig E, Buchalla W, Lennon AM (2003). Effect of mineral supplements to citric acid on enamel erosion. *Arch Oral Biol*, 48: 753-759
- Attin T, Müller T, Patyk A, Lennon AM (2004). Influence of bleaching on fracture toughness of enamel. *Oper Dent*, 29: 188-195
- Attin T, Vollmer D, Wiegand A, Attin R, Betke H (2005). Subsurface microhardness of enamel and dentin after different external bleaching procedures. *Am J Dent*, 18: 8-12
- Ari H, Üngör M (2002). In vivo comparison of different types of sodium perborate used for intracoronary bleaching of discoloured teeth. *Int Endodont J*, 35, 433-436
- Auschill TM, Hellweg E, Schmidale S, Hannig M, Arweiler NB (2002). Effectiveness of various whitening techniques and their effects on the enamel surface. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 112: 894-900
- Auschill TM, Hellweg E, Schmidale S, Sculean A, Arweiler NB (2005). Efficacy, side-effects and patients' acceptance of different bleaching techniques (OTC, in-office, at-home). *Oper Dent*, 30: 156-163

- Ayad F, Giniger M, Proskin HM et al. (2002). Clinical comparison of the stain-removal efficacy of a novel liquid whitening gel containing 18% carbamide peroxide and a commercially available whitening dentifrice. *Compend Contin Educ Dent*, 23: 18-25
- Baltzer A, Kaufmann-Jinoian V (2004a). Die Bestimmung der Zahnfarben. *Quintessenz Zahntech*, 30: 726-740
- Baltzer A, Kaufmann-Jinoian V (2004b). Die digitale Farbmessung der Zähne. *Quintessenz Zahntech*, 30: 834-858
- Basting RT, Rodrigues Junior AL, Serra MC (2001). The effect of 10% carbamide peroxide bleaching material on microhardness of sound and demineralized enamel and dentin in situ. *Oper Dent*, 26: 531-539
- Basting RT, Rodrigues AL, Serra MC (2003). The effects of seven carbamide peroxide bleaching agents on enamel microhardness over time. *Am J Dent Assoc*, 134: 1335-1342
- Ben-Amar A, Liberman R, Gorfil C, Bernstein Y (1995). Effect of mouthguard bleaching on enamel surface. *Am J Dent*, 8: 29-32
- Berns RF (2000). *Billmeyer and Saltzman`s principles of color technology*, 3rd edition. Wiley, New York: 75-104
- Beyer H, Walter W (1998). *Lehrbuch der organischen Chemie*, 23. Auflage. Hirzel Verlag, Stuttgart: 38-39
- Bitter NC (1998). A scanning electron microscope study of the long-term effect of bleaching agents on the enamel surface in vivo. *Gen Dent*, 46: 84-88
- Bowles WH, Burns H (1992). Catalase/Peroxidase activity in dental pulp. *J Endod*, 18: 527-534
- Braun A, Jepsen S, Krause F (2007). Spectrophotometric and visual evaluation of vital tooth bleaching employing different carbamide peroxide concentrations. *Dent Mater*, 23: 165-169
- Breuer H. (2006). *dtv-Atlas Chemie, Band II, organische Chemie & Kunststoffe*. Deutscher-Taschenbuch Verlag
- Browning WD (2003). Use of shade guides for color measurement in tooth-bleaching studies. *J Esthet Restor Dent*, 15: 13-20
- Brunton PA, Ellwood R, Davies R (2004). A six-month study of two self-applied tooth whitening products containing carbamide peroxide. *Oper Dent*, 29: 623-626
- Buskes JA, Christoffersen J et al. (1985). Lesion formation and lesion remineralization in enamel under constant composition conditions. A new technique with applications. *Caries Res*, 19: 490-496

- Cherry DV, Bowers DE, Thomas L, Redmond AF (1993). Acute toxicological effects of ingested tooth whiteners in female rats. *J Dent Res*, 72: 1298-1303
- CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) (1976). Colorimetry, official recommendations of the International Commission on Illumination. Publication CIE no. 15 (E-1.3.1), Paris, France: Bureau Central de la CIE, 75782 Paris
- Cina SJ, Downs JCU, Conradi SE (1994). Hydrogen peroxide: a source of lethal oxygen embolism. *Am J Forensic Med Pathol*, 15: 44-50
- Cladwell RC, Muntz ML, Gilmore RW, Pigman W (1957). Microhardness studies of intact surface enamel. *J Dent Res*, 36: 732
- Collins LZ, Maggio B, Liebman J, et al. (2004). Clinical evaluation of a novel whitening gel, containing 6% hydrogen peroxide and a standard fluoride toothpaste. *J Dent*, 32: 13-17
- Cooper JS, Bokmeyer TJ, Bowles WH (1992). Penetration of the pulp chamber by carbamide peroxide bleaching agents. *J Endod*, 18: 315-317
- Craig RG, Peyton FA (1958). The microhardness of enamel and dentin. *J Dent Res*, 38: 661-668
- Culpepper WD (1970). A comparative study of shade-matching procedures. *J Prosthet Dent*, 24: 166-173
- da Costa Filho LC, da Costa CC, Sória ML, Taga R (2002). Effect of home bleaching and smoking on marginal gingival epithelium proliferation: a histologic study on woman. *J Oral Pathol Med*, 31: 473-480
- Dahl JE, Becher R (1995). Acute toxicity of carbamide peroxide and a commercially available tooth-bleaching agent in rat. *J Dent Res*, 74: 710-714
- Dahl JE, Pallesen U (2003). Tooth bleaching - a critical review of the biological aspects. *Crit Rev Oral Biol Med*, 14: 292-304
- Date RF, Yue J, Barlow AP, Bellamy PG, Prendergast MJ, Gerlach RW (2003). Delivery, substantivity and clinical response of a direct application percarbonate tooth whitening film. *Am J Dent*, 16: 3-8
- de Freitas PM, Basting RT, Rodrigues JA, Serra MC (2002). Effects of two 10% peroxide carbamide bleaching agents on dentin microhardness at different time intervals. *Quintessence Int*, 33: 370-375
- Deliperi S, Bardwell DN (2005). Two-year clinical evaluation of nonvital tooth whitening and resin composite restorations. *J Esthet Restor Dent*, 17: 369-379
- de Oliveira R, Basting RT, Rodrigues JA, Rodrigues AL, Serra MC (2003). Effects of a carbamide peroxide agent and desensitizing dentifrices on enamel microhardness. *Am J Dent*, 16: 42-46

- de Sesso JM, Lavin AL, Hsia SM, Mavis RD (2000). Assessment of the carcinogenicity associated with oral exposures to hydrogen peroxide. *Food Chem Toxicol*, 38: 1021-1041
- Dunn WJ, Murchison DF, Broome JC (1996). Esthetics: patients' perceptions of dental attractiveness. *J Prosthodont*, 5: 166-171
- Duschner H, Gotz H, White DJ, Kozak KM, Zoladz JR (2006). Effects of hydrogen peroxide bleaching strips on tooth surface color, surface microhardness, surface and subsurface ultrastructure, and microchemical (Raman spectroscopic) composition. *J Clin Dent*, 17: 72-78
- Edmunds DH, Whittaker DK, Green RM (1988). Suitability of human, bovine, equine, and bovine tooth enamel for studies of artificial bacterial carious lesions. *Caries Res*, 22: 327-336
- Erler M, Schiele R, Lutz C, Bartsch R, Glockmann E (2005). Untersuchungen zu Wirkungen und Nebenwirkungen eines Zahnweißsystems auf Chlorit-/Chordioxidbasis. *Dtsch Zahnärztl Z*, 60: 112-114
- Ernst CP, Marroquin BB, Zönnchen-Willerhausen B (1996). Effects of hydrogen peroxide containing bleaching agents on the morphology of human enamel. *Quintessence Int*, 27: 53-56
- Esser M, Tinschert J, Marx R (1998). Materialkennwerte der Zahnhartsubstanz des Rindes im Vergleich zur humanen Zahnhartsubstanz. *Dtsch Zahnärztl Z*, 53: 713-717
- Fasanaro TS (1992). Bleaching teeth: history, chemicals and methods used for common tooth discolorations. *J Esthet Dent*, 4: 71-78
- Feinmann RA, Goldstein RE, Garber DA (1987). Bleaching teeth. Quintessence, Chicago
- Featherstone JDB, ten Cate JM, Shariati M, Arends J (1983). Comparison of artificial caries-like lesions by quantitative microradiography and mikrohardness profiles. *Caries Res*, 17: 385-391
- Fischer D (2003). Minimal-invasiv gegen verfärbte Zähne. *DZW*, 2003, 26: 12
- Flaitz CM, Hicks MJ (1996). Effects of carbamide peroxide whitening agents on enamel surfaces and caries-like lesion formation: an SEM and polarized light microscopic in vitro study. *ASDC J Dent Child*, 63: 249-256
- Fleury RA, Rapson WH (1969). The contribution of alpha-carbonyl compounds to the colour of groundwood. *Pulp Paper Canada*, 12: 517-524.
- Floyd RA (1997). The effect of peroxides and free radicals on body tissues. *J Am Dent Assoc*, 128: 37-40
- Freitag M, Hellwig E (2006). Update zum Thema Kofferdam. *Zahnärztl Mitt*, 96: 20-26
- Georg K (1952). Ein Härteprüfer für kleine Lasten. *Microtechnic, Lausanne Vol. VI/ Nr.1*

- Gerlach RW, Gibb RD, Sagel PA (2000). A randomized clinical trial comparing a novel 5.3% hydrogen peroxide whitening strip to 10%, 15%, and 20% carbamide peroxide tray-based bleaching systems. *Compend Contin Educ Dent*, 29: 22-28
- Gerlach RW, Gibb RD, Sagel PA (2002). Initial color change and color retention with a hydrogen peroxide bleaching strip. *Am J Dent*, 15: 3-7
- Gerlach RW, Zhou X (2001). Vital bleaching with whitening strips: summary of clinical research on effectiveness and tolerability. *J Contemp Dent Pract*, 3: 1-16
- Gierer J (1990). Basic principles of bleaching. Part 2: Anionic processes. *Holzforschung*, 44, 395-400
- Goodkind RJ, Keenan K, Schwabacher WB (1987). Use of a fiberoptic colorimeter for an in vivo color measurement of 2830 anterior teeth. *J Prosthet Dent*, 58: 535-542
- Greenwall L (2001). *Bleaching techniques in restorative dentistry*. London, Martin Dunitz, GB
- Gultz J, Kaim J, Scherer W, Gupta H (1999). Two in-office bleaching systems: a scanning electron microscope study. *Compend Contin Educ Dent*, 20: 965-970
- Gustafson G, Kling Ö (1948). Micro-hardness measurements in the human dental enamel. *Odontologisk Tidskr*, 56: 23-30
- Haywood VB, Houck VM, Heymann HO (1991). Nightguard vital bleaching: effects of various solutions on enamel surface texture and color. *Quintessence Int*, 22: 775-782
- Haywood VB, Leech T, Heymann HO, Crumpler D, Bruggers K (1990). Nightguard vital bleaching: effects on enamel surface texture and diffusion. *Quintessence Int*, 21: 801-804
- Haywood VB, Heymann HO (1989). Nightguard vital bleaching. *Quintessence Int*, 1989, 20: 173-176
- Hegedus C, Bistey T, Flora-Nagy E, Keszthelyi G, Jenei A (1999). An atomic force microscopy study on the effect of bleaching agents on enamel surface. *J Dent*, 27: 509-515
- Hick C, Hick A (2000). *Lehrbuch der Physiologie*, 3. Auflage, Urban & Fischer Verlag München
- Hoffmann-Axthelm W (1995). *Lexikon der Zahnmedizin*, 6. Auflage. Quintessenz Verlags GmbH, Berlin
- Holleman A, Wiberg N, Wiberg E (1995). *Organische Chemie*, 101. Auflage, deGruyter Verlag
- Horn DJ, Bulan-Brady J, Hicks ML (1998). Effect of smear layer removal on bleaching of human teeth in vitro. *J Endod* 24: 791-795
- Horn DJ, Bulan-Brady J, Hicks ML (1998). Sphere spectrophotometer versus human evaluation of tooth shade. *J Endod*, 24: 786-790

- Hosoya N, Honda K, Iino F, Arai T (2003). Changes in enamel surface roughness and adhesion of *Streptococcus mutans* to enamel after vital bleaching. *J Dent*, 31: 543-548
- Hugo B, Witzel T, Klaiber B (2005). Comparison of in vivo visual and computer-aided tooth shade determination. *Clin Oral Invest*, 9: 244-250
- Hunter RS, Harold RW (1987). The measurement of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. Wiley, New York: 63-68
- Joiner A, Thakker G (2004a). In vitro evaluation of a novel 6% hydrogen peroxide tooth whitening product. *J Dent*, 32: 19-25
- Joiner A, Thakker G, Cooper Y (2004b). Evaluation of a 6% hydrogen peroxide tooth whitening gel on enamel and dentine microhardness in vitro. *J Dent*, 32: 27-34
- Joiner A (2006). The bleaching of teeth: A review of the literature. *J Dent*, 34: 412-409
- Josey AL, Meyers IA, Romaniuk K, Symons AL (1996). The effect of a vital bleaching technique on enamel surface morphology and the bonding of composite resin to enamel. *J Oral Rehab*, 23: 244-250
- Kielbassa AM, Wrbas KT (2000a). Extrinsische und intrinsische Zahnverfärbungen. Teil 1: Ursachen. *Zahnärztl Welt*, 109: 177-183
- Kielbassa AM, Wrbas KT (2000b). Extrinsische und intrinsische Zahnverfärbungen. Teil 2: Therapie extrinsischer Verfärbungen. *Zahnärztl Welt*, 109: 246-253
- Kielbassa AM, Wrbas KT (2000c). Extrinsische und intrinsische Zahnverfärbungen. Teil 3: Weißmacherpasten oder Bleichtherapie? *Zahnärztl Welt*, 109: 322-328
- Kielbassa AM, Zantner C (2001). Zur Einordnung der Bleichtherapie im zahnärztlichen Behandlungsspektrum. *Quintessenz*, 52: 1105-1113
- Kern M, Paul SJ (2003). Digitale Farbbestimmung. *Dental-praxis*, 1: 31-36
- Kohlmeier B, Scheller H (2002). Zahnfarbenbestimmung mit dem PC-gestützten Messgerät „Digital Shade Guide“. *Dtsch Zahnärztl Z*, 57: 172-175
- Kunzelmann KH (2004). Farbbestimmungssysteme auf dem Prüfstand. Über Farbe streiten? *Dentalmagazin*, 3: 96-98
- Kwon YH, Huo MS, Kim KH, Kim SK, Kim YJ (2002). Effects of hydrogen peroxide on the light reflectance and morphology of bovine enamel. *J Oral Rehabil*, 29: 4713-4717
- Latscha HP, Kazmaier U, Klein A (2002). *Organische Chemie*. 5. vollständig überarbeitete Auflage, Springer Verlag: 515-516
- Leonard RH, Sharma A, Haywood VB (1998). Use of different concentrations of carbamide peroxide for bleaching teeth: an in vitro study. *Quintessence Int*, 29: 503-507

- Leonard RH, Teixeira EC, Garland GE, Ritter AV (2005). Effect on enamel microhardness of two consumer-available bleaching solutions when compared with a dentist-prescribed, home-applied bleaching solution and a control. *J Esthet Restor Dent*, 17: 343-351
- Li Y, Noblitt T, Zhang A, Origel A, Kafrawy A, Stookey G (1993). Effect of longterm exposure to a tooth whitener. *J Dent Res*, 72: 248
- Li Y (1996). Biological properties of peroxide-containing tooth whiteners. *Food Chem Toxicol*, 34: 887-904
- Li Y (1997). Toxicological considerations of tooth bleaching using peroxide-containing agents. *J Am Dent Assoc*, 128: 31-36
- Lips MB (2004). Blondierte Zähne. *Zahnärztl Mitt*, 14: 30-32
- Lopes GC, Bonissoni L, Baratieri LN, Vieira LC, Monteiro S (2002). Effect of bleaching agents on the hardness and morphology of enamel. *J Esthet Restor Dent*, 14: 24-30
- Lupi-Pegurier L, Muller M, Leforestier E, Bertrand MF, Bolla M (2003). In vitro action of Bordeaux red wine on the microhardness of human dental enamel. *Arch Oral Biol*, 48: 141-145
- Lussi A, Jaeggi T, Jaeggi-Scharer S (1995). Prediction of the erosive potential of some beverages. *Caries Res*, 29: 349-354
- Mahony C, Barker ML, Engel TM, Walden GL (2003). Peroxide degradation kinetics of a direct application percarbonate bleaching film. *Am J Dent*, 16: 9-11
- Marshall MV, Gragg PP, Packman EW, Wright PM, Cancro LP (2001). Hydrogen peroxide decomposition in the oral cavity. *Am J Dent*, 14: 39-45
- Matis BA, Gaião U, Blackman D, Schultz FA, Eckert GJ (1999). In vivo degradation of bleaching gel used in whitening teeth. *J Am Dent Assoc*, 130: 227-235
- McGuckin RS, Babin JF, Meyer BJ (1992). Alterations in human enamel surface morphology following vital tooth bleaching. *J Prosthet Dent*, 68: 754-760
- Meyer-Lueckel H, Umland N, Hopfenmüller W, Kielbassa AM (2004). Effect of mucin alone and in combination with various dentifrices on in vitro remineralization. *Caries Res*, 38: 478-483
- Mokhlis GR, Matis BA, Cochran MA, Eckert GJ (2000). A clinical evaluation of carbamide peroxide and hydrogen peroxide whitening agents during daytime use. *J Am Dent Assoc*, 131: 1269-1277
- Munro IC, Williams GM, Heymann HO, Kroes R (2006). Tooth whitening products and the risk of oral cancer. *Food Chem Toxicol*, 44: 301-315
- Munsell AH (1966). Munsell book of color. Macbeth Division of Colmorgen Corp., Baltimore

- Nathoo SA (1997). The chemistry and mechanisms of extrinsic and intrinsic discoloration. *J Am Dent Assoc*, 128: 6-10
- Nathoo S, Santana E, Zhang YP, et al. (2001). Comparative seven-day clinical evaluation of two tooth whitening products. *Compend Contin Educ Dent*, 22: 599-606
- Nathoo S, Giniger M, Proskin HM, et al. (2002a). Comparative 3-week clinical tooth-shade evaluation of a novel liquid whitening gel containing 18% carbamide peroxide and a commercially available whitening dentifrice. *Compend Contin Educ Dent*, 23: 12-17
- Nathoo S, Steward B, Zhang YP, et al. (2002b). Efficacy of a novel, nontray, paint on 18% carbamide peroxide whitening gel. *Compend Contin Educ Dent*, 23: 26-31
- Nathoo S, Stewart B, Petrone ME, Chaknis P, Zhang YP, De Vizio W, Volpe AR (2003). Comparative clinical investigation of the tooth whitening efficacy of two tooth whitening gels. *J Clin Dent*, 14: 64-69
- Nietzki R (1897). *Chemie der organischen Farbstoffe*, 3.Aufl., Springer-Verlag Berlin
- Nucci C, Marchionni S, Piana G, Mazzoni A, Prati C (2004). Morphological evaluation of enamel surface after application of two "home" whitening products. *Oral Health Prev Dent*, 2: 221-229
- Paul S, Peter A, Pietrobon N, Hämmerle CHF (2002). Visual and Spectrophotometric Shade Analysis of human teeth. *J Dent Res*, 81: 578-582
- Pécora JD, Cruz-Filho AM, Sousa Neto MD, Silva RG (1994). In vitro action of various bleaching agents on the microhardness of human dentin. *Braz Dent J*, 5: 129-134
- Pinheiro Jr. EG, Fidel RAS, Cruz-Filho AM, Silva RG, Pécora JD (1996). In vitro action of various carbamide peroxide gel bleaching of the microhardness of human enamel. *Braz Dent J*, 7: 75-79
- Poff AM, Pearce EL, Larsen MJ, Cutress TW (1997). Human supragingival in vivo calculus formation in relation to saturation of saliva with respect to calcium phosphates. *Arch Oral Biol*, 42: 93-99
- Potocnik I, Kosec L, Gaspersic D (2000). Effect of 10% carbamide peroxide bleaching gel on enamel microhardness, microstructure, and mineral content. *J Endod*, 26: 203-206
- Powell LV, Bales DJ (1991). Tooth bleaching: its effect on oral tissues. *J Am Dent Assoc*, 122: 50-54
- Rotstein I, Friedman S, Katznelson J, Sommer M, Bab I (1991). Histological characterization of bleaching-induced external root resorption in dogs. *J Endod*, 17: 436-441
- Rodrigues JA, Basting RT, Serra MC, Rodrigues Junior AL (2001). Effects of 10% carbamide peroxide bleaching materials on enamel microhardness. *Am J Dent*, 14: 67-71

- Sagel PA, Landrigan WF (2004). A new approach to strip-based tooth whitening: 14% hydrogen peroxide delivered via controlled low dose. *Compend Contin Educ Dent*, 25: 9-13
- SCCP (Scientific committee on consumers products) (2005). Opinion on Hydrogen Peroxide in Tooth Whitening Products. European Commission, SCCP 0844/04: 1-50
- Schemel W, Hummel K, Krekeler G (1984). Härteprüfungen an Schmelz, Dentin und Zement rezenter menschlicher Zähne. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, 10: 1029-1041
- Schmidt RF, Tews G (1995). *Physiologie des Menschen*, 26. Auflage. Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York: 305-306
- Schmidseder J, Rateitschak KH, Wolf HF (1998). *Farbatlant der Zahnmedizin: Nr.15, Ästhetische Zahnmedizin*. Georg Thieme Verlag: 35-54
- Schroeder HE (1997). *Pathobiologie oraler Strukturen*. Karger, Basel: 17-19
- Schroeder HE (2000). *Orale Strukturbiologie*. 5. unveränderte Auflage. Georg Thieme Verlag: 71-72(a), 79(b), 113(c), 118(d), 173(e)
- Schulte JR, Morrissette DB, Gasior EJ, Czajewski MV (1994). The effect of bleaching application time on the dental pulp. *J Am Dent Assoc*, 125: 1330-1335
- Schwabacher WB, Goodkind RJ (1990). Three-dimensional color coordinates of natural teeth compared with three shade guides. *J Prosthet Dent*, 64: 425-431
- Seghi RR, Johnston WM, O'Brien WJ (1989). Performance assessment of colorimetric devices on dental porcelains. *J Dent Res*, 68: 1755-1759
- Shahidi H, Barker ML, Sagel PA, Gerlach RW (2005). Randomized controlled trial of 10% hydrogen peroxide whitening strips. *J Clin Dent*, 16: 91-95
- Shannon H, Spencer P, Gross K, Tira D (1993). Characterization of enamel exposed to 10% carbamide peroxide bleaching agents. *Quintessence Int*, 24: 39-44
- Stindt DJ, Quenette L (1989). An overview of Gly-Oxide liquid in controll and prevention of dental disease. *Compend Contin Educ Dent*, 10: 514-519
- Stoll R, Jablonski-Momeni A, Stachniss V (2008). Die Verwendung der Farbskalen Vitapan Classical und Vita Bleachingguide 3D-Master zur Farbkontrolle beim Bleichen vitaler Zähne. *Dtsch Zahnärztl Z*, 63, 53-59
- Spalding M, Taveira LA, de Assis GF (2003). Scanning electron microscopy study of dental enamel surface exposed to 35% hydrogen peroxide: alone, with saliva, and with 10% carbamide peroxide. *J Esthet Restor Dent*, 15: 154-165
- Sulieman M, Addy M, Rees JS (2003). Development and evaluation of a method in vitro to study the effectiveness of tooth bleaching. *J Dent*, 31: 415-422

- Sulieman M, Macdonald E, Rees JS, Newcombe RG, Addy M (2006). Tooth bleaching by different concentrations of carbamide peroxide and hydrogen peroxide whitening strips: an in vitro study. *J Esthet Restor Dent*, 18: 93-101
- Tam LE, Abdool R, El-Badrawy W (2005). Flexural strength and modulus properties of carbamide peroxide-treated bovine dentin. *J Esthet Restor Dent*, 17: 359-367
- Tittley KG, Torneck CD, Smith DC (1988). The effect of concentrated hydrogen peroxide solutions on the surface morphology of human tooth enamel. *J Endod*, 14: 69-74
- Tredwin CJ, Naik S, Lewis NJ, Scully C (2006). Hydrogen peroxide tooth-whitening (bleaching) products: review of adverse effects and safety issues. *Br Dent*, 8: 371-376
- Turkun M, Sevgican F, Pehlivan Y, Aktener BO (2002). Effects of 10% carbamide peroxide on the enamel surface morphology: a scanning electron microscopy study. *J Esthet Restor Dent*, 14: 238-244
- Van der Burgt TP, ten Bosch JJ, Borsboom PC, Kortsmid WJ (1990). A comparison of new and conventional methods for quantification of tooth color. *J Prosthet Dent*, 63: 155-162
- Vogel RI (1975). Intrinsic and extrinsic discoloration of the dentition (a literature review). *J Oral Med*, 30: 99-104
- Vogler A (2003). Bleaching- und Prophylaxe-Behandlungen. *ZMK*, 5: 340-341
- Weber T (1999). *Memorix- Zahnmedizin*. Georg Thieme Verlag: 78(a), 336-337(b), 345(c)
- Weiler J (2002). Der devitale Frontzahn. *ZWP Spezial*, 3: 12-14
- White DJ, Featherstone JDBF (1992). A longitudinal microhardness analysis of fluoride dentifrices on lesion progression in vitro. *Caries Research*, 21: 502-512
- White DJ, Kozak KM, Zoladz JR, Duschner H, Gotz H (2002). Peroxide interactions with hard tissues: effects on surface hardness and surface/subsurface ultrastructural properties. *Compend Contin Educ Dent*, 23: 42-48
- White DJ, Kozak KM, Zoladz JR, Duschner HJ, Gotz H (2003). Effects of Crest Whitestrips bleaching on surface morphology and fracture susceptibility of teeth in vitro. *J Clin Dent*, 14: 82-87
- White DJ, Kozak KM, Zoladz JR, Duschner HJ, Gotz H. (2004). Effects of Crest Whitestrips bleaching on subsurface microhardness and ultrastructure of tooth enamel and coronal dentin. *Am J Dent*, 17: 5-11
- Wiegand A, Attin T (2006). Fortbildungsteil 1/06: Bewertung neuer Applikationsmethoden in der externen Bleichtherapie. *Zahnärztliche Mitt*, 10: 44-50
- Wiegand A, Vollmer D, Foitzik M, Attin R, Attin T (2005). Efficacy of different whitening modalities on bovine enamel and dentin. *Clin Oral Investig*, 9: 91-97

- Wille T, Pesun IJ, Combe EC, Lindquist GC, Hodges JS (2003). A clinical pilot study of the time-dependent composition of tooth bleaching systems. *J Oral Rehabil*, 30: 510-514
- Wyszecki G, Stiles WS (1982). *Color science concepts and methods, quantitative data and Formulae*, 2nd edition. Wiley, New York: 83-116
- Yeh ST, Su Y, Lu YC, Lee SY (2005). Surface changes and acid dissolution of enamel after carbamide peroxide bleach treatment. *Oper Dent*, 30: 507-515
- Zachrisson JU, Skogan O, Höymyhr S (1980). Enamel cracks in debonded, debanded, and orthodontically untreated teeth. *Amer J Orthod*, 77: 307-319
- Zantner C, Beheim-Schwarzbach N, Neumann K, Kielbassa AM (2007). Surface microhardness of enamel after different home bleaching procedures. *Dent Mater*, 23: 243-250
- Zantner C, Kielbassa AM (2006a). Fortbildungsteil 1/2006: Weißere Zähne – eine Bewertung von Weißmacher-Zahnpasten. *Zahnärztliche Mitt*, 10: 38-43
- Zantner C, Derdilopoulou F, Martus P, Kielbassa AM (2006b). Randomized clinical trial on the effectiveness of a new bleaching lacquer for self-application. *Oper Dent*, 31: 308-316
- Zalkind M, Arwaz JR, Goldman A, Rotstein I (1996). Surface morphology changes in human enamel, dentin and cementum following bleaching: a scanning electron microscopy study. *Endod Dent Traumatol*, 12: 82-88
- Zeek A, Eick S, Krone B, Schröder K (1997). *Chemie für Mediziner*, 3. Auflage. Urban & Schwarzenberg: 74-79(a), 115-119(b), 172(c)
- Zimmermann M, Hopp M (2006). Zahnärztliche Bleichsysteme- ein Ansatz zur objektiven Messung und Bewertung der Bleicheffizienz. *Zahn Prax*, 9: 20-24

Handbücher:

- Anleitung & Regeln für das Arbeiten mit dem Klein-Härteprüfer Durimed.
E. Leitz GmbH, Wetzlar (E.L.W.), D
- SpectroShade™ User manual, En (2002) (software version 2.20)
MHT™ Int., CH
- Tabellen zur Bestimmung der Knoophärte mit dem Klein-Härteprüfer Durimed.
E. Leitz GmbH, Wetzlar (E.L.W.), D

11. Anhang

11.1 Ergebnisse

Computergestützte Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala

Tab. 12: Ergebnisse der computergestützten Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala (CC) zu den Messzeitpunkten m0 und m1

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW in CC-Rängen	SD in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der MW in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der SD in CC-Rängen	p-Wert der Differenz
1 (VSPO1)	m0	36	23,2	1,4	9,6	4,3	<0,0005
	m1	36	13,7	4,5			
2 (VSPO2)	m0	36	22,8	2,7	9,6	4,3	<0,0005
	m1	36	12,9	4,6			
3 (SW)	m0	36	22,3	2,6	13,6	4,3	<0,0005
	m1	36	8,8	3,8			
4 (VSPO3)	m0	36	23,5	1,1	8,9	3,9	<0,0005
	m1	36	14,6	4,4			
5 (VS)	m0	36	22,9	1,9	11,8	4,5	<0,0005
	m1	36	11,2	5,0			
6 (WS)	m0	36	22,2	3,9	15,1	4,3	<0,0005
	m1	36	7,1	2,9			
7 (BK)	m0	36	22,3	2,4	5,7	3,0	<0,0005
	m1	36	16,6	4,7			
8 (KTRL)	m0	36	23,2	1,7	0,0	0,0	1,000
	m1	36	23,2	1,7			

Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) (angegeben in Farbrängen auf der CC-Farbskala) sowie deren Differenzen (in Farbabstufungen auf der CC-Farbskala) mit p-Wert (**p<0,05**: signifikanter Wert, t-Test), n = Anzahl der Proben

Tab. 13: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen m0-m1 zwischen den acht Gruppen (Mann-Whitney-U-Test, Bonferroni) bei computergestützter Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,505						
3 (SW)	<0,0005	0,001					
4 (VSPO3)	0,672	0,279	0,001				
5 (VS)	0,029	0,073	0,105	0,007			
6 (WS)	<0,0005	<0,0005	0,102	<0,0005	<0,0005		
7 (BK)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	
8 (KTRL)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005

p<0,0018 = signifikanter Wert

Computergestützte Farbbestimmung mit Vita Classic Farbskala

Tab. 14: Ergebnisse der computergestützten Farbbestimmung mit Vita Classic- Farbskala (VC) zu den Messzeitpunkten m0 und m1

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW in CC-Rängen	SD in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der MW in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der SD in CC-Rängen	p-Wert der Differenz
1 (VSPO1)	m0	36	15,9	0,5	6,6	4,1	<0,0005
	m1	36	9,3	4,2			
2 (VSPO2)	m0	36	15,3	2,1	6,1	3,9	<0,0005
	m1	36	9,2	4,2			
3 (SW)	m0	36	15,3	2,0	9,8	3,4	<0,0005
	m1	36	5,4	3,0			
4 (VSPO3)	m0	36	15,9	0,5	5,8	3,6	<0,0005
	m1	36	10,1	3,8			
5 (VS)	m0	36	15,6	1,2	7,3	4,0	<0,0005
	m1	36	8,3	4,3			
6 (WS)	m0	36	15,5	1,3	11,3	2,2	<0,0005
	m1	36	4,2	2,2			
7 (BK)	m0	36	16,0	0	4,4	4,3	<0,0005
	m1	36	11,6	4,3			
8 (KTRL)	m0	36	15,9	0,3	0,03	0,2	0,324
	m1	36	15,9	0,4			

Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) (angegeben in Farbrängen auf der CC-Farbskala) sowie deren Differenzen (in Farbabstufungen auf der CC-Farbskala) mit p-Wert (**p<0,05**: signifikanter Wert, t-Test), n = Anzahl der Proben

Tab. 15: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen m0-m1 zwischen den acht Gruppen (Mann-Whitney-U-Test, Bonferroni) bei computergestützter Farbbestimmung mit Vita Classic-Farbskala

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,793						
3 (SW)	<0,0005	<0,0005					
4 (VSPO3)	0,359	0,585	<0,0005				
5 (VS)	0,465	0,217	0,005	0,091			
6 (WS)	<0,0005	<0,0005	0,101	<0,0005	<0,0005		
7 (BK)	0,013	0,031	<0,0005	0,088	0,004	<0,0005	
8 (KTRL)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005

p<0,0018 = signifikanter Wert

Visuelle Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala (Tabellen 15 & 16)

Tab. 16: Ergebnisse der visuellen Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala (CC) zu den Messzeitpunkten m0 und m1

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW in CC-Rängen	SD in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der MW in CC-Rängen	Differenz (m0-m1) der SD in CC-Rängen	p-Wert der Differenz
1 (VSPO1)	m0	36	22,1	1,4	10,8	3,0	<0,0005
	m1	36	11,3	2,6			
2 (VSPO2)	m0	36	22,2	2,8	10,4	4,5	<0,0005
	m1	36	11,8	4,2			
3 (SW)	m0	36	21,7	2,8	13,8	3,3	<0,0005
	m1	36	7,9	2,1			
4 (VSPO3)	m0	36	23,0	0,9	10,8	2,6	<0,0005
	m1	36	12,2	2,6			
5 (VS)	m0	36	23,0	0,9	12,9	3,3	<0,0005
	m1	36	10,1	3,2			
6 (WS)	m0	36	21,7	2,9	14,1	3,7	<0,0005
	m1	36	7,6	2,8			
7 (BK)	m0	36	21,7	2,9	8,9	3,8	<0,0005
	m1	36	12,8	3,6			
8 (KTRL)	m0	36	22,8	1,8	1,5	1,9	<0,0005
	m1	36	21,3	2,4			

Mittelwerte (MW) und Standardabweichungen (SD) (angegeben in Farbrängen auf der CC-Farbskala) sowie deren Differenzen (in Farbabstufungen auf der CC-Farbskala) mit p-Wert ($p \leq 0,05$: signifikanter Wert, t-Test), n = Anzahl der Proben

Tab. 17: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen m0-m1 zwischen den acht Gruppen (Mann-Whitney-U-Test, Bonferroni) bei visueller Farbbestimmung mit Chromascop Complete-Farbskala

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,794						
3 (SW)	<0,0005	0,003					
4 (VSPO3)	0,902	0,581	<0,0005				
5 (VS)	0,001	0,012	0,347	<0,0005			
6 (WS)	<0,0005	0,001	0,747	<0,0005	0,217		
7 (BK)	0,034	0,063	<0,0005	0,035	<0,0005	<0,0005	
8 (KTRL)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005

$p \leq 0,0018$ = signifikanter Wert

Knoop-Mikrohärte

Tab. 18a: Mittelwerte und Standardabweichungen der Knoop-Mikrohärte zu den Zeitpunkten m0, m1, m2 sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen m0-m1, m1-m2 und m0-m2 mit p-Werten für die Gruppen 1 bis 4

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW (KHN)	SW (KHN)	p-Wert der Differenz
1 (VSP01)	Messzeitpunkt				
	m0	24	256,7	83,6	
	m1	24	259,0	88,7	
	m2	24	265,6	86,0	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	-2,3	20,3	0,57
	m1-m2	24	-6,6	17,1	0,03
2 (VSP02)	Messzeitpunkt				
	m0	24	278,9	75,2	
	m1	24	287,8	70,2	
	m2	24	295,7	75,1	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	-8,9	27,2	0,49
	m1-m2	24	-7,9	20,7	0,10
3 (SW)	Messzeitpunkt				
	m0	24	254,3	59,7	
	m1	24	190,9	67,5	
	m2	24	267,6	59,4	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	63,4	56,3	<0,0005**
	m1-m2	24	-76,7	47,7	<0,0005**
4 (VSP03)	Messzeitpunkt				
	m0	24	273,0	78,5	
	m1	24	263,4	74,6	
	m2	24	274,8	73,3	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	9,6	30,1	0,10
	m1-m2	24	-11,5	18,5	0,005*
	m0-m2	24	-1,8	26,9	0,44

MW=Mittelwert, SW= Standardabweichung, n=Anzahl der Proben, signifikante Unterschiede sind hervorgehoben ($p > 0,006$ n.s., $p \leq 0,006$ *, $p \leq 0,001$ **, Wilcoxon-Test, Bonferroni), m0=Mikrohärtemessung vor dem Bleichen, m1= Mikrohärtemessung unmittelbar nach dem Bleichen, m2= Mikrohärtemessung nach 6 Wochen Lagerung in Remineralisationslösung

Tab. 18b: Mittelwerte und Standardabweichungen der Knoop-Mikrohärte zu den Zeitpunkten m0, m1, m2 sowie Mittelwerte und Standardabweichungen der Differenzen m0-m1, m1-m2 und m0-m2 mit p-Werten für die Gruppen 5 bis 8

Gruppe (Abkürzung)	Messung	n	MW (KHN)	SW (KHN)	p-Wert der Differenz
5 (VS)	Messzeitpunkt				
	m0	24	305,1	87,8	
	m1	24	292,2	80,2	
	m2	24	314,4	81,5	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	12,8	62,6	0,36
	m1-m2	24	-22,1	38,5	0,002*
m0-m2	24	-9,3	36,4	0,17	
6 (WS)	Messzeitpunkt				
	m0	24	282,8	81,6	
	m1	24	190,6	67,0	
	m2	24	278,3	79,6	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	92,2	50,2	<0,0005**
	m1-m2	24	-87,7	51,7	<0,0005**
m0-m2	24	4,5	44,6	0,93	
7 (BK)	Messzeitpunkt				
	m0	24	271,9	51,8	
	m1	24	113,5	20,3	
	m2	24	177,2	34,8	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	158,4	59,7	<0,0005**
	m1-m2	24	-64,1	25,4	<0,0005**
m0-m2	24	97,0	63	<0,0005**	
8 (KTRL)	Messzeitpunkt				
	m0	24	285,0	106,7	
	m1	24	274,4	94,8	
	m2	24	285,0	96,9	
	Differenz der Messwerte				
	m0-m1	24	10,7	38,5	0,15
	m1-m2	24	-10,6	33,4	0,08
m0-m2	24	0,1	22,2	0,89	

MW=Mittelwert, SW= Standardabweichung, n=Anzahl der Proben, signifikante Unterschiede sind hervorgehoben ($p > 0,006$ n.s., $p \leq 0,006$ *, $p \leq 0,001$ **, Wilcoxon-Test, Bonferroni), m0=Mikrohärtemessung vor dem Bleichen, m1= Mikrohärtemessung unmittelbar nach dem Bleichen, m2= Mikrohärtemessung nach 6 Wochen Lagerung in Remineralisationslösung

Tab. 19: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen der Knoop-Mikrohärte zwischen den acht Gruppen im Zeitintervall m0-m1

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	1						
3 (SW)	<0,0005	<0,0005					
4 (VSPO3)	0,103	0,070	0,001				
5 (VS)	0,167	0,095	0,002	0,726			
6 (WS)	<0,0005	<0,0005	0,073	<0,0005	<0,0005		
7 (BK)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	
8 (KTRL)	0,122	0,097	0,002	0,918	0,902	<0,0005	<0,0005

Signifikante Werte ($p \leq 0,0018$, Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni-Korrektur) sind grau unterlegt.

Tab. 20: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen der Knoop-Mikrohärtewerte zwischen den acht Gruppen im Zeitintervall m1-m2

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,869						
3 (SW)	<0,0005	<0,0005					
4 (VSPO3)	0,317	0,458	<0,0005				
5 (VS)	0,076	0,224	<0,0005	0,477			
6 (WS)	<0,0005	<0,0005	0,578	<0,0005	<0,0005		
7 (BK)	<0,0005	<0,0005	0,371	<0,0005	<0,0005	0,097	
8 (KTRL)	0,805	0,984	<0,0005	0,711	0,240	<0,0005	<0,0005

Signifikante Werte ($p \leq 0,0018$, Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni-Korrektur) sind grau unterlegt.

Tab. 21: p-Werte der Einzelvergleiche der Differenzen der Knoop-Mikrohärtewerte zwischen den acht Gruppen im Zeitintervall m0-m2

Gruppe	1 (VSPO1)	2 (VSPO2)	3 (SW)	4 (VSPO3)	5 (VS)	6 (WS)	7 (BK)
2 (VSPO2)	0,030						
3 (SW)	0,496	0,853					
4 (VSPO3)	0,550	0,089	0,232				
5 (VS)	0,861	0,439	0,695	0,386			
6 (WS)	0,224	0,073	0,143	0,578	0,332		
7 (BK)	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	<0,0005	
8 (KTRL)	0,240	0,037	0,122	0,726	0,244	0,853	<0,0005

Signifikante Werte ($p \leq 0,0018$, Mann-Whitney-U-Test mit Bonferroni-Korrektur) sind grau unterlegt.

pH-Werte der verwendeten Bleichmaterialien

Tab. 11: pH-Werte der verwendeten Bleichmaterialien (Mittelwerte)

Gruppe	Produkt	Abkürzung	pH-Wert
1	VivaStyle Paint On	VSPO1	7,05
2	VivaStyle Paint On	VSPO2	7,05
3	Colgate Simply White	SW	4,7
4	VivaStyle Paint On	VSPO3	7,05
5	VivaStyle	VS	6,0
6	Blend-a-med Whitestrips	WS	5,2
7	Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur: -accelerator gel	BK	7,3
7	Odol-med3 Samtweiss Beauty-Kur: -whitening gel	BK	3,7
8	Kontrollgruppe (H ₂ O)	KTRL	7,26

11.2 Materialliste

Getestete Bleichpräparate

- VivaStyle Paint On, Ivoclar Vivadent, Liechtenstein
- Colgate Simply White, Colgate-Palmolive GmbH, Hamburg, D
- VivaStyle, Ivoclar Vivadent, Liechtenstein
- Blend-a-med Whitestrips, Wick Pharma/ Procter&Gamble, Schwalbach, D
- Odol-med 3 Santweiss Beauty-Kur, GlaxoSmithKline Consumer Products, Brühl, D

Materialien

- Anleitung & Regeln für das Arbeiten mit dem Klein-Härteprüfer Durimed, E.Leitz GmbH, Wetzlar (E.L.W.), D
- Coca-Cola, Coca-Cola Deutschland Verkauf GmbH & Co. KG, Berlin, D
- Chromascop Complete-Farbskala, Ivoclar Vivadent, Liechtenstein
- Durufolen-W [0,8 mm], Dreve- Dentamid GmbH, Unna, D
- ErkoFlex [1,5 mm], Erkodent® Erich Kopp GmbH, Pfalzgrafenweiler, D
- Erkopress ES 2002, Erkodent® Erich Kopp GmbH, Pfalzgrafenweiler, D
- Hawe Cleanic® Prophylaxepaste, Art. No. 3130, Hawe-Neos Dental, CH
- Hawe Pro-Cup®, Art. No.990/120, Hawe-Neos Dental, CH
- J.T. Baker buffered solution (pH 4/ pH7), Mallinckrodt Baker, Phillipsburg, USA
- Kimwipes EX-L®, Kimberly-Clark, Roswell, USA
- Klein-Härteprüfer Durimed der Firma LEITZ E. Leitz, Wetzlar, D
- Kochsalz Spüllösung 0,9 %, Delta Select, Pfullingen, D
- Paladur® (Monomer & Polymer), Heraeus Kulzer GmbH, 63450 Hanau, D
- Palgat Plus™, 3M ESPE AG, Seefeld, D
- pH-/Redox-/Temperatur-Messgerät GMH3510 V2.3, Fa.Greisinger Regenstauf, D
- Schleifmaschine Typ: Phoenix Alpha, Buehler, Düsseldorf, D
- Semi-micro pH electrode, Orion Research, Boston, USA
- Silicon Carbide Grinding Paper (wet) P1200P&4000, Buehler, Düsseldorf, D
- SpectroShade™, MHT™ Int., Niederhasli, CH
- SpectroShade™-software for tooth colour evaluation release 2.20, MHT™ Int., Niederhasli, CH
- SPSSWIN, release 12.0; SPSS, Chicago, IL, USA
- Tabellen zur Bestimmung der Knoophärte mit dem Klein-Härteprüfer Durimed, E. Leitz GmbH, Wetzlar (E.L.W.), D
- Technovit4071®, Heaeus Kulzer, Wehrheim, D
- Tewelrock®, Kettenbach GmbH & Co. KG, 35713 Eschenburg, D
- Vita Classic-Farbskala, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, D
- Vendémiaire, Pinot-Noir,R Gillard SA Sion, FR
- Wärmeschrank BR 6000, Heraeus Kulzer, Wehrheim, D
- Westminster Schwarzer Tee, Ceylon Assam Mischung, Markus Kaffee GmbH & Co. KG, D
- Meridol® Zahnbürste (mikrofein), GABA, Münchenstein, CH

11.3 Danksagung

Meinem Doktorvater Herrn Professor Dr. A. M. Kielbassa (Abteilung für Zahnerhaltung und Parodontologie, CBF) danke ich sehr herzlich für die Überlassung des interessanten Themas und die freundliche und ausdauernde Unterstützung bei allen anstehenden Problemen.

Frau Dr. C. Zantner möchte ich für die Beratung bezüglich des Studienaufbaus und der Versuchsdurchführungen danken.

Herrn Professor Dr. R. J. Radlanski (Abteilung für Orale Strukturbiologie, CBF) und seinen Mitarbeitern danke ich für die Möglichkeit der Nutzung des Klein-Härteprüfers Durimed. Insbesondere gilt hier mein Dank Frau G. Bölling, die mich mit Rat und Tat unterstützte.

Bei Herrn Dr. K. Neumann (Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie, CCM) möchte ich mich für die Beratung bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse bedanken.

Herrn J. Golsch danke ich sehr für die orthografischen und grammatikalischen Korrekturvorschläge.

Bei Frau S. Stolz bedanke ich mich für die Korrekturvorschläge bezüglich der englischen Zusammenfassung dieser Arbeit.

Meinen Eltern Frau R. Beheim-Schwarzbach und Herrn H.-J. Beheim-Schwarzbach danke ich sehr für die immer währende Unterstützung im Laufe meines Studiums und dieser Promotion.

11.4 Curriculum vitae

Mein Lebenslauf wird aus Datenschutzgründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht mit veröffentlicht.

11.5 Erklärung über Selbstständigkeit

Erklärung

„Ich, Nils J. Beheim-Schwarzbach, erkläre, dass ich die vorgelegte Dissertationsschrift mit dem Thema: In-vitro-Untersuchung zum Vergleich der Aufhellungseffektivität unterschiedlicher Homebleaching-Materialien und –Methoden selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, ohne die unzulässige Hilfe Dritter verfasst und auch in Teilen keine Kopien anderer Arbeiten dargestellt habe.“

Berlin, 02.06.2008

Nils J. Beheim-Schwarzbach