Aufhellung von Zähnen unter Verwendung einer adjuvanten 445 nm Laserbestrahlung

Von der Medizinischen Fakultät
der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen
zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Zahnmedizin
genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Daniel Weltermann

aus Hamm

Berichter:	Univ.-Prof. Dr. med. dent. Andreas Braun
	Univ.-Prof. Dr. med. Leo Cornelius Bollheimer
Tag der mündlichen Prüfung:	28.09.2026

Diese Dissertation ist auf den Internetseiten der Universitätsbibliothek online verfügbar.

Meinen Eltern gewidmet

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis V
Tabellenverzeichnis VII
Abkürzungsverzeichnis IX
1 Einleitung 1
1.1 Aufbau Zahn 2
1.1.1 Makroskopischer Aufbau des Zahnes 2
1.1.2 Mikroskopischer Aufbau des Zahnes 2
1.2 Zahnverfärbung 4
1.2.1 extrinsiche Zahnverfärbung 5
1.2.2 intrinsische Zahnverfärbung 6
1.3 Bleaching 6
1.3.1 Externes Bleaching 7
1.4 Laser 9
1.4.1 Einteilung Laser 9
1.4.2 Laserarten 9
1.4.3 Aufbau eines Lasers 11
1.4.4 Funktionsprinzip des Lasers 11
1.4.5 Anwendung von Laser in der Zahnmedizin 13
2 Zielsetzung und Arbeitshypothesen 17
3 Material und Methode 18
3.1 Zahnmaterial 19
3.2 Bleaching-Gele 20
3.2.1 WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel grün 32 % 20
3.2.2 WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel rot 32 % 20
3.2.3 JW Power Bleaching Next 21
3.3 Geräte 22
3.3.1 SiroLaser Blue mit Lichtleiter (Multi Tip) und Abstandshalter 22
3.3.2 Degudent Shadepilot + Box 25
3.4 Methode 28
3.4.1 Versuchsvorbereitung 28
3.4.2 Versuchsablauf 30
3.5 Statistik 33
3.5.1 Fallzahlplanung 33
3.5.2 Auswertung und Statistik 33
4 Ergebnisse 36
4.1 Deskriptive Statistik 36
4.2 Untersuchung auf Normalverteilung der Daten 38

4.3 Hauptanalyse 39
4.4 Sensitivitätsanalysen 39
5 Diskussion 45
5.1 Diskussion der Methode 45
5.2 Diskussion der Ergebnisse 49
5.3 Schlussfolgerung und klinischer Ausblick 53
6 Zusammenfassung 55
7 Literatur 56
8 Anhang 64
Danksagung 76
Erklärung § 5 Abs. 1 zur Datenaufbewahrung 77
Eidesstattliche Erklärung gemäß § 5 Abs. (1) und § 11 Abs. (3) 12. der Promotionsordnung 78

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Zahnes (Hellwig et al., 2018) .2
Abbildung 2: Zersetzung eines Peroxidgels in Wasser und freie Sauerstoffradikale (mit freundlicher Genehmigung der Firma Ultradent Products Inc.). 7
Abbildung 3: Bändermodell Diode des p-n Übergangs ohne Spannung (links) und Bändermodell bei angelegter Spannung (rechts) (Demtröder, 2000). 12
Abbildung 4: WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel grün 32% 20
Abbildung 5: WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel rot 32% 21
Abbildung 6: JW Power Bleaching Next 21
Abbildung 7: SIROLaser Blue mit Edelstahlhandstück 22
Abbildung 8: Laserschutzbrille 24
Abbildung 9: Lichtleiter einzeln (links) und Lichtleiter aufgesteckt in Handstück (rechts) 24
Abbildung 10: Abstandshalter von oben (links) und Abstandshalter in Kombination mit Handstück (rechts) 24
Abbildung 11: Abstandshalter von unten (links) und Abstandshalter mit Lineal mit einem Abstand von 1 cm (rechts) 24
Abbildung 12: Degudent Shadepilot (links) und Lade- bzw. Kalibrierschale (rechts) 27
Abbildung 13: Box (links) und Box mit Zahn gefasst in Gips (rechts) 27
Abbildung 14: Auswertung auf Display im Shadepilot vor bzw. nach Bleaching 28
Abbildung 15: Arbeitsschritte Fixierung Zahn 29
Abbildung 16: Vergrößerung Innenradius der Unterlegscheibe 29
Abbildung 17: Übersicht schematischer Ablauf 32
Abbildung 18: Testung der Normalverteilung der ΔE-Werte. Testung mittels Q-Q-Plots für die Daten der Gruppe mit Laserbehandlung (A) und ohne Laserbehandlung (B). 38
Abbildung 19: Ergebnisse der Varianzanalysen. Resultate der drei separat durchgeführten ANOVAs für die Hauptanalyse mit allen Zähnen in allen Gruppen und dem Zielparameter ΔE und den beiden Sensitivitätsanalysen I (mit dem gleichen Zielparameter aber

nur Zähnen, die durch die Behandlung heller geworden sind (ΔL > 0)) und II mit dem Zielparameter ΔL wiederum für alle Zähne. Die Höhe der Balken geben jeweils die Gruppenmittelwerte, die Antenne die 95%- Konfidenzintervalle (C.I.) an.....42

Abbildung 20: Darstellung der Ergebnisse als Boxplot. Resultate der (A) Hauptanalyse mit Zielparameter ΔE für alle n=15 Zähne in jeder der 6 Gruppen, (B) Sensitivitätsanalyse I mit dem gleichen Zielparameter ΔE, aber nur für die Zähne, die durch die Behandlung heller geworden sind (ΔL > 0) und (C) Sensitivitätsanalyse II mit Zielparameter ΔL wiederum mit allen Zähnen in jeder Gruppe. Die Kästchen der Boxplots zeigen wie üblich das 25%-Quantil (unterer Rand), den Median (schwarzer Strich innerhalb des Kästchens) und das 75%-Quantil (oberer Rand). Die Antennen nach unten und oben zeigen das Minimum und das Maximum an, jeweils ohne eventuell vorkommende Ausreißer, die als einzelne Ringe dargestellt sind. Unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede, gleiche Buchstaben das Fehlen statistisch signifikanter Unterschiede zwischen den Gruppen an. 43

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ätiologie der ex- und intrinsischen Verfärbungen (Hellwig et al., 2018; Manuel et al., 2010; Watts & Addy, 2001) 5
Tabelle 2: Auflistung der verwendetet Materialien und Hersteller 18
Tabelle 3: Auflistung der verwendeten Geräte und Hersteller 19
Tabelle 4: Der empfundene Unterschied von ΔE (Kraushaar, 2008)..... 26
Tabelle 5: Anwendungsweise des Lasers während des Versuchs 30
Tabelle 6: Deskriptive Statistik. Anzahlen, Mittelwerte und Standardabweichungen der ΔE-Werte in der Hauptanalyse und ΔE-Werte und ΔL-Werte in den Sensitivitätsanalysen. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, n = Anzahl. 37
Tabelle 7: Deskriptive Statistik mit nicht-parametrischen Maßen: Anzahl, Mediane und das 25% und 75%-Quantil (in Klammern dahinter) der ΔE-Werte in der Hauptanalyse und ΔE-Werte und ΔL-Werte in den Sensitivitätsanalysen. N = Anzahl, Med = Median, Q25 = 25%-Quantil, Q75 = 75%-Quantil. 37
Tabelle 8: Testung der Normalverteilungsannahme. Analyse der Untersuchungen auf Normalverteilung mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test und dem Shapiro-Wilk-Test für alle fünf Ausprägungen (2 Laserbehandlungen (ja/nein) + 3 Bleaching-Gele). Statistik = Teststatistik der beiden Tests, df = Freiheitsgrade, p = Wahrscheinlichkeit (Signifikanzwert). 38
Tabelle 9: Ergebnisse der Varianzanalysen. Resultate der drei separat durchgeführten ANOVAs für die Hauptanalyse mit allen Zähnen in allen Gruppen und dem Zielparameter ΔE und den beiden Sensitivitätsanalysen I (mit dem gleichen Zielparameter aber nur Zähnen, die durch die Behandlung heller geworden sind (ΔL > 0)) und II mit dem Zielparameter ΔL wiederum für alle Zähne. Die Ergebnisse sind angegeben für die beiden Faktoren Laserbehandlung und Bleaching-Gel sowie deren Interaktion. Die Zeilen darunter geben die Signifikanzwerte (p) für die drei post-hoc durchgeführten Paarvergleiche an (Scheffé-Test). df = Freiheitsgrade, F = Teststatistik der ANOVA, p = Signifikanzwert. 41

Tabelle 10: P-Wert Tabellen für die Hauptanalyse, Sensitivitätsanalyse I und Sensitivitätsanalyse II. Statistisch signifikante Unterschiede sind farblich hervorgehoben. Testung mittels paarweiser Mann-Whitney Test mit sequentieller Bonferroni-Korrektur. 44
Tabelle 11: Ergebnistabelle SLB mit WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel (rot) 64
Tabelle 12: Ergebnistabelle SLB mit WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel (grün) 66
Tabelle 13: Ergebnistabelle SLB mit JW Power Bleaching Next (rot).....68
Tabelle 14: Ergebnistabelle ohne Laserbehandlung mit WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel (rot).....70
Tabelle 15: Ergebnistabelle ohne Laserbehandlung mit WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel (grün).....72
Tabelle 16: Ergebnistabelle ohne Laserbehandlung mit JW Power Bleaching Next (rot).....74

Abkürzungsverzeichnis

%	Prozent
Abb.	Abbildung
aPDT	antimikrobielle photodynamische Therapie
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CEP	Kongenitale erythropoetische Porphyrie
$CH_6N_2O_3$	Carbamidperoxid
cm	Zentimeter
CO_2	Kohlenstoffdioxid
CW	continuous wave
df	Freiheitsgrad
d.h.	das heißt
dpi	dots per inch
Er,Cr:YSGG-Laser	Erbium,-Chromium:Yttrium-Scandium-Gallium-Granat-Laser
Er:Yag-Laser	Erbium-Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
et.al	Latein: und andere
EU	Europäische Union
Gew.-%	Gewichtsprozent
griech.	Griechisch
H_2O_2	Wasserstoffperoxid
Laser	Light Ampflication by Stimulated Emission of Radiation
M	Mittelwert
mm	Millimeter
N	Anzahl
N_2	Stickstoff
NaCl	Natriumchlorid
Nd:Yag-Laser	Neodym- Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
nm	Nanometer
OTC	over-the-counter
p	Wahrscheinlichkeit
PF	pulse mode
pH – Wert	Latein: potentia Hydrogenii
s.o.	siehe oben

SBS	Scherbindungsfestigkeit
SD	Standardabweichung
SRP	Scaling and root planning
Tab.	Tabelle
u.a.	unter anderem
vs	Latein: versus
W	Watt
z.B.	zum Beispiel
ΔE	Delta-E
µm	Mikrometer

1 Einleitung

Patienten zeigen in der heutigen Zeit zunehmende Ansprüche an ihre persönliche Zahnästhetik. Dazu zählen beispielsweise die Korrektur von Zahnfehlstellungen durch Kieferorthopädie, die Optimierung der Zahnform mittels Veneertechnik oder eine Veränderung der Zahnfarbe durch Zahnaufhellung. Die Nachfrage besteht nicht nur bei jugendlichen Patienten sowie Patienten mittleren Alters, sondern besteht auch zunehmend bei älteren Patienten, bei denen sich die Zahnfarbe stark verändert hat. Dabei kann die Grenze zwischen Ästhetik in funktioneller Form und auffällig zur Schau getragener Schönheit fließend sein. Es gilt, dabei die Balance zwischen Ästhetik und Kosmetik zu finden (Sader & Frankenberger, 2017). Ästhetik (griech. aisthētikḗ: „Lehre der Wahrnehmung“) wird definiert als die philosophische Disziplin über das Schöne und Kunst (Gerabek, 2005). Der Ästhetik gegenüber steht die Kosmetik (griech. kosmētikḗ: „Kunst des Schmückens“), die allgemein die Pflege und Verschönerung des Körpers beschreibt (Gerabek, 2005). In der Literatur gibt es verschiedene Merkmale, die zur Beschreibung der Ästhetik des Lächelns herangezogen werden. Die oberen mittleren Schneidezähne sind dabei das bekannteste Merkmal und von großer Bedeutung. Neben dem Vorhandensein einer Inzisalkantenasymmetrie von 1,0 mm zwischen den oberen Schneidekantenzähnen (Sobral et al., 2019) gilt ein heller Farbton als wesentlicher Faktor für Attraktivität (Dunn et al., 1996) ein dunkler Farbton wird als weniger attraktiv eingestuft. Mithilfe der Kosmetik kann durch Zahnaufhellung ein Makel der Ästhetik behoben werden. Ästhetische Gesichtspunkte erreichen einen immer höheren Stellenwert in der modernen Zahnmedizin, wodurch sich schon seit Jahren das Arbeitsfeld der Zahnaufhellung zu medizinischen oder ästhetischen Zwecken ergibt. Als Bleichmittel kommen im Wesentlichen Wasserstoffperoxide bzw. dessen Vorstufe Karbamidperoxid infrage. Diese Substanzen werden als Gel auf die Zahnhartsubstanz appliziert und erwirken, durch Oxidation von Pigmenten per chemisch freigesetzter Sauerstoffradikale, eine Zahnaufhellung.

1.1 Aufbau Zahn

1.1.1 Makroskopischer Aufbau des Zahnes

Makroskopisch wird der Zahn unterteilt in Krone (Corona dentis), Zahnhals (Cervic dentis) und Wurzel (Radix dentis) (Abb. 1). Der Zahn besteht aus den Hartgeweben Zahnbein (Dentin), Zement (Cementum) und der Hartsubstanz Zahnschmelz (Enamelum). Diese drei Hartsubstanzen umschließen das Pulpencavum. In diesem Weichgewebe befindet sich die Zahnpulpa (Pulpa dentis), welche aus Nerven und Blutgefäßen besteht (Hellwig et al., 2018).

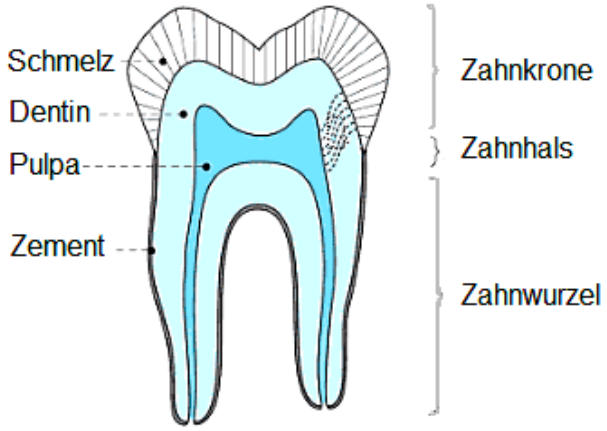


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Zahnes (Hellwig et al., 2018)

1.1.2 Mikroskopischer Aufbau des Zahnes

Nachfolgend soll auf den mikroskopischen Aufbau der Zahnhartsubstanzen Schmelz, Dentin, Zement sowie auf den Aufbau des Pulpengewebes eingegangen werden, da diese Bestandteile für den chemischen Prozess der Zahnaufhellung von besonderem Interesse sind.

Schmelz

Der Zahnschmelz ist mit einer Brinellhärte von 300-350 die härteste Substanz des menschlichen Körpers (Hellwig et al., 2018). Reifer Zahnschmelz ist je nach Region zwischen 1-2,3 mm dick und besteht größtenteils aus Hydroxylapatit Kristallen (95 %), Matrixproteinen (1%) und Wasser (4%). Hauptbauelement des Zahnschmelzes bilden die säulenartigen Schmelzprismen, die wellenartig durch die gesamte Schmelzschicht bis fast an die Schmelzoberfläche reichen. Dabei werden sie vom sogenannten interprismatischen Schmelz umgeben. Nur die

innerste und äußerste Schmelzschichten sind prismenfrei. Die Schmelzentstehung (Amelogenese) teilt sich dabei in zwei Phasen: 1.) Sekretionsphase (Produktion organischer Matrix und vorläufiger Mineralisation) und 2.) Reifungsphase (Beseitigung der Matrixproteine und vollständige Mineralisation). Bei einer genetischen fehlerhaften Schmelzbildung (Amelogenesis imperfecta) kommt es zur Entstehung von viel zu dünnen Schmelzschichten oder der Zahnschmelz fehlt sogar komplett (Lüllmann-Rauch, 2015).

Dentin

Reifes Dentin hat einen Mineralgehalt von 70% und ist ebenfalls vorwiegend aus Hydroxylapatit gebildet. Die organische Matrix macht 20% aus und besteht überwiegend aus Kollagen Typ I. Die Zellen des Dentins (Odontoblasten) liegen aneinander gereiht an der Pulpa-Dentin-Grenze und sind durch die sogenannten Gap junctions und Tight junctions mechanisch miteinander verbunden. Von jedem Zellkörper zieht ein Odontoblastenfortsatz (auch Tomes-Faser genannt) durch ein Dentinkanälchen zur Schmelz-Dentin-Grenze. Außerdem lassen sich unterschiedliche Dentintypen unterscheiden: Das Prädentin bildet eine nichtmineralisierte Zone direkt am Odontoblasten. Das Sekundärdentin ist der physiologische Anbau von Dentin an der Pulpahöhlenwand und den Wurzelkanälen. Tertiärdentin gilt als reaktiver Reparaturmechanismus infolge von chemischen, physikalischen oder mechanischen Reizen. Bezogen auf die Lokalisation erfolgt außerdem die Unterscheidung in Mandeldentin (an der Grenze zum Schmelz), zirkumpulpales Dentin, sowie inter- bzw. intratubuläres Dentin am Dentinkanälchen. Das sogenannte Interglobulardentin entsteht durch unvollständige Mineralisation und präsentiert sich durch stark hypomineralisierte Lücken (Lüllmann-Rauch, 2015).

Zement

Das Zement bedeckt das Wurzeldentin und nimmt dabei in seiner Schichtstärke von zervikal nach apikal zu (100-500 μm). Auch hier werden je nach Lokalisation und Zusammensetzungen unterschiedliche Zementtypen unterschieden: In das fibrilläre Zement sind die sogenannten Sharpey-Fasern eingebettet, die sich wiederum in das Desmodont fortsetzen und somit für die Aufhängung des Zahnes am Alveolarknochen mitverantwortlich sind. Das azellulär-fibrilläre Zement bildet

eine zellfreie Zone an der zervikalen Hälfte der Wurzel. Das zelluläre Zement liegt an der apikalen Wurzelhälfte und enthält die eingemauerten Zementozyten. Eine Sonderform nimmt das azellulär-afibrilläre Zement ein: Es kommt nur bei ca. 50% der bleibenden Zähne vor und liegt als sogenannte Zementzungen auf dem zervikalen Schmelz (Lüllmann-Rauch, 2015).

Pulpahöhle

Das Pulpengewebe besteht aus einer gallertigen, wasserreichen Grundsubstanz (mesenchymartig) und retikulären Fasern. In der Pulpenhöhle kommen neben den Odontoblasten auch Fibroblasten und Zellen der Abwehr vor. Zusätzlich wird die Pulpa mit Blut- und Lymphgefäßen durchzogen. Für die Weiterleitung von Schmerzreizen sind marklose, dünn myelinisierte Nervenfasern, der sogenannte Raschkow-Plexus, verantwortlich, dessen Axone in die Dentinkanälchen hineinziehen und dort dann frei enden (Lüllmann-Rauch, 2015).

1.2 Zahnverfärbung

Ätiologisch betrachtet existieren viele Möglichkeiten, die zu einer Zahnverfärbung führen. Damit betroffene Zähne korrekt behandelt werden, ist es wichtig, die Ursache durch zahnärztliche Anamnese und Befundung herauszufinden, um die passende Behandlung zu initiieren (Attin, 2009; Watts & Addy, 2001). Menschen haben von Natur aus einen unterschiedlichen Zahnfarbton, der hellere bzw. dunkler ausfallen kann (Attin, 2009). Verantwortlich für die polychrome Farbverteilung ist der Aufbau des Zahnes, welcher sich mit voranschreitendem Alter verändert. Durch Remineralisation nimmt die Mineraldichte in der äußeren Schmelzschicht zu, und durch Abrasion, Attrition sowie Erosion reduziert sich die Schmelzdicke (Gängler & Arnold, 2010), weswegen die Transparenz abnimmt und die Opazität zunimmt. Diese makroskopische Veränderung wird durch den Farbverlauf von weißgelb zu braun sichtbar (Schmidseder & Allen, 2009). Verantwortlich für Farbveränderungen sind verschiede äußere Einflüsse, die sich in extrinsische (externe) und intrinsische (interne) Zahnverfärbungen unterteilen (Attin, 2009; Hellwig et al., 2018) (Tab.1).

Tabelle 1: Ätiologie der ex- und intrinsischen Verfärbungen (Hellwig et al., 2018; Manuel et al., 2010; Watts & Addy, 2001)

<table>
<tr><th>Extrinsische Verfärbung</th><th colspan="2">Intrinsische Verfärbung</th></tr>
<tr><td></td><td>Präeruptive Ursachen</td><td>Posteruptive Ursachen</td></tr>
<tr><td>Nahrungsmittel (Beeren,Curry)</td><td>Stoffwechsel (Fluorose)</td><td>Intrapulpale Blutung</td></tr>
<tr><td>Genussmittel (Tabak, Rootwein)</td><td>Trauma (Unfallverletzung)</td><td>Pulpanekrose</td></tr>
<tr><td>Mundspüllösung (Chlorhexidin)</td><td>Medikamente (Tetracycline)</td><td>Wurzelresorption</td></tr>
<tr><td>farbstoffbildende Bakterien („black stain“)</td><td rowspan="5">Genetik:
Hyperbilirubinämie
Amelogenesis imperfecta
Dentinogenesis imperfecta
Kongenitale erythropoetische Porphyrie (CEP)</td><td>Interne Resorption</td></tr>
<tr><td></td><td>Gewebsrückstände der Pulpa nach endodontischer Behandlung</td></tr>
<tr><td></td><td>Endodontische Materialien</td></tr>
<tr><td></td><td>Füllungsmaterialien</td></tr>
<tr><td></td><td>Alterungsprozesse</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
</table>

1.2.1 extrinsische Zahnverfärbung

Die extrinsische Verfärbung entsteht posteruptiv und ist eine Auflagerungen von Farbmolekülen auf der Zahnoberfläche (Hellwig et al., 2018), die durch Anziehungskräfte wie Van-der-Waals-Kräfte, Wasserstoffbrücken oder elektrostatische Anziehung entstehen (Kielbassa & Wrbas, 2000). Chromogene (farbgebende) Substanzen sind in Nahrungs- und Genussmittel wie Kaffee, Tee, Rotwein, Beeren, Gewürze, Speisen (Curry), Tabak aber auch in Metalle und kationische Desinfektionsmittel (Chlorhexidin) vorzuweisen. Durch farbstoffbildende Bakterien entstehen dunkle Verfärbungen („black stain“), die hauptsächlich im Milchgebiss vorzufinden sind. Die extrinsische Verfärbung wird dabei durch Ablagerung auf der Zahnoberfläche oder innerhalb des Pellikels hervorgerufen (Hellwig et al., 2018). Diese Art von Zahnverfärbung kann im Rahmen einer professionellen Zahnreinigung beseitigt werden und sich nach Ursache und unzureichender Compliance neu bilden (Attin, 2009). Extrinsische Verfärbungen können über Defekte in der Zahnoberfläche (Schmelzrisse) in die Zahnhartsubstanz gelangen und führen zu einer intrinsischen Verfärbung, die sich nicht durch professionelle Zahnreinigung beheben lässt. Diese Verfärbung kann durch eine Bleichtherapie entfernt werden (Zantner & Kielbassa, 2004).

1.2.2 intrinsische Zahnverfärbung

Die intrinsische Verfärbung lässt sich in prä- und posteruptiv unterteilen und entsteht durch Einlagerung von Farbstoffen in die Zahnhartsubstanz. Mögliche Ursachen für Diskolorationen, welche vor der Odontogenese stattfinden, sind: Fluorose durch übermäßige Aufnahme von Fluorid, Zahntrauma, medikamentös bedingte Faktoren durch beispielsweise Tetracycline und genetische Faktoren wie z.B. Dentinogenesis imperfecta. Demgegenüber stehen Ursachen wie intrapulpale Blutung, Pulpanekrose, Wurzelresorption, interne Resorption, Gewebsrückstände der Pulpa nach endodontischer Behandlung, endodontische Materialien, Füllungsmaterialien und Alterungsprozesse, die verantwortlich für Verfärbungen nach der Odontogenese sind (Manuel et al., 2010; Watts & Addy, 2001). Therapiemöglichkeiten der prä- und posteruptiv verfärbten Zähnen müssen differenziert voneinander betrachtet werden. Posteruptiv bedingte Verfärbungen (z.B. Alterungsprozesse) können durch Vitalbleiche oder Non-Vitalbleiche (endodontisch verfärbte Zähne) behandelt werden (Gängler & Arnold, 2010). Eine Ausnahme besteht bei Diskoloration durch freie Metallionen aus Silberstifte und Amalgam. Hierbei beeinflusst eine Bleichtherapie nicht die Farbe des Zahnes (Glockner & Ebeleseder, 1993). Bei präeruptiven Verfärbungen mit allgemeinen Schmelzbildungsstörungen (Amelogenesis imperfecta) ist das Bleichen kontraindiziert, da der Schmelzmantel fehlt oder insuffizient ist. Aus diesem Grund wird bei präeruptiven Verfärbungen eine restaurative Versorgung empfohlen (Gängler & Arnold, 2010).

1.3 Bleaching

Im Allgemeinen wird beim Bleichen von Zähnen eine chemisch aktive Substanz genutzt, welche die Farbe von Farbpigmenten abschwächt oder verändert. Zur Aufhellung von verfärbten Zähnen wird dabei zwischen dem internen und externen Bleaching unterschieden. Bei dem internen Verfahren werden ausschließlich endodontisch behandelte avitale Zähne therapiert. Das externe Verfahren wird bei vitalen und verfärbten Zähnen angewandt. Beide Techniken könne auch miteinander kombiniert werden (Attin, 2009; Jacker-Guhr, 2015). Die meisten Bleichtechniken für vitale und avitale Zähne verwenden eine Form oder ein Derivat von Wasserstoffperoxid (H_2O_2) in abweichenden Konzentrationen und Anwendungstechniken (Dabanoglu et al., 2009). Wasserstoffperoxid kann direkt angewendet oder aus einer chemischen Reaktion aus Carbamidperoxid

($CH_6N_2O_3$) hergestellt werden. Peroxide diffundieren dabei in Zahnschmelz und Dentin (Abb 2). Die Chemikalie Wasserstoffperoxid ist eine farblose Flüssigkeit mit bitterem Geschmack und etwas viskoser als Wasser. Seine charakteristische Struktur besitzt ungepaarte Elektronen und wirkt deshalb als starkes Oxidationsmittel. Unter dem Einfluss der Umgebungsparametern wie Temperatur, pH-Wert und Lichteinwirkung zerfällt Wasserstoffperoxid in Radikale, Hydroxylionen und Perhydroxylionen (Rodríguez-Martínez et al., 2019). Die freiwerdenden Radikale können organische Chromogene und Metalloxide zu farblosen organischen Verbindungen umsetzten und bewirken dadurch eine Aufhellung des Zahnes (Epple et al., 2019).

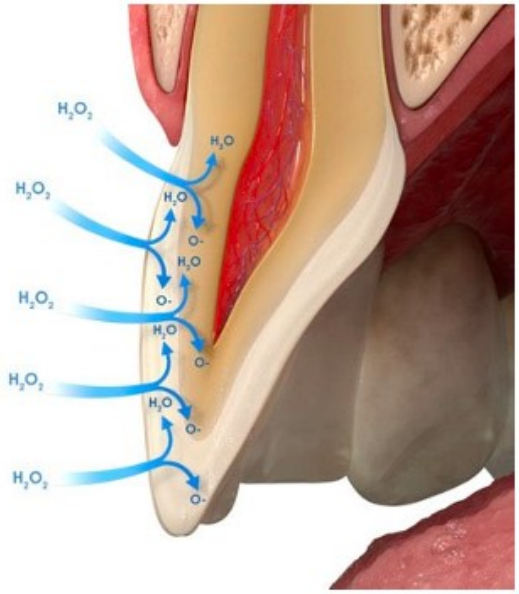


Abbildung 2: Zersetzung eines Peroxidgels in Wasser und freie Sauerstoffradikale (mit freundlicher Genehmigung der Firma Ultradent Products Inc.).

1.3.1 Externes Bleaching

Beim externen Bleaching vitaler Zähne wird Bleichmittel auf den vestibulären Schmelzbereich der Zahnkrone appliziert. Peroxide dringen dabei in Schmelz und geringfügig auch in das Dentin ein, wodurch Verfärbungen entfernt werden (Schmidseder & Allen, 2009). Es lassen sich dabei drei Methoden voneinander differenzieren. Zum einen die Methode, die vom Patienten zu Hause (Home-Bleaching) eingesetzt wird, die Methode die vom Zahnarzt in der Praxis (In - Office-Bleaching) angewendet wird (Attin, 2009) und das Beleichen mit rezeptfreien Bleichmitteln (Over-The-Counter - Bleaching) (Lima et al., 2012; Willershausen et al., 2009).

Home Bleaching

Bei dieser Methode handelt es sich um die sogenannte Schienenbleichung. Dabei werden laborgefertigte Tiefziehschienen individuell für den Pateinten angefertigt. In die Schiene wird ein 10 – 15 % Carbamidperoxid- Gel appliziert (Haywood, 1997). Nach einer Tragedauer von ca. zwei Stunden verliert das Bleichgel in der Schiene wesentlich an Wirksamkeit (Attin, 2009). Der Bleichvorgang kann bis zum gewünschten Ergebnis so häufig wiederholt werden wie nötig. Patienten sollten erstmalig eine Einweisung in Anwendung, Tragedauer, Reinigung etc. der Schiene und Bleichmittel erhalten und die Hinweise des Zahnarztes beachten. Im Vergleich zum Aufhellen in der Praxis wird das gewünschte Ergebnis hierbei allerdings nicht so schnell erreicht. Das finale Ergebnis ist meist gleich (Schmidseder & Allen, 2009). Ansonsten ist es eine do-it – yourself Methode, die zahnärztlich überwacht wird und auf die Compliance des Patienten angewiesen ist (Kihn, 2007).

In-Office-Bleaching

Im Vergleich zum Home-Bleaching findet die eigentliche Behandlung unter überwachten Bedingungen in der Praxis statt. Die Chair-side-Behandlung erfolgt mit einem bis zu 35%igen Wasserstoffperoxid-Präparat, welches 30 Minuten auf die Zähne aufgetragen wird und mehrmals- bis zum gewünschten Ergebnis- wiederholt werden kann. Aufgrund des relativ hohen Gehalts an H_2O_2 ist ein suffizienter Schutz der Gingiva durch beispielsweise einen flüssigen Kofferdam unabdingbar. Bei der Beurteilung des Erfolgs der Behandlung ist zu beachten, dass es zu einer zusätzlichen Aufhellung der Zähne durch Dehydration unter dem applizierten Gel und durch Separation durch Kofferdam kommt. Zusätzlich kann der Bleichvorgang im sogenannten thermokatalytischen Verfahren durch Wärme in Form von direkter Hitze, Licht oder Laser beschleunigt werden. Dabei wird bei Einstrahlung von Licht auf das Gel ein kleiner Teil des Lichts vom Gel absorbiert und in Wärme umgewandelt. Die Wärme kann zusätzlich durch speziell entwickelte Bleichgele mit Farbstoffzusatz erhöht werden wie beispielsweise beim orange-roten Farbstoff Karotin. Es kommt hierbei zu einer höheren Lichtabsorption durch blaues Licht. Licht im roten und Infrarot-Bereich wird von Bleichgelen mit bläulicher Farbe besser absorbiert. Es existieren verschiedene Lichtquellen für das photokatalytische Bleichen. Dazu zählen Plasma-, Halogenlampen und Laser. Laser verfügen über eine genau definierte

monochromatische Lichtwellenlänge. Plasma- und Halogenlampen dagegen emittieren Licht in einen weiten Spektralbereich vom ultraviolettem Licht über den gesamten Wellenlängenbereich bis in den Infrarotbereich (Attin, 2009).

“Over-the-counter”-Produkte (OTC)

Bei den „Over-the-counter“-Produkten handelt es sich um frei verkäufliche Bleaching-Produkte wie Gele, Spülungen, Zahnputzmittel oder Bleichstreifen, die in Apotheken, Drogerien ,Supermärkten oder über das Internet erhältlich sind (Lima et al., 2012). Durch die am 1. November 2012 in Kraft getretene EU Kosmetikrichtlinie 2011/84/EU kam es zu Veränderungen bei der Durchführung der Zahnaufhellung. Laut der Verordnung dürfen frei verkäufliche Zahnaufhellungsprodukte nur bis 0,1% H_2O_2 enthalten bzw. freisetzten. In der Vergangenheit wurden OTC-Produkte mit bis zu 6% H_2O_2 frei verkauft und sind durch die neue Richtlinie nicht mehr frei erhältlich (Polydorou, 2023), wodurch der Aufhellungseffekt im Vergleich zu einer Anwendung unter zahnärztlicher Überwachung geringer ausfällt (Lima et al., 2012).

1.4 Laser

LASER (**L**ight **A**mpflication by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) ist ein Kunstwort, welches aus dem Englischen übersetzt Lichtverstärkung durch induzierte Emission von Strahlung bedeutet.

1.4.1 Einteilung Laser

Die Einteilung der Laser bezieht sich auf die Art des Laserwerkstoffs. Dabei unterscheidet man zwischen chemischen Lasern, Farbstofflaser, Festkörperlaser, Glaslaser und Halbleiterlaser. In der Zahnmedizin werden hauptsächlich Gaslaser (CO_2- Laser, Argonlaser) und Festkörperlaser (Er:Yag-Laser, Er,Cr:YSGG-Laser, Nd:Yag-Laser, Diodenlaser) eingesetzt (Bach & Deppe, 2007).

1.4.2 Laserarten

Argonlaser

Der Argonlaser (blaues Licht 488 nm) besitzt kaum eine klinische Bedeutung. Er kann zur Härtung von Compositen eingesetzt werden (Bach & Deppe, 2007).

CO_2-Laser

Der CO_2- Laser ist ein Moleküllaser mit hoher Leistung und Wirkungsgrad mit einer Wellenlänge von 10600 nm. Das aktive Medium des Lasers ist ein Molekül, dass definierte Energiezustände in Form von Kernschwingungen und Rotation besitzt. Die Anregung der CO_2-Moleküle entsteht durch Zumischung von N_2 und Helium, wodurch eine Anhebung des Wirkungsgrades erzeugt wird. Eigenschaften wie Absorption im Wasser, gute Hämostase, geringe Eindringtiefe und geringe Erwärmung aber auch die Minimalinvasivität bezüglich Schnittbreite und Wundrandbeschaffenheit machen den Laser einsatzbereit für die zahnärztliche Tätigkeit (Bach & Deppe, 2007).

Er:Yag-Laser

Der Erbium-Yttriium-Aluminium-Granat-Laser besitzt einen optischen Kristall. Die Wellenlänge beträgt 2940 nm und eignet sich gut zur Zahnhartsubstanzbearbeitung und Konkremententfernung (Bach & Deppe, 2007).

Er,Cr:YSGG-Laser

Die Wellenlänge des Erbium,-Chromium:Yttrium-Scandium-Gallium-Granat-Laser beträgt 2780 nm. Zum Dotierungselement Erbium wird Chromium als zusätzliches Element verwendet, welches keinen Einfluss auf die abgegebene Wellenlänge hat aber für eine erhöhte Pumpeffizienz sorgt. Der Laser wird für Hart – und Weichgewebe verwendet (Bach & Deppe, 2007).

Nd:Yag-Laser

Der Nd:Yag-Laser verwendet das chemische Element Neodym, woraus sich die Wellenlänge von 1064 nm ergibt (Bach & Deppe, 2007). Das Laserlicht wird durch Wasser übertragen, durch Hämoglobin gut absorbiert und hat eine Affinität zu dunklen und pigmentierten Gewebe, weswegen die Streuung und Eindringtiefe vom Zielgewebe abhängig ist. Daraus ergibt sich außerdem eine gute Eindringtiefe in die Mukosa und eine gute Koagulation. Der Nd:YAG-Laser eignet sich nicht für die Zahnhartsubstanz (Mettraux, 2004).

Diodenlaser

Der Aufbau eines Diodenlasers ist kompakt, da dieser kein Kühlaggregat benötigt. Außerdem gibt es keinen Resonator im klassischen Sinn, da das Lasermedium aus einem Halbleiter besteht. Das Laserelement wird direkt mit elektrischen Strom angeregt, woraus ein hoher Wirkungsgrad resultiert (Kneubühl & Sigrist, 2005). Das Einsatzgebiet des in der vorliegenden Arbeit genutzten Diodenlasers der Firma Dentsply Sirona liegt bei den Wellenlängen von 445 nm und 970 nm. Weiterführendes im nächsten Abschnitt.

1.4.3 Aufbau eines Lasers

Ein Laser besteht grundlegend aus drei Bauteilen: Einem aktiven Medium, einem Resonator und einer Energiepumpe. In das aktive Medium wird durch die Energiepumpe selektiv Energie hineingepumpt. Es kann nach Art des Lasers (Gas- oder Festkörperlaser) ein Gasgemisch oder Kristall sein. Der Resonator besteht aus hochreflektierenden Spiegeln und speichert einen Teil dieser Energie in Form von elektromagnetischer Wellen. Die Energiepumpe beispielsweise eine Lichtquelle (Blitzlampe) erzeugt im Medium eine abweichende Besetzung eines oder mehrerer Energieniveaus (Demtröder, 2000).

1.4.4 Funktionsprinzip des Lasers

Das Grundlegende Funktionsprinzip eines Lasers beruht auf der stimulierenden Emission von Licht eines Systems, welches sich im angeregten Zustand befindet. Durch einen Pumpvorgang, welcher wie bereits oben beschrieben auf unterschiedlicher Weise (abhängig von der Art des Lasers) stattfinden kann, erfolgt eine Besetzungsinversion zweier unterschiedlicher Energieniveaus (Giesemann, 2003). Bei Halbleiterlaser beruht die Entstehung des Energieniveaus auf die Kombination einer Vielzahl von Atomorbitalen zu binden und antibindenden Molekülorbitalen. Die Energieübertragung findet nicht zwischen zwei definierten Energieniveaus statt, sondern zwischen zwei Zuständen, die eine Energieverteilung aufweisen (Giesemann, 2003; Kneubühl & Sigrist, 2005). Die Bandlücke zwischen dem mit Valenzelektronen besetzten Valenzband und dem Leistungsband (energetisch höher liegend) ist sehr schmal. Elektronen können dabei durch z.B. thermische Anregung in das oberste Band übergehen (Eichler & Eichler, 2015; Giesemann, 2003). Das oberste mit

Elektronen besetzte Niveau wird Fermi-Niveau genannt. Werden zwei p- und n-dotierte Halbleiter in engen Kontakt zueinander gebracht, kommt es zu einer Gleichgewichtseinstellung zwischen den ursprünglich unterschiedlichen Fermi-Niveaus (Giesemann, 2003). Die dabei entstandenen Elektronen aus dem Leitungsband des n-dotierten Bereichs diffundieren in den p-dotierten Bereich und Löcher aus dem Valenzband diffundieren in umgekehrter Richtung, wodurch ein Ladungsüberschuss entsteht und daraus resultierend ein Potentialgefälle, welches den Unterschied zwischen den Fermi-Niveaus kompensiert. Sobald an einer Laserdiode in Durchlassrichtung eine äußere Spannung angelegt wird (Abb. 3) , folgen die freien Ladungsträger der Potentialdifferenz und es entsteht eine Zone mit Besetzungsinversion durch Elektronen und Löcher (Giesemann, 2003; Kneubühl & Sigrist, 2005). Gewonnene Energie, welche durch Rekombination von freien Elektronen und Löcher entsteht, wird durch Licht wieder abgegeben. Damit die Diode als Laser betrieben werden kann, muss die Besetzung des Leitungsbandes größer als die des Valenzbandes sein (Eichler & Eichler, 2015; Giesemann, 2003).

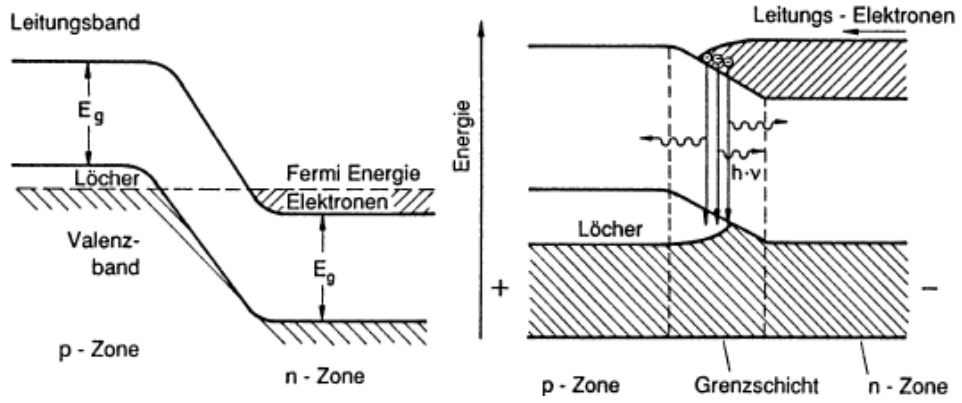


Abbildung 3: Bändermodell Diode des p-n Übergangs ohne Spannung (links) und Bändermodell bei angelegter Spannung (rechts) (Demtröder, 2000).

1.4.5 Anwendung von Laser in der Zahnmedizin

Zahnärztliche Chirurgie

In der zahnärztlichen Chirurgie findet der Laser Beachtung, da intraoperative Eingriffe atraumatisch, gewebsschonend und mit einem homogenen Abtrag von Gewebe durchgeführt werden können. Eine Naht ist häufig nicht erforderlich, da ein blutarmes Operationsgebiet durch Koagulation der Wunde vorliegt. Postoperativ zeichnet sich der Laser durch reduzierte Wundschmerzen, kaum auftretende Nachblutung sowie Schwellung und Narbenbildung aus (Gutknecht, 2015).

Zahnerhaltung

In der Zahnerhaltung findet der Laser als adjuvante Methoden in folgenden Gebieten seinen Einsatz:

Endodontie

Ein Misserfolg in der Endodontie ist auf unzureichendes eliminieren von Mikroorganismen zurückzuführen, weswegen diese effektiv durch eine endodontische Therapie abgetötet werden müssen. Es dominieren dabei anaerobe meist grammnegative Mikroorganismen, die in einer Keimzahl pro infizierten Wurzelkanal zwischen 10^2 und 10^7 vorliegen (Baumann & Arnold, 2008; Hülsmann, 2008; Sjögren et al., 1997). Zur mechanischen Aufbereitung infizierter Wurzelkanäle eignen sich bislang keine Lasersysteme. Es besteht allerdings die unterstützende Option, mithilfe eines Laser die Desinfektion des Endodonts zu ermöglichen (Anagnostaki et al., 2020; Asnaashari et al., 2022). Als adjuvante Maßnahme kann der Laser zur Erfolgssteigerung klassischer Desinfektionsmaßnahmen durch gewöhnliche Spüllösungen herangezogen werden. Hierbei ermöglichen photoakustische Effekte eine laserinduzierte Aktivierung der Spüllösung (Galler et al., 2019). Der Laser wird nicht nur zur Desinfektion herangezogen, sondern auch zur effektiven Entfernung von medikamentösen Einlagen, Wurzelfüllmaterialresten (Revision) und zur Entfernung des Smear layers (Jiang et al., 2016; Lloyd et al., 2014; Usta et al., 2024). Des Weiteren besteht die Möglichkeit endopathogene Bakterien durch die photochemische und direkte photothermische Desinfektion abzutöten (Plotino et al., 2019). Auch im Rahmen der Endodontie wird mittlerweile die Potobiomodulation eingesetzt (Rathod et al., 2022), die Schmerzen und

Entzündungen verringert und die Geweberegeneration bzw. Heilungsprozesse fördert und dabei auch auf die immunologische Aktivität abzielt (Hosseinpour et al., 2019).

Parodontologie

Pathologische Veränderungen in der Parodontologie sind auf Entzündungen, Taschenbildung und Knochenabbau, ausgelöst durch unterschiedliche pathogene Mikroorganismen, zurückzuführen. Das individuelle Erkrankungsrisiko hängt von der genetischen Veranlagung, zusätzlichen Risikofaktoren und allgemeinmedizinische Erkrankungen ab. Die konventionelle Therapiemaßnahme sieht die Reinigung der Taschen und Wurzeloberfläche mit Handinstrumenten oder Ultraschallsystemen vor. Dies geschieht vor allem durch mechanische Verfahren in Sinne eines „Scaling and root planing“ (SRP). Ziel der parodontalen antiinfektiösen Parodontitistherapie ist das Reduzieren oder Entfernen von entzündlichen Reizen auf die parodontalen Strukturen (Braun, 2010; Gutknecht, 2015). Als unterstützende Methode können antibiotisch wirkende Medikamente die systemische Parodontitistherapie unterstützen (Braun, 2010; Herrera et al., 2002, 2008; López et al., 2006). Hierbei ist auf die richtige Indikation, sowie Medikation bzw. Dosierung und Darreichungsform (systemisch/lokal) zu achten, da ansonsten Antibiotikaresistenzen (Eckert et al., 2012) vermehrt gefördert werden können. Als adjuvante Methode kann der Laser gerade auch wegen fehlender Nebenwirkungen und Resistenzbildungen in der Parodontologie durch einen Photosensibilisator im Rahmen einer antimikrobiellen photodynamischen Therapie (aPDT) (Konopka & Goslinski, 2007) verwendet werden, um parodontalpathogene Keime zu eliminieren (Moghtader, 2014). In Studien wurde beobachtet, dass bei der chronischen Parodontitis bessere Ergebnisse durch eine unterstützende aPDT erzielt wurde als durch alleinige konventionelle Therapie (Andersen et al., 2007; Braun et al., 2008). Die aPDT kann ergänzend sowohl in der Endodontie als auch in der Parodontologie als adjuvanter Therapieansatz, gerade im Bezug auf Vermeidung von Nebenwirkungen einer konventionellen systemischen Antibiotikatherapie, angesehen werden (Braun, 2010).

Grundsätzlich kann der Laser für chirurgische Prozesse, maschinelle Reinigung, Desinfektion sowie zur Photobiomodulation (Low & Mott, 2014) angewandt werden. Bei der Anwendung eines Lasers ist es wichtig, dass zwischen

Lasersystemen ihren unterschiedlichen Anwendungsgebieten, Zielen und Zwecken differenziert wird. Die Fachkenntnisse über Indikationsbereiche, Eigenschaften, Wellenlänge der verschiedenen Lasersysteme aber auch über die Limitation sind notwendig für eine erfolgreiche Anwendung (Böcher et al., 2019).

Kariesexkavation

Die Alternative zur konventionellen Kariesexkavation stellt der Er:YAG-Laser dar. Die Ergebnisse verschiedener Studien belegen, dass die Behandlung mit einem Laser im Vergleich zu rotierenden Instrumenten als angenehmer empfunden (Dommisch et al., 2008; Keller et al., 1998) und wenig bis keine Schmerzen wahrgenommen werden (Dommisch et al., 2008; Liu et al., 2006), weshalb diesbezüglich signifikant weniger Schmerzmittel zur Anwendung kommen kann (Keller et al., 1998). Eine zusätzliche Indikation stellt die Behandlung von Angstpatienten und Kinder dar. Angststimuli wie das Sehen von Schutzausrüstung (Mundschutz, Handschuhe, Lupenbrillle), das Hören des Geräuschs von einem Winkelstück und das Riechen oder Schmecken von Bonding bzw. Kunststoffe können Angst auslösen (Oosterink et al., 2008; Vanhee et al., 2020). Durch die Behandlung mit einem Er:YAG-Laser können Angststimuli wie beispielweise die Vibration, ausgelöst vom Winkelstück, reduziert werden (Belcheva & Shindova, 2014). Nachteilig ist zu erwähnen, dass bei einer Laserexkavation im Vergleich zur konventionellen Exkavation ein höherer Zeitaufwand eingeplant werden muss (Dommisch et al., 2008).

Schmelz- und Dentinkonditionierung

Erfolgsversprechend ist der Einsatz eines Lasers zur Konditionierung von Zahnschmelz wie beispielsweise bei einer Fissurenversiegelung. Ein zusätzliches Einsatzgebiet in Bezug auf die Konditionierung von sklerosiertem Dentin, in Kombination mit selbstätzenden Adhäsivsystemen, stellt der Er,Cr:YSGG-Laser dar. Durch Laserkonditionierung wird im Vergleich zu rotierenden Handinstrumenten eine höhere Haftungskraft erzeugt (Ramos et al., 2015).

Kariesdiagnostik

Klassische Hilfsmittel wie der zahnärztliche Spiegel, Sonde oder Lupenbrille reichen nicht immer aus, um kariöse Läsionen visuell eindeutig zu erkennen. Eine nicht invasive Methode kariöse Läsion zu erkennen ist das reine Fluoreszenzverfahren mit Diodenlaser, beispielsweise dem DIAGNOdent und DIAGNOpen (Fa. KaVo, Biberach) oder die intraoral Fluoreszenzkamera VistaCam iX (Fa. Dürr Dental, Bietigheim-Bissingen), mit einer ausstrahlenden Wellenlänge von 405 nm. Beim reinen Fluoreszenzverfahren arbeitet der Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 655 nm und regt kariöse Zahnhartsubstanz an ein Fluoreszenzlicht niedriger Wellenlänge abzugeben, welches durch bakterielle Stoffwechselprodukte ausgelöst wird. Das System des Diodenlasers erkennt die unterschiedlichen Wellenlängen und gibt eine Behandlungsbedürftigkeit an (Braun et al., 2000; Lussi et al., 2001).

Bleaching

Im ästhetischen Bereich der Zahnerhaltung finden Laser auch ihren Einsatz. Hierbei werden in der Regel Diodenlaser verwendet, um die Wirkung des Bleichgels (Powerbleaching) zu verstärken. Durch diese Methode werden bessere und schnellere Ergebnisse erzielt. Das Powerbleaching ist nicht nur durch Vorteile geprägt, sondern verzeichnet als Nachteil ein erhöhtes Risiko für Hypersensibilitäten im Vergleich zur nicht aktivierten Methode (He et al., 2012).

Kieferorthopädie

In der Kieferorthopädie wird in Studien die Scherbindungsfestigkeit (SBS) von Keramikbrackets nach Bestrahlung mit einem 445 - nm Diodenlaser untersucht. Durch die Bestrahlung werden die SBS – Werte erheblich reduziert, wodurch das Risiko von Bracketfrakturen und die Gesamtbehandlungszeit verringert werden (Stein et al., 2018). Bei der Bestrahlung von Metallbrackets kam es zu keiner signifikanten Reduzierung der SBS- Werte (Knaup et al., 2020).

2 Zielsetzung und Arbeitshypothesen

Nachdem bereits seit einiger Zeit Diodenlaser der Wellenlänge 970 nm in der Zahnmedizin als Adjuvans zur bisher vornehmlich chemomechanischen Keimreduktion bei Wurzelbehandlungen hinzugezogen werden konnten, gilt herauszufinden, ob auch Diodenlaser anderer Wellenlängen (445 nm) eine signifikante Wirkung auf die Katalyse von Bleichprozessen besitzen. Die Studie soll die Effizienz des laserkatalysierten Bleichens durch den 445-nm-Diodenlaser an drei unterschiedlichen Bleichprodukten untersuchen. Dabei soll nach einem angeglichenen Bleichverfahren jeweils die Differenz der Zahnaufhellung zwischen laserunterstütztem und klassischem Bleichen ohne Diodenlaser per spektrophotometrischer Farbmessung festgestellt werden. Daraus leiten sich folgende Arbeitshypothesen ab, welche mit Hilfe dieser Studie überprüft werden sollen:

1. Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 445 nm stellen eine signifikante Wirkung auf die Katalyse von Bleichprozessen auf klassische Bleichgele dar.
2. Bleichgele mit differenzierten Farbstoffzusätzen zeigen unterschiedlich starke Aufhellungswirkungen.
3. Das laserkatalysierte Bleichen mit einer Wellenlänge von 445 nm stellt eine sinnvolle Ergänzung zum klassischen Bleichen dar.

3 Material und Methode

Für die Durchführung der Studie wurde eine Vielzahl verschiedener Materialien und Geräte verwendet (Tab. 2, 3).

Tabelle 2: Auflistung der verwendetet Materialien und Hersteller

Materialien	**Hersteller**
Abstandshalter	Dentsply Sirona, Bensheim
Anmischbecher	Pluradent, Offenbach am Main
Bürstchen	Kerr, Bioggio (Schweiz)
Duct Tape	Tesa, Norderstedt
Filz	AH Hoffmann GmbH, Schwabach
Gipsspatel	Pluradent, Offenbach am Main
Handschuhe	Peppler GmbH, Gießen
HM-Fräser, fein	Hager & Meisinger GmbH, Neuss
HM-Fräser, grob	Hager & Meisinger GmbH, Neuss
HS Hartgips blau	Henry Schein, Melville (USA)
JW Power Bleaching Next	Heydent, Kaufering
Laserschutzbrille	uvex, Fürth
Lichtleiter	Dentsply Sirona, Bensheim
Natriumchlorid-Lösung	Merck Schuchardt oHG, Hohenbrunn
Minifix Messlehre	Dentsply Sirona, Bensheim
Mundschutz	Peppler GmbH, Gießen
Papierhandtücher (Kleenex)	Kimberly-Clark, Dellas (USA)
Periphery Wachs	ENTA, Bergen op Zoom, Niederlande
Scaler	Hu-Friedy, Tuttlingen
Trinkbecher	Euronda GmbH, Altenberge
Unterlegscheibe (M8 DIN 125)	toom Baumarkt GmbH, Köln
Wellpape	IPS Karton GmbH, Spremberg
Whitesmile LIGHT WHITENING AC-Gel grün 32%	Whitesmile GmbH, Birkenau
Whitesmile LIGHT WHITENING AC-Gel rot 32%	Whitesmile GmbH, Birkenau
Winkelstück grün	Kavo, Biberach an der Riß
Zircate Reinigunspaste	Dentsply Sirona, Bensheim

Tabelle 3: Auflistung der verwendeten Geräte und Hersteller

Geräte	Hersteller
K-Control TLC	Kavo, Biberach an der Riß
Shadepilot	DeguDent, Hanau
SiroLaser Blue	Dentsply Sirona, Bensheim
Waage	Rossmann GmbH, Burgwedel

3.1 Zahnmaterial

In der vorliegenden Studie wurden 90 nicht vorbehandelte, menschliche Ober- und Unterkiefer Frontzähne mit einer Wurzel verwendet. Die Extraktion erfolgte durch unterschiedliche Zahnärztinnen und Zahnärzte bei Patienten unterschiedlichen Alters und Geschlecht. Allen Patienten wurde mitgeteilt, dass ihre Zähne für Forschungszwecke weiterverwendet werden würden. Die Indikation zur Extraktion der Zähne hing nicht mit der Durchführung dieser Studie zusammen. Die extrahierten Zähne wurden maximal zwei Monate in einer 0,9 %igen Natriumchlorid-Lösung mit einem Zusatz von 0,001 Gew.-% Natrium-Azid (Merck-Schuchardt, Hohenbrunn) gekühlt gelagert. Die Studie wurden unter Beachtung gängiger Hygienemaßnahmen und unter Beachtung erklärter ethischer Prinzipien (niedergelegt in der World Medical Association Declaration of Helsinki, Version VI, 2002) durchgeführt.

3.2 Bleaching-Gele

Für die Studie wurden drei unterschiedliche Gele verwendet, die für den Versuch mit Laser als auch für den Vergleich ohne Laser zur Verfügung standen:

3.2.1 WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel grün 32 %

Das LIGHT WHITENING AC (Abb. 4) ist ein In-Office Bleaching-Gel mit einem Anteil von 32 % Wasserstoffperoxid und mit aktiven Chlorophyll. Es dient zur medizinischen lichtaktivierten Zahnaufhellung mittels LED-Lampe. Laut Hersteller kann das Gel zur Aufhellung eines oder mehrerer Zähne oder Teile eines Zahnes inklusive dem intrakoronalen Bleaching endodontisch behandelter devitaler Zähne verwendet werden.



Abbildung 4: WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel grün 32%

3.2.2 WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel rot 32 %

Die Anwendung, Indikation und Zusammensetzung des LIGHT WHITENING AC (Abb. 5) wurde bereits unter 3.3.1 beschrieben. Der Unterschied zum WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel grün besteht in der Färbung des Gels. Dabei wurde das 32 % Wasserstoffperoxid Gel rot eingefärbt.

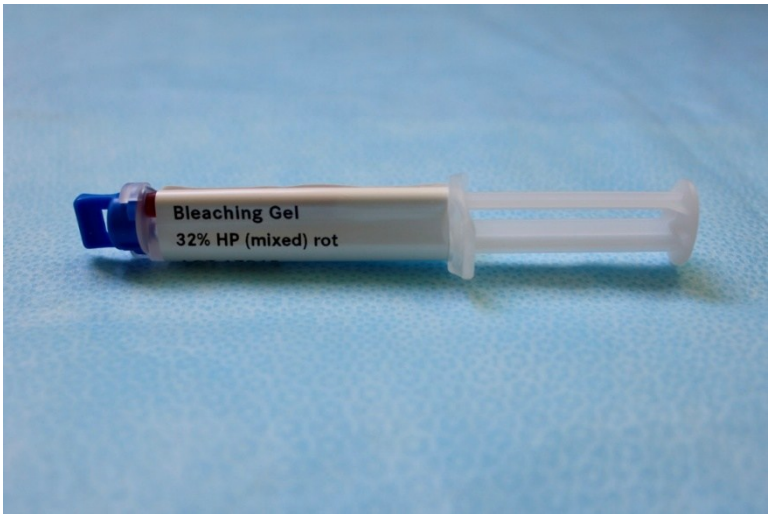


Abbildung 5: WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel rot 32%

3.2.3 JW Power Bleaching Next

Das JW Power Bleaching Next (Abb. 6) ist ebenfalls ein In-Office Bleaching-Gel. Die selbstanmischenden 4:1-Doppelspritzen enthalten Bleichgel und Aktivator. Der reine Aktivator (rote Komponente) ist ätzend. Der Gehalt an Wasserstoffperoxid im fertig angemischten Gel beträgt 35 %. Laut Hersteller kann das Gel ohne und mit einer Lichtquelle verwendet werden. Zur Verstärkung der Wirkung kann ein handelsübliches Plasma-Lichtquelle oder ein Diodenlaser verwendet werden.



Abbildung 6: JW Power Bleaching Next

3.3 Geräte

3.3.1 SiroLaser Blue mit Lichtleiter (Multi Tip) und Abstandshalter

Der SIROLaser Blue (Abb. 7) ist ein Halbleiter Dentallaser mit drei unterschiedlichen Dioden. Dadurch entstehen vielfältige Therapiemöglichkeiten und unterschiedlich einstellbare Wellenlängen von 445 nm- blaues Farbspektrum- über 660 nm- rotes Farbspektrum- bis 970 nm- infrarotes Farbspektrum. In dieser Dissertation wurde lediglich die kürzeste Wellenlänge (445 nm) verwendet. Durch die unterschiedlichen Wellenlängen entsteht ein großer Einsatz an Therapiemöglichkeiten, die durch einen Touchscreen eingestellt werden können. Der Laser ist durch seine kompakte Form direkt am Behandlungsstuhl einsetzbar und kann über ein Edelstahlhandstück mit integrierten Fingerschalter oder über ein Fußanlasser bedient werden.



Abbildung 7: SIROLaser Blue mit Edelstahlhandstück

Die Bedienung ist sowohl über interner Spannnungsversorgung als auch mit einem Netzteil möglich. Verschiedene Laserdioden im Gerät erzeugen Laserstrahlung, welche über Quartzfasern zum Handstück geführt werden. Die Einstellung zwischen zwei Betriebsarten ist möglich. Im „continuous wave“-Modus (CW) wird ein kontinuierlicher ununterbrochener Laserstrahl erzeugt, solange der Laser akitiviert ist. Im „pulse mode“ (PF) wird der Laserstrahl in regelmäßigen Abständen unterbrochen (Seifert, 2022). Bestimmt werden die Abstände anhand des Tastverhältnisses in %. Es handelt sich hierbei um einen Laser der Klasse vier. Die Strahlung des Lasers ist gefährlich für das Auge und die Haut. Ebenfalls diffus gestreute Strahlung wird als gefährlich eingestuft. Ausgehend von den erzeugten hohen Temperaturen eines Laserstrahls können Laserstrahlen auch Brände oder Explosionen verursachen. Zum Schutz müssen alle im Behandlungsraum anwesenden Personen eine für die Wellenlänge spezifische Schutzbrille (Abb. 8) tragen, welche nicht beschädigt sein darf. Während der gesamten Versuchsdurchführung wurde vor der Tür des Versuchsraums ein Warnschild und eine Warnlampe angebracht, das auf den Gebrauch eines Lasers hingewiesen hat. Für die Studie wurde ein Lichtleiter (Multi Tip) mit einem Durchmesser von 8 mm verwendet (Abb.9). Multi Tips sind sterilisierbar und haben ihre Verschleißgrenze nach 2000 Sterilisationszyklen bzw. nach zwei Jahren erreicht. In der Studie wurde ein neuer Lichtleiter verwendet, weswegen von keiner Verschlechterung der optischen Ausgangsleistung auszugehen ist. Multi Tips können nur mit dem SiroLaser Blue im Spektalbereich von 445 nm, 660 nm und 970 nm verwendet werden (pro Spektalbereich -10/+15 nm Toleranz). Außerdem wurde ein entwickelter Abstandshalter verwendet. Der Abstandshalter dient für einen standardisierten Abstand von 1 cm (Abb. 10, 11) zwischen einem mit Gel bestrichenen Zahn und dem Lichtleiter.



Abbildung 8: Laserschutzbrille

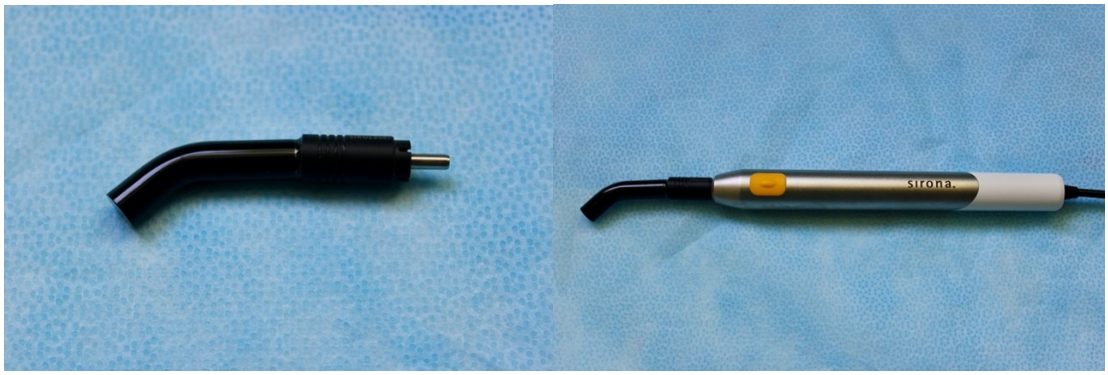


Abbildung 9: Lichtleiter einzeln (links) und Lichtleiter aufgesteckt in Handstück (rechts)

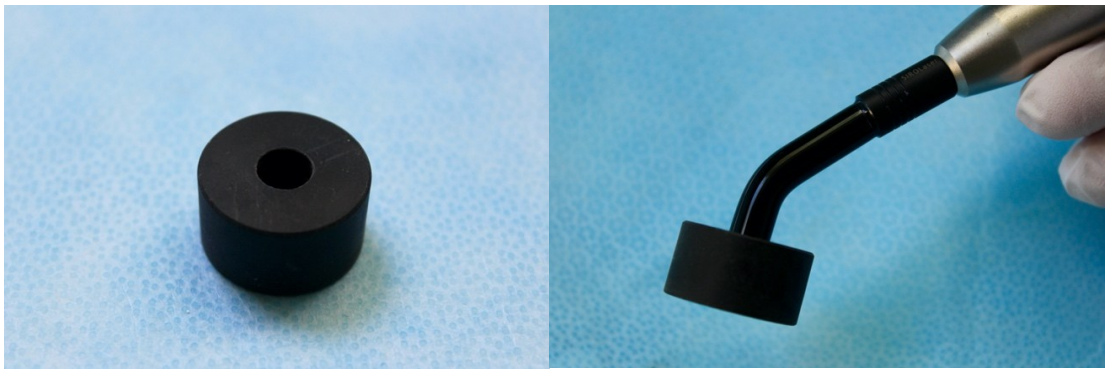


Abbildung 10: Abstandshalter von oben (links) und Abstandshalter in Kombination mit Handstück (rechts)

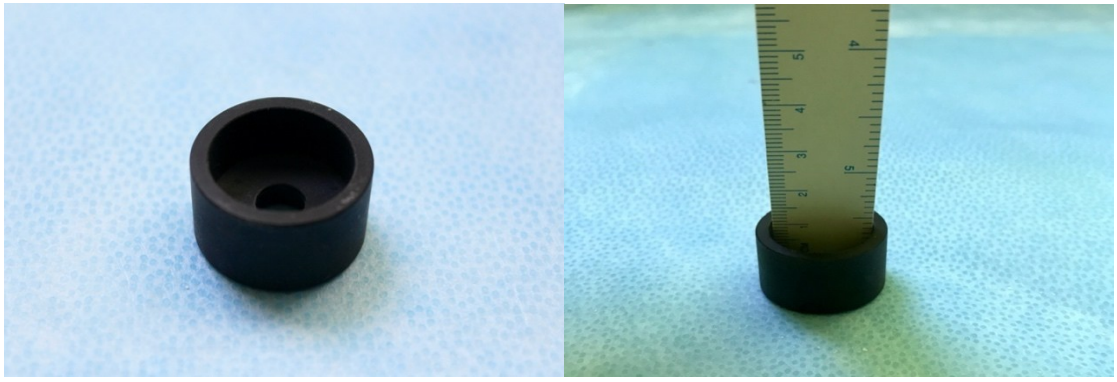


Abbildung 11: Abstandshalter von unten (links) und Abstandshalter mit Lineal mit einem Abstand von 1 cm (rechts)

3.3.2 Degudent Shadepilot + Box

Der Shadepilot (Abb. 12) ist ein Spektralphotometer zur spektralen Messung des Zahnes an 300.000 Messpunkten, dient zur digitalen Farbnahme der Zähne und erlangt durch Polarisation eine optische Glanzunterdrückung. Es handelt sich hierbei um ein Standgerät als mobile Einheit mit Akku und Lade-/ Kalibrierschale. Die Auflösung liegt bei 640 x 480 dpi. Analysiert und ausgewertet wird einzeln pro Zahn mit einer Tiefeninformation wie es das natürliche Auge sieht. Schneideanteile lassen sich differenzieren mit der Farbbestimmung und Angabe der Schneide und durch die Analyse der Transluzenz. Die Messung der Farbe erfolgt anhand des Wellenlängenspektrums des vom Objekt remittierten Lichts. Vom Licht wird der sichtbare Wellenlängenbereich, welcher von 400 bis 700 nm liegt, in definierte Wellenlängen aufgeteilt. Die daraus entstehenden diskretisierten spektralen Kurven dienen zur Definierung der Farbe (Pflüger, 2014). Bei der Auswertung werden folgende Farbspektren u.a Kiss, extreme, VITAPAN classical, VITA 3D-Master, und Chromascop angezeigt. Vor jeder Messung wurde das Gerät mit der Kalibrierschale (Abb. 12) kalibriert. Bei nicht erfolgreicher Kalibrierung ertönte ein Warnsignal, wodurch Fehlmessungen vermieden wurden. Bei der digitalen Farbnahme wird der Shadepilot oral auf den farblich zu bestimmenden Zahn gesetzt. Dabei sollte die Kappe des Shadepilots mit den Lippen des Patienten abschließen, wodurch kein zusätzliches sichtbares Licht die Ergebnisse der einzelnen Aufnahmen beeinflusst. Da es sich um eine in vitro Studie handelt, wurde eine Box (Abb. 13) aus Wellpappe, hergestellt. Zur Stabilisierung wurde die Pappe mit Duct Tape (Tesa, Norderstedt) verstärkt und mit Filz ausgekleidet und eine Öffnung für den Ansatz des Shadepilots ausgeschnitten. Die Öffnung der Box ist gerade so groß, dass der Ansatz des Shadepilots hindurchpasst, wodurch zusätzliches Licht abgeschirmt wird. Dadurch konnte ein Farbnahme erfolgen, die bei jeder Messung gleich war und durch kein zusätzliches Licht von außen beeinflusst wurde. Die Farbnahme erfolgte im Lab-System. Hierbei werden die Grundfarben, welche durch die farbmetrischen Koordinaten x, y, z repräsentiert werden, logarithmisch umgeformt in Helligkeit, Farbton und Sättigung. Abgebildet wird der Farbraum in eine dreidimensionale Kugel. Senkrecht bildet die L-Achse die Helligkeit, an deren Ende sich Schwarz und Weiß befindet, und waagerecht die a-Achse (Grün-Rotanteil) mit b-Achse (Blau- Gelbanteil). Innerhalb eines dreidimensionalen Koordinatensystem können alle Farben mit einer kartesischen Koordinate (L*a*b)

beschrieben werden (Pflüger, 2014). Im L*a*b - Farbraum beschreibt ΔE die Farbdifferenz zwischen zwei Farben. Die Berechnung erfolgt nach folgender Formel:

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

Innerhalb des L*a*b - Farbraums sind die Werte ΔL, Δa und Δb die Unterschiede zwischen dem Ist- und Sollwert. Ein Spektralphotometer misst den Farbabstand und bestimmt die Farborte eines Farbtons und berechnet daraus die Abweichung zum Sollwert. Der kleinste vom menschlichen Auge wahrgenommene Farbunterschied ist ein Farbabstand von ΔE 1. In der Tabelle 4 ist der empfundene Unterschied von ΔE laut Fogra Forschungsgesellschaft Druck e. V aufgeführt (Krausharr, 2008).

Tabelle 4: Der empfundene Unterschied von ΔE (Kraushaar, 2008)

ΔE	Bedeutung
0 – 1	normalerweise nicht sichtbar
1 – 2	sehr kleine Abweichung, nur von einem geschulten Auge erkennbar
2 – 3,5	mittlere Abweichung, auch von einem ungeschulten Auge erkennbar
3,5 – 5	deutliche Abweichung
über 5	starke Abweichung

In der Auswertung der Studie wurden zwei Bilder von Zähnen an gleicher Stelle miteinander verglichen (Abb. 14). Nach jeder Messung eines Zahnes wurden die Werte der zwei Bilder (L*a*b, Differenz und der ΔE Wert) tabellarisch festgehalten.



Abbildung 12: Degudent Shadepilot (links) und Lade- bzw. Kalibrierschale (rechts)

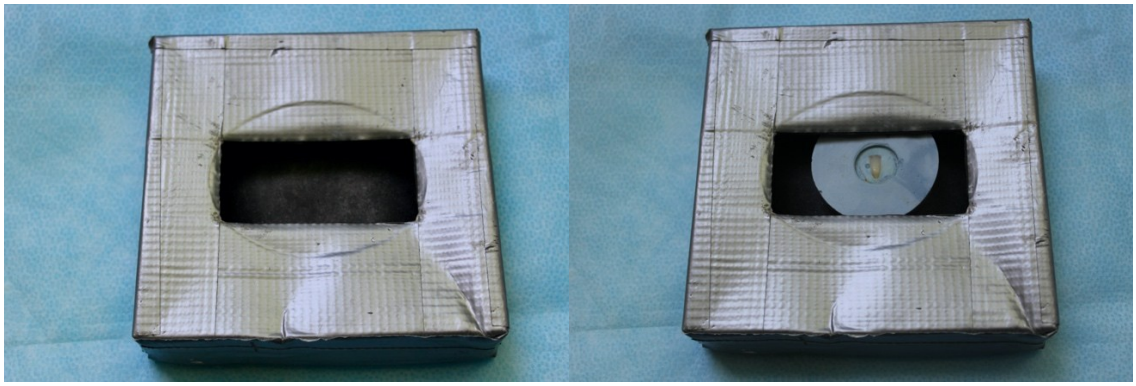


Abbildung 13: Box (links) und Box mit Zahn gefasst in Gips (rechts)

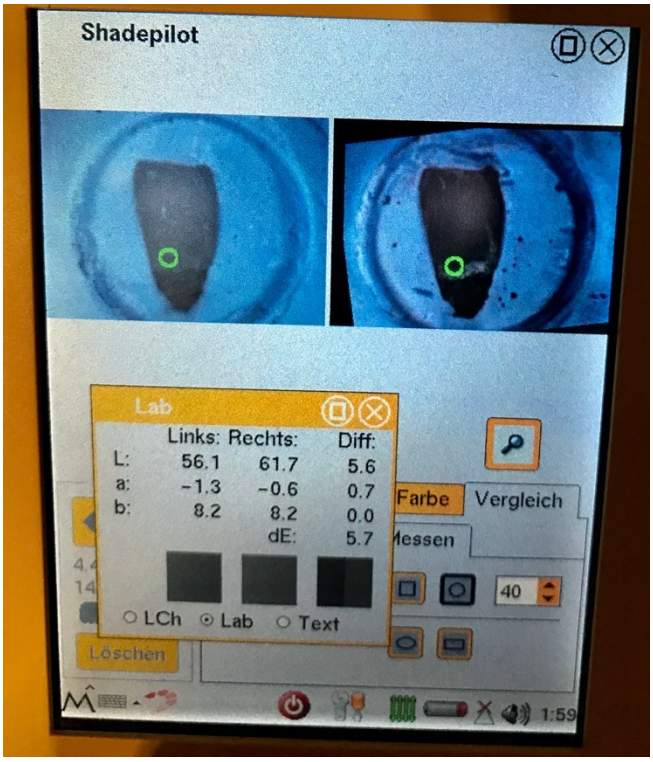


Abbildung 14: Auswertung auf Display im Shadepilot vor bzw. nach Bleaching

3.4 Methode

3.4.1 Versuchsvorbereitung

Die in der Studie verwendeten 90 nicht vorbehandelten, menschlichen Ober- und Unterkiefer Frontzähne wurden zur Desinfektion in einem Behältnis mit einer physiologischen Kochsalzlösung und einem Zusatz von 0,001 Gew.-% Natrium-Azid-Lösung (Merck, Schuchardt) gelagert. Nach dem Sammeln und einlegen der Zähne erfolgte das Reinigen mit Hilfe eines Scalers, grünen Winkelstücks, Zircate-Reinigungspaste und einem Bürstchen. Im Anschluss erfolgte das Fixieren der Zähne, um die Vestibulärfläche jeweils in einzelne Formen aus Hartgips darzustellen. Dabei wurden sämtliche Zähne einzeln in Trinkbechern mit Wachs fixiert (Abb. 15) und mit Hartgips, welcher nach Herstellerangaben mit einem Gipsspatel und Anrührbecher angemischt wurde, umfüllt. Die Vestibulärfläche war bei diesem Arbeitsschritt frei von Gips zu halten, da nach der Aushärtung des Gipses eine zweite Schicht Gips auf eine zuvor platzierte Unterlegscheibe gefüllt wurde, um eine standardisierte Schichtdicke der Gele von 1,6 mm zu erzielen (Abb. 15, 16).

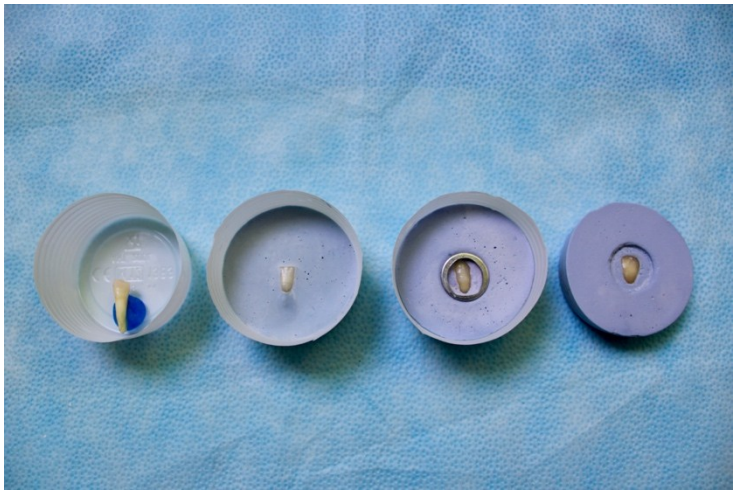


Abbildung 15: Arbeitsschritte Fixierung Zahn

Die Unterlegscheibe war herstellungsbedingt mit einem zu kleinen Innenradius versehen, weshalb dieser zuvor mit einer Fräse von 8,4 mm auf 12 mm vergrößert wurde (Abb. 16). Ziel des Arbeitsschrittes war ein Platzgewinn, da der vorgegebene Radius zu klein für die Vestibulärfläche der extrahierten Zähne war. Um einen Kontakt zwischen Vestibulärfläche und Zahn mit Gips zu vermeiden und um die Unterlegscheibe auf die richtige Position zu fixieren, wurde diese ebenfalls mit Wachs fixiert.



Abbildung 16: Vergrößerung Innenradius der Unterlegscheibe

Durch diese Arbeitsschritte entstanden in Gips gefasste Zähne, die genau 1,6 mm Platz zur Gipsoberkante hatten. Nach der Applikation des Gels wurde dies anschließend mit einer Messlehre bündig an der Gipskante abgezogen. Dadurch ist eine standardisierte Schichtdicke für die Applikation der Gele gewährleistet, wodurch jeder Zahn mit genau der selben Menge Gel behandelt wurde. Die in

Hartgips fixierten Zähne wurden bis zur Versuchsdurchführung in einem Behältnis mit angefeuchteten Tuch gekühlt gelagert.

3.4.2 Versuchsablauf

Die 90 nicht vorbehandelten menschlichen Ober- und Unterkiefer Frontzähne wurden nach der Versuchsvorbereitung randomisiert in sechs Grruppen (n=15) aufgeteilt.

Gruppe A: WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel grün 32%

Gruppe B: WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel rot 32%

Gruppe C: JW Power Bleaching Next – Gel rot 35%

Gruppe D: WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel grün 32%

Gruppe E: WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel rot 32%

Gruppe F: JW Power Bleaching Next – Gel rot 35%

Die Gele der Gruppe A, B und C wurden in folgender Anwendungsweise (Tab. 5) nach der Applikation durch den SIROLaser Blue – Diodenlaser katalysiert:

Tabelle 5: Anwendungsweise des Lasers während des Versuchs

Wellenlänge:	445 nm
Tastverhältnis:	cw (Dauerstrich Modus)
Leistung:	1,2 W
Lasereinwirkzeit:	4 Intervalle der Bestrahlung á 30 Sekunden mit jeweils 30 Sekunden Bestrahlungspause zwischen den Intervallen
Gesamteinwirkdauer des Gels:	30 Minuten

Die Gele der Gruppe D, E und F erfuhren nach der Applikation keine durch den Laser katalysierte Behandlung. Die Gesamteinwirkdauer der Gele lag ebenfalls bei 30 Minuten. In einem Versuchsdurchlauf wurden zwei Zähne mit einer standardisierten Schichtdicke von 1,6 mm mit einem der Gele bestrichen. Der erste bestrichene Zahn erfuhr eine unbestrahlte Einwirkdauer des Gels von 30 Minuten. Beim Zweiten bestrichenen Zahn wurde der SIROLASER Blue – Diodenlaser zur Katalyse hinzugezogen. Dieser Versuchsdurchlauf wurde für alle drei Gele an weiteren Zahnpaaren wiederholt.

Der erwirkte Bleicheffekt wurde durch eine spektrophotometrische Messung durch den ShadepilotTM festgestellt, indem eine Messung sowohl vor als auch nach dem Bleichen durchgeführt wurde. Damit die Messung so natürlich wie möglich gestaltet werden konnte, wurden die Zähne, für die Aufnahme, in einer selbstgebauten Box positioniert. Dadurch wurde gewährleistet, dass sämtliche Zähne die gleiche Belichtung erhielten und es zu keiner Über- bzw. Unterbelichtung durch UV-Licht kam. Der erreichte Aufhellungsgrad wurde durch die Differenz dieser Werte als ΔE ermittelt. Dazu wurden die photometrischen Werte vor und nach dem Bleichen synchronisiert und drei Werte inzisal, zentral und zervikal auf sämtliche Zähne abgelesen und tabellarisch festgehalten. Im Anschluss wurden die Bleicheffekte von laserkatalysiertem und nicht laserunterstütztem Bleichverfahren einander gegenübergestellt. In Abb. 17 findet sich der schematische Ablauf als Übersicht.

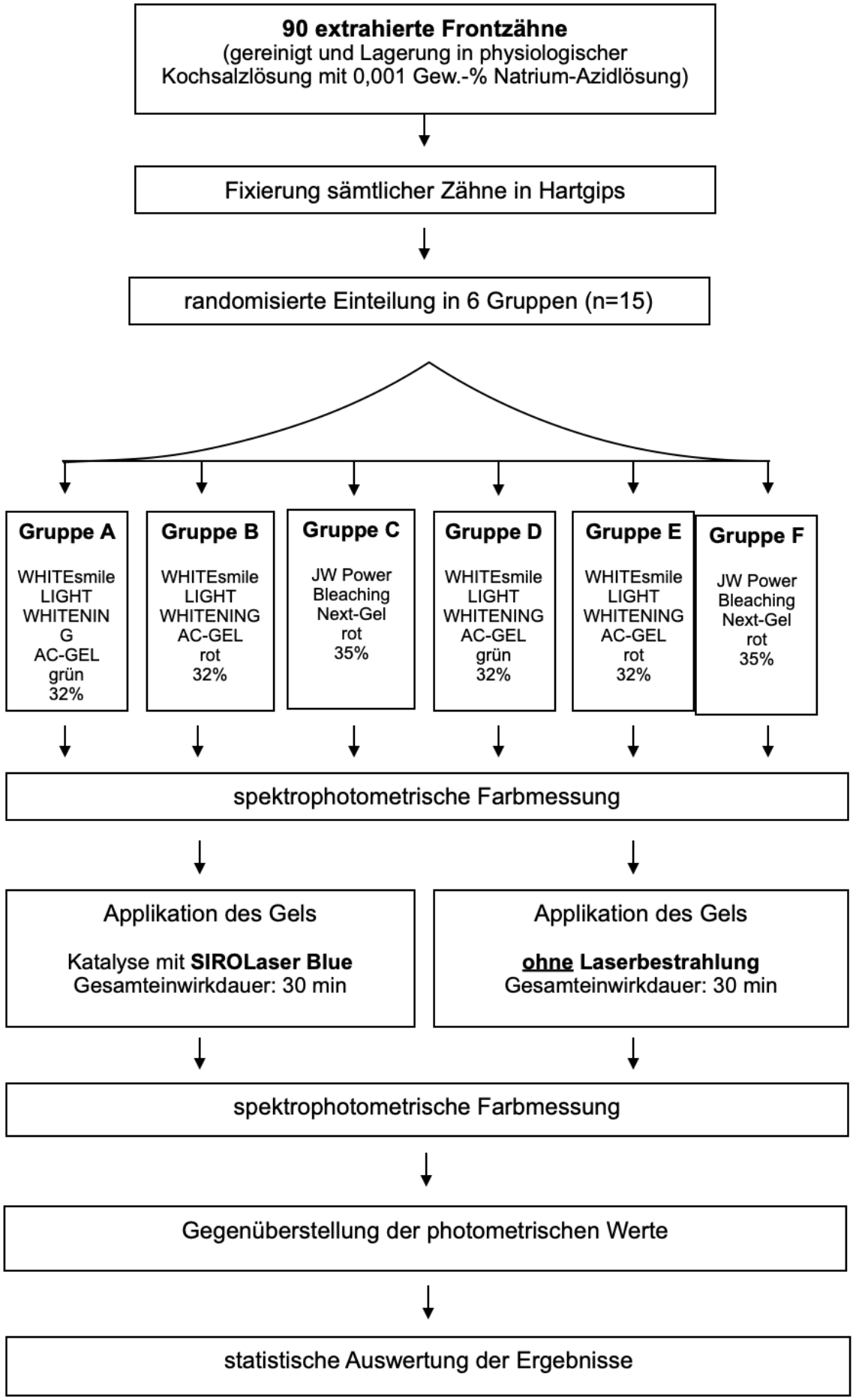


Abbildung 17: Übersicht schematischer Ablauf

3.5 Statistik

3.5.1 Fallzahlplanung

In dieser zweidimensionalen Studie mit zwei Ausprägungen im Faktor Laserbehandlung (ja / nein) und drei Ausprägungen im Faktor Bleaching-Gel (3 Gele) wurden pro Gruppe 15 Zähne an drei Stellen (Positionen) getestet. Für die Auswertung der Daten wurden aus den Rohdaten zunächst als vorher-nachher-Differenzen und daraus über die Positionen hinweg Mittelwerte berechnet, die dann per Varianzanalyse ausgewertet werden sollten. Die Anzahl von n = 15 Zähnen pro Gruppe ist hinreichend, um bei einem für die konfirmatorische Testung beider Hauptfaktoren (Laserbehandlung und Bleaching-Gel) und deren Interaktion korrigierten alpha* = 0.0167, einer Power von 80% (entsprechend einem beta = 0.20) und einer Auswertung mittels ANOVA für einen Endpunkt (ΔE) alle Effekte mit einer großen Effektstärke (entsprechend einem Cohens d ≥0.80, bzw. einem eta2 (η^2) > 0.14) signifikant darstellen zu können (G*Power, Version 3.1, (Cohen, 1988; Faul et al., 2007).

3.5.2 Auswertung und Statistik

In einem ersten Schritt wurden für jeden der drei Messpositionen (inzisal, zentral und zervikal) auf jedem Zahn aus den vor und nach der Behandlung mit Bleachings und Laserstrahlung gemessenen Helligkeitswerten (im L*a*b-Format) Differenzen (als ΔL, Δa und Δb) und daraus die Lichtenergiedifferenz ΔE (= $\sqrt{}$ (ΔL + Δa + Δb)) errechnet. Diese vier Differenzen (ΔL, Δa, Δb und ΔE) wurden in einem zweiten Schritt pro Zahn über alle drei Messstellen (inzisal, zentral und zervikal) hinweg gemittelt, um Messungenauigkeiten auszugleichen. Als Ergebnis lagen nach diesem Schritt für jede der sechs Kombinationen aus Laserbehandlung (ja / nein) und Bleaching-Gel (JW Power Bleaching Next (in den Ergebnisdarstellungen abgekürzt als “JW Power”), WHITEsmile LIGHT WHITENING AC (grün), abgekürzt als “WhiteSmile grün” und WHITEsmile LIGHT WHITENING AC (rot), abgekürzt als “WhiteSmile rot”) die gemittelten Differenzdaten für jeweils 15 Zähne vor. Dem ursprünglichen Auswertungsplan folgend, wurden für die eigentliche (konfirmatorische) Testung das ΔE aller 2 x 3 x 15 Zähne mittels zwei-dimensionaler Varianzanalyse (ANOVA) ausgewertet. Die sich daraus ergebenen Haupteffekte für die Laserbehandlung und die Bleaching-Gele und die Interaktion aus Laserbehandlung x Bleaching-Gel wurden auf Signifikanz geprüft. Um für die Mehrfachtestung zu kompensieren,

wurden der Standardwert für alpha (0.05) per Bonferroni-Korrektur auf alpha* = alpha / Anzahl der Tests = 0.05 / 3 = 0.0167 abgesenkt (Döring & Bortz, 2016). Neben dieser konfirmatorischen Testung der drei Effekte wurde innerhalb der ANOVA mittels Post-hoc-Paarvergleiche (Scheffé-Tests) ebenfalls untersucht, zwischen welchen Bleaching-Gelen es zu Unterschieden kam. Daneben wurde außerdem eine explorative Testung durchgeführt (mittels Mann-Whitney-U-Test), indem alles sechs Kombinationen aus Bleaching-Gel und Laserbehandlung direkt miteinander verglichen wurden. Aus den p-Werten wurde ermittelt, welche Subgruppen einander von der Wirkung ähnlich sind (sich also nicht-signifikant unterscheiden) und welche signifikante Unterschiede aufweisen ($p<0.05$). Diese neu entstandenen Subgruppen wurden in der entsprechenden Abbildungen 20 mittels Buchstaben gekennzeichnet (von “a“ mit dem höchsten Wirkungsgrad zu “c“ oder “d“ mit dem geringsten Wirkungsgrad.) Die Post-hoc-Auswertungen fanden standardgemäß exploratorisch statt, d.h. dass für sie keine weitere Absenkung des alpha-Niveaus vorgenommen wurde und also diese einzelnen Tests in der Diskussion auch nicht einzeln als “signifikant” im konfirmatorischen Sinne bewertet werden dürfen. Da die Differenz zwischen den Lichtenergien (ΔE) zwar der zuvor festgelegte Hauptzielparameter war, aber (1) ein großer ΔE-Wert auch durch große Verschiebungen im Farbton (a oder b) statt in der Helligkeitskomponente (ΔL) zustande kommen kann und (2) das ΔE auch dann einen (großen) positiven Wert annehmen kann, wenn der Zahn durch die Behandlung dunkler wird (also bei negativen ΔL-Werten und damit Misserfolgen), wurden hier zwei Sensitivitätsanalysen zur Absicherung durchgeführt. In der ersten dieser Sensitivitätsanalysen werden Zähne, die dunkler geworden sind (also mit negativer Luminanzdifferenz) als Zähne, bei denen die Behandlung fehlgeschlagen ist, aus der Rechnung entfernt. Dieses Vorgehen sollte zeigen, ob die Ergebnisse aus der ursprünglichen Berechnung eventuell künstlich zu gut gewesen seien. In der zweiten Sensitivitätsanalyse werden statt der ΔE-Werte die ΔL-Werte genommen, also die Differenz aus den Helligkeitswerten, der entsprechend größer und/oder kleiner Null werden kann und nicht gegenüber Farbtonveränderungen empfindlich ist. Auch die Ergebnisse dieser Sensitivitätsanalysen werden rein exploratorisch interpretiert. Ihre Ergebnisse und der Vergleich mit der Hauptanalyse haben daher keine konfirmatorische Aussagekraft an sich und können nur als Hinweise für nachfolgende Studien gewertet werden. Die deskriptiven Ergebnisse werden in den Tabellen als

Mittelwerte und Standardabweichung (M ± SD) angegeben, in Abbildung 19 jedoch als Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle dargestellt, da diese erlauben, signifikante Unterschiede graphisch zu erkennen. Vor Beginn der Testung mittels ANOVA wurden die Daten zusätzlich auf hinreichende Normalverteilung geprüft. Dies ist zwar nicht zwingend erforderlich, da insgesamt 2 x 3 x 15 = 90 Datensätze zur Verfügung stehen und daher von einer asymptotischen Normalverteilung ausgegangen werden kann, wurde hier aber dennoch zur Absicherung und zur Datensichtung im Rahmen der deskriptiven Analyse durchgeführt. Alle Auswertungen wurden in SPSS (Version 27.1, IBM Corp., 2020., Armonk, NY: IBM Corp) durchgeführt und auch alle Abbildungen dort erstellt. Das grundsätzliche Vorgehen und die Ergebnisse wurden von einem Statistiker (Dipl.-Psych.) der Firma Ortmann-Statistik auf Richtigkeit geprüft.

4 Ergebnisse

4.1 Deskriptive Statistik

Für die eigentlich geplante Analyse (Hauptanalyse) wurden die Mittelwerte über alle 15 Zähne in jeder der sechs Versuchsgruppen (Laserbehandlung (ja/nein) x Bleaching-Gele) verglichen. Die Ergebnisse dieser Analyse wurden hier zunächst mit metrischen Parametern (M±SD) in Tabelle 6 und passend dazu in Abbildung 19 als Balkendiagramme dargestellt. Da die QQ-Diagramme (Abbildung 18) zwar eine Normalverteilung nahelegen, jedoch auch Ausreißer zu beobachten waren, wurden in Tabelle 7 zusätzlich noch die nichtparametrischen Maße Median, 25%- und 75%-Quantil dargestellt und durch Boxplots in Abbildung 20 sowie die entsprechenden p-Werte in Tabelle 9 ergänzt. Die Beurteilung der Ergebnisse und spätere Auswertung mittels ANOVA basierte aber allein auf den parametrischen Maßen. Bei erster Betrachtung der Ergebnisse („Hauptanalyse“ in Tabelle 6 und Abbildung 19 A) fiel auf, dass die Werte in der Laserbehandlungsgruppe mit 3.92 (SD = 1.14) für JW Power, 3.50 (SD = 1.56) für WhiteSmile grün und 4.90 (SD = 0.97) für WhiteSmile rot größer sind als in der Gruppe ohne Laserbehandlung mit 2.06 (SD = 0.73), 1.49 (SD = 0.27) und 1.61 (SD = 0.21). Ferner zeigt sich aber auch, dass in der Gruppe mit Laserbehandlung WhiteSmile rot die höchsten ΔE-Werte (4.90) hat, während in der Gruppe ohne Laserbehandlung diesen Platz das Gel JW Power (2.06) einnimmt. Für die erste Sensitivitätsanalyse (Tabelle 6, mittlerer Block, Abbildung 19 B) wurden alle Zähne ausgenommen, die über die Behandlung hin dunkler geworden waren und also im Mittel über die drei Teststellen (inzisal, zentral und zervikal) keine positive Entwicklung der Luminanzwerte (ΔL) hatten. Insgesamt mussten damit zehn Zähne aus der Analyse genommen werden. Trotz dieser Korrektur zeigen sich hier in allen Gruppen ähnliche Mittelwerte und Standardabweichungen wie in der Hauptanalyse und insbesondere die Rangreihenfolge zwischen den Mittelwerten der Gruppen bleibt unverändert. Für die zweite Sensitivitätsanalyse (“Sensitivitätsanalyse ΔL” in Tabelle 6 Abbildung 19 C) wurden wie in der Hauptanalyse alle Zähne (jeweils n = 15) in die Auswertung aufgenommen, allerdings wurde hier die Luminanzdifferenz (ΔL) statt der Energiedifferenz (ΔE) analysiert. Obwohl die Werte eine andere Messgröße beschreiben, zeigt sich in der Gruppe mit Laserbehandlung die gleiche Rangreihenfolge, mit größeren Zuwächsen für das WhiteSmile rot als für

JW Power und WhiteSmile grün. In der Gruppe ohne Laserbehandlung dreht sich allerdings nun hier (eben wegen der Einberechnung der Zähne mit negativer Luminanzdifferenz als negative Zahlenwerte) die Rangfolge um. Hier verzeichnen die mit WhiteSmile grün behandelten Zähne nominell einen größeren Zugewinn als JW Power als WhiteSmile rot.

Tabelle 6: Deskriptive Statistik. Anzahlen, Mittelwerte und Standardabweichungen der ΔE-Werte in der Hauptanalyse und ΔE-Werte und ΔL-Werte in den Sensitivitätsanalysen. M = Mittelwert, SD = Standardabweichung, n = Anzahl.

Laser-Behandlung	Bleaching	n	Hauptanalyse (ΔE) M ± SE	n	Sensitivitätsanalyse (ΔE) M ± SE	n	Sensitivitätsanalyse (ΔL) M ± SE
mit	**JW Power**	15	3.92 ± 1.14	14	3.99 ± 1.15	15	2.95 ± 1.85
	WhiteSmile grün	15	3.50 ± 1.56	14	3.20 ± 1.09	15	1.94 ± 2.46
	WhiteSmile rot	15	4.90 ± 0.97	15	4.90 ± 0.97	15	4.18 ± 1.17
ohne	**JW Power**	15	2.06 ± 0.73	13	2.09 ± 0.75	15	0.75 ± 0.92
	WhiteSmile grün	15	1.49 ± 0.27	15	1.49 ± 0.27	15	0.99 ± 0.39
	WhiteSmile rot	15	1.61 ± 0.21	9	1.66 ± 0.18	15	0.37 ± 0.71

Tabelle 7: Deskriptive Statistik mit nicht-parametrischen Maßen: Anzahl, Mediane und das 25% und 75%-Quantil (in Klammern dahinter) der ΔE-Werte in der Hauptanalyse und ΔE-Werte und ΔL-Werte in den Sensitivitätsanalysen. N = Anzahl, Med = Median, Q25 = 25%-Quantil, Q75 = 75%-Quantil.

Laser-Behandlung	Bleaching	n	Hauptanalyse (ΔE) Med [Q25-Q75]	n	Sensitivitätsanalyse (ΔE) Med [Q25-Q75]	n	Sensitivitätsanalyse (ΔL) Med [Q25-Q75]
mit	**JW Power**	15	3.70 [3.20 – 4.00]	14	3.70 [3.40 – 4.05]	15	2.80 [2.30 – 3.65]
	WhiteSmile grün	15	3.30 [2.60 – 3.40]	14	3.25 [2.60 – 3.38]	15	2.50 [1.30 – 2.95]
	WhiteSmile rot	15	5.30 [4.10 – 5.60]	15	5.30 [4.10 – 5.60]	15	4.20 [3.15 – 5.15]
ohne	**JW Power**	15	2.40 [1.45 – 2.60]	13	2.40 [1.60 – 2.60]	15	0.70 [0.15 – 1.40]
	WhiteSmile grün	15	1.60 [1.25 – 1.70]	15	1.60 [1.25 – 1.70]	15	1.00 [0.90 – 1.25]
	WhiteSmile rot	15	1.60 [1.45 – 1.70]	9	1.65 [1.52 – 1.70]	15	0.40 [-0.10 – 0.85]

4.2 Untersuchung auf Normalverteilung der Daten

Für die ΔE-Werte wurden die Daten vor der Durchführung der Varianzanalyse auf (Abweichung von der) Normalverteilung untersucht. Sowohl der Kolmogorow-Smirnow-Test als auch der Shapiro-Wilk-Test wurden für drei der fünf Ausprägungen signifikant (Tabelle 8). Da jedoch (1) die Q-Q-Plots nur geringfügige Abweichungen von der Diagonalen zeigen (Abbildung 18), (2) Stichproben von N > 30 allgemein als "asymptotisch normalverteilt" gelten und (3) die ANOVA als robust gegenüber Abweichungen von der Normalverteilung gilt, kann die Auswertung mittels ANOVA trotz dieser signifikanten Ergebnisse durchgeführt werden.

Tabelle 8: Testung der Normalverteilungsannahme. Analyse der Untersuchungen auf Normalverteilung mit dem Kolmogorow-Smirnow-Test und dem Shapiro-Wilk-Test für alle fünf Ausprägungen (2 Laserbehandlungen (ja/nein) + 3 Bleaching-Gele). Statistik = Teststatistik der beiden Tests, df = Freiheitsgrade, p = Wahrscheinlichkeit (Signifikanzwert).

		Kolmogorow-Smirnow			Shapiro-Wilk			Abweichung von der
Faktor	**Ausprägung**	**Statistik**	**df**	**p**	**Statistik**	**df**	**p**	**Normalverteilung**
Laser-behandlung	**mit**	0.170	45	0.002	0.941	45	0.024	eher nicht
	ohne	0.184	45	0.001	0.895	45	0.001	wahrscheinlich
Bleaching-Gel	**JW Power**	0.122	30	0.200	0.927	30	0.042	eher nicht
	WhiteSmile grün	0.196	30	0.005	0.788	30	<0.001	wahrscheinlich
	WhiteSmile rot	0.273	30	<0.001	0.831	30	<0.001	wahrscheinlich

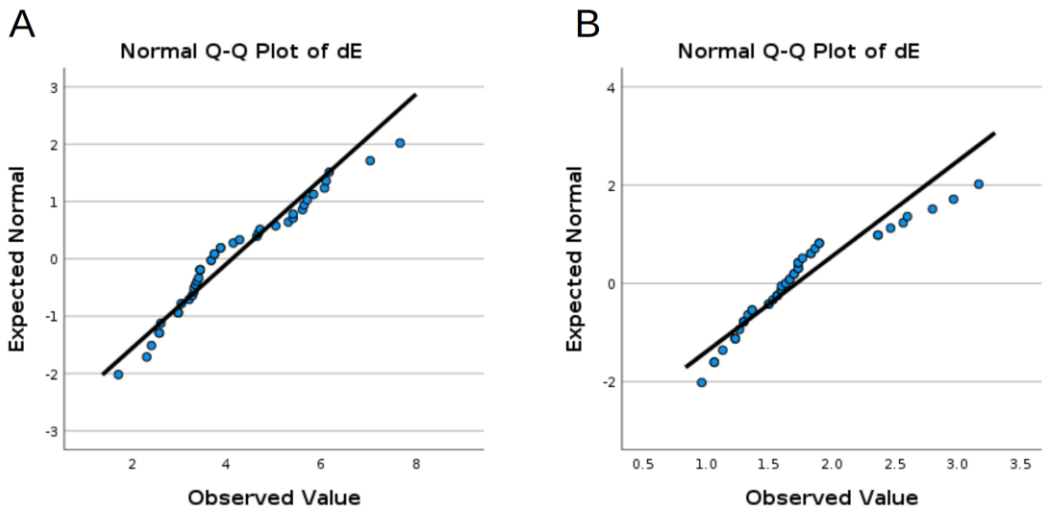


Abbildung 18: Testung der Normalverteilung der ΔE-Werte. Testung mittels Q-Q-Plots für die Daten der Gruppe mit Laserbehandlung (A) und ohne Laserbehandlung (B).

4.3 Hauptanalyse

Für den Zielparameter ΔE ergaben sich (bei Einberechnung der Daten für alle 90 Zähne) in der ANOVA signifikante Unterschiede in beiden Hauptfaktoren (Laserbehandlung und Bleaching) und in deren Interaktion (linker Teil der Tabelle 9 und Abbildung 19 A). Wie oben bereits beschrieben, sind die Mittelwerte in der Gruppe mit Laserbehandlung signifikant größer als in der ohne Laserbehandlung ($F(1, 84) = 144.74$, $p < 0.001 < alpha^* = 0.0167$). Weiterhin zeigen die Ergebnisse signifikante Unterschiede zwischen den Bleaching-Gelen ($F(2, 84) = 5.02$, $p = 0.009 < alpha^* = 0.0167$). Die Post-hoc-Analyse zeigt, dass dieser Gruppenunterschied allein auf einem Unterschied zwischen den Gelen WhiteSmile grün und WhiteSmile rot beruht. Im Graphen (Abb. 19 A) und in Tabelle 6 ist zu erkennen, dass die Behandlungserfolge auch unabhängig von der Laserbehandlung für WhiteSmile rot größer sind als die für WhiteSmile grün. Da auch die Interaktion signifikant wurde ($F(2, 84) = 5.25$, $p = 0.007 < alpha^* = 0.0167$), müssen die Ergebnisse differenzierter betrachtet werden: Es zeigt sich, dass das ΔE sowohl für JW Power als auch für WhiteSmile grün durch die Laserbehandlung um ca. 2.0 Einheiten zunehmen kann, während der Bonus durch die Laserbehandlung für WhiteSmile rot ca. 3.5 Einheiten beträgt.

4.4 Sensitivitätsanalysen

Für die erste Sensitivitätsanalyse wurde die ANOVA nur für die Zähne wiederholt, bei denen es überhaupt einen Erfolg im Sinne einer Helligkeitsverbesserung ($\Delta L > 0$) gab. Diese Auswahl sorgte für ein Aussortieren von insgesamt zehn Zähnen, die jedoch ungleichmäßig über die sechs Gruppen verteilt waren. Während die Erfolge in der Gruppe mit Laserbehandlung so groß waren, dass nur jeweils ein Zahn aus den Gruppen JW Power und WhiteSmile grün erfolgte, wurden in den Gruppen ohne Laserbehandlung zwei Zähne aus der Gruppe JW Power nicht berücksichtigt, aber ganze 6 (40%) aus der Gruppe WhiteSmile rot. Diese Auswahl hatte jedoch keinen gravierenden Einfluss auf die Mittelwerte und Standardabweichungen (Tabelle 6, mittlerer Block) und die ANOVA (Tabelle 9, mittlerer Block). Die Ergebnisse für die beiden Faktoren Laserbehandlung und Bleaching-Gel und die Interaktion blieben signifikant, wobei die Ergebnisse jedoch deutlicher wurden als in der Hauptanalyse (größere F-Werte, kleinere p-Werte). Zudem zeigten sich in dieser Auswertung stärkere Unterschiede

zwischen den Bleaching-Gelen, die sich nun in einer deutlichen Rangfolge von WhiteSmile rot > JP Power > WhiteSmile grün für den Faktor Bleaching, also unabhängig von der Laserbehandlung (d.h. gemittelt über letztere) darstellen. Für die zweite Sensitivitätsanalyse wurden statt der ΔE-Werte die Luminanzunterschiede (ΔL) ausgewertet. Dabei wurden wieder alle Zähne mit einbezogen. Da hier (s.o.) die ΔL-Werte auch negativ werden können, ist hier die Gefahr einer fehlerhaften Interpretation nicht gegeben. Die Ergebnisse dieser ANOVA (Abbildung 19 C und Tabelle 9, rechter Block) zeigen weiterhin einen signifikanten Effekt für die Laserbehandlung und die Interaktion, aber keinen Haupteffekt mehr für die Unterschiede zwischen den Bleaching-Gelen (Tabelle 9). Die vielen (6 von 15) kritischen weil negativen ΔL-Werte in der Gruppe WhiteSmile rot ohne Laserbehandlung senkten den Gruppenmittelwert im Vergleich zu den anderen ab, sodass sich die Rangfolge änderte: Während sich die Mittelwerte in der Gruppe von WhiteSmile grün durch die Laserbehandlung am geringsten steigern (von erster Platz in der Gruppe ohne zu letzter Platz in der Gruppe mit Laserbehandlung) ist es in der Gruppe von WhiteSmile rot genau umgekehrt, während die Gruppe, die mit JP Power behandelt wurde, sowohl mit als auch ohne Laserbehandlung den mittleren Platz belegt. Durch diese Datenlage gleichen sich die Mittelwerte soweit aus, dass der Faktor Bleaching-Gel nicht mehr signifikant wird.

Tabelle 9: Ergebnisse der Varianzanalysen. Resultate der drei separat durchgeführten ANOVAs für die Hauptanalyse mit allen Zähnen in allen Gruppen und dem Zielparameter ΔE und den beiden Sensitivitätsanalysen I (mit dem gleichen Zielparameter aber nur Zähnen, die durch die Behandlung heller geworden sind (ΔL > 0)) und II mit dem Zielparameter ΔL wiederum für alle Zähne. Die Ergebnisse sind angegeben für die beiden Faktoren Laserbehandlung und Bleaching-Gel sowie deren Interaktion. Die Zeilen darunter geben die Signifikanzwerte (p) für die drei post-hoc durchgeführten Paarvergleiche an (Scheffé-Test). df = Freiheitsgrade, F = Teststatistik der ANOVA, p = Signifikanzwert.

	Hauptanalyse (ΔE)			**Sensitivitätsanalyse (ΔE)**			**Sensitivitätsanalyse (ΔL)**		
	df	**F**	**p**	**df**	**F**	**p**	**df**	**F**	**p**
Faktor									
Laserbehandlung	1, 84	144.74	< 0.001	1, 74	138,78	<0.001	1, 84	58.96	<0.001
Bleaching	2, 84	5.02	0.009	2, 74	8.56	<0.001	2, 84	2.38	0.099
Interaktion	2, 84	5.25	0.007	2, 74	5.81	<0.001	2, 84	7.47	0.001
Post-hoc Analysen									
JW Power vs WhiteSmile grün			0.134			0.006			0.585
JW Power vs WhiteSmile rot			0.553			0.044			0.524
WhiteSmile grün vs WhiteSmile rot			0.010			<0.001			0.099

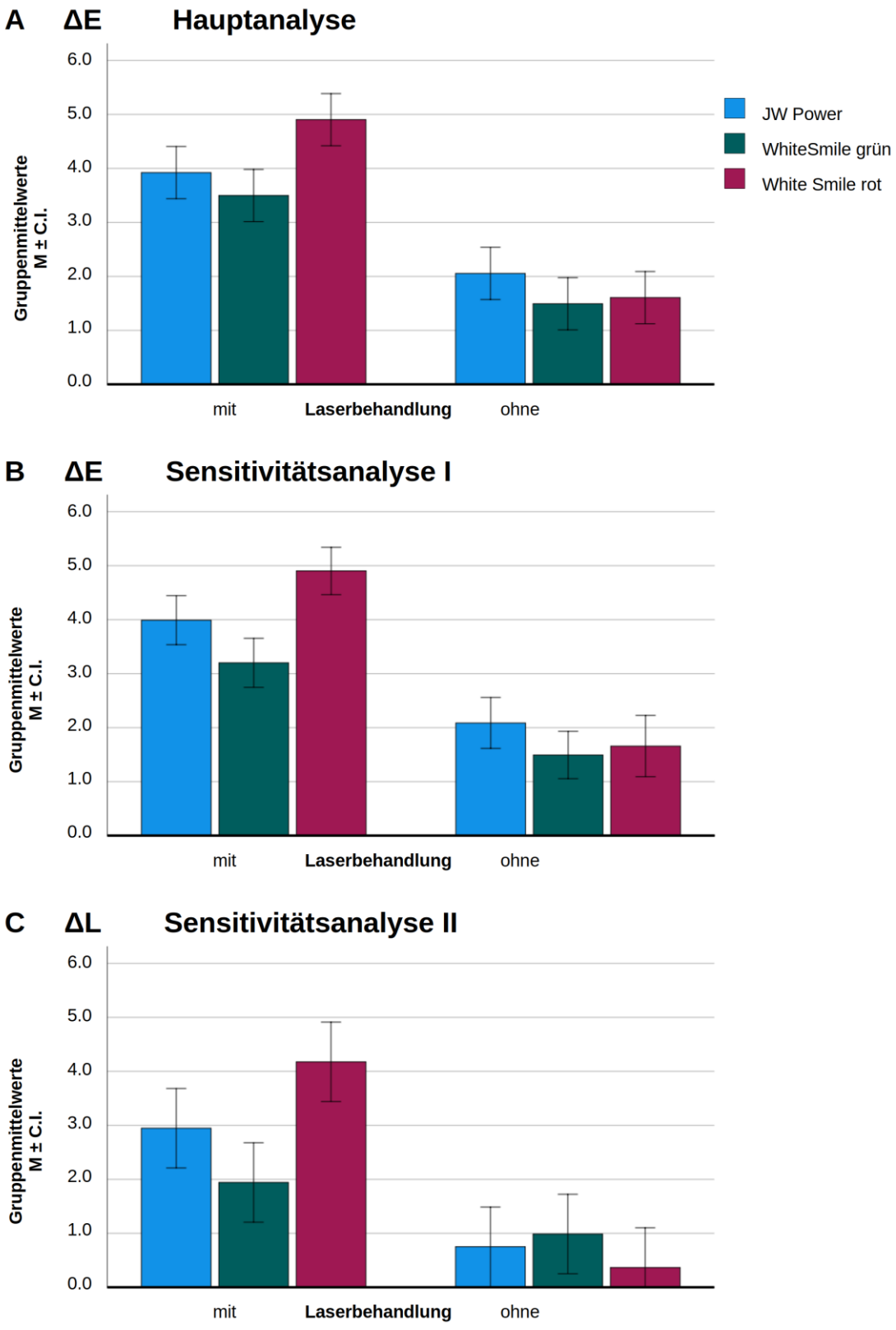


Abbildung 19: Ergebnisse der Varianzanalysen. Resultate der drei separat durchgeführten ANOVAs für die Hauptanalyse mit allen Zähnen in allen Gruppen und dem Zielparameter ΔE und den beiden Sensitivitätsanalysen I (mit dem gleichen Zielparameter aber nur Zähnen, die durch die Behandlung heller geworden sind (ΔL > 0)) und II mit dem Zielparameter ΔL wiederum für alle Zähne. Die Höhe der Balken geben jeweils die Gruppenmittelwerte, die Antenne die 95%-Konfidenzintervalle (C.I.) an.

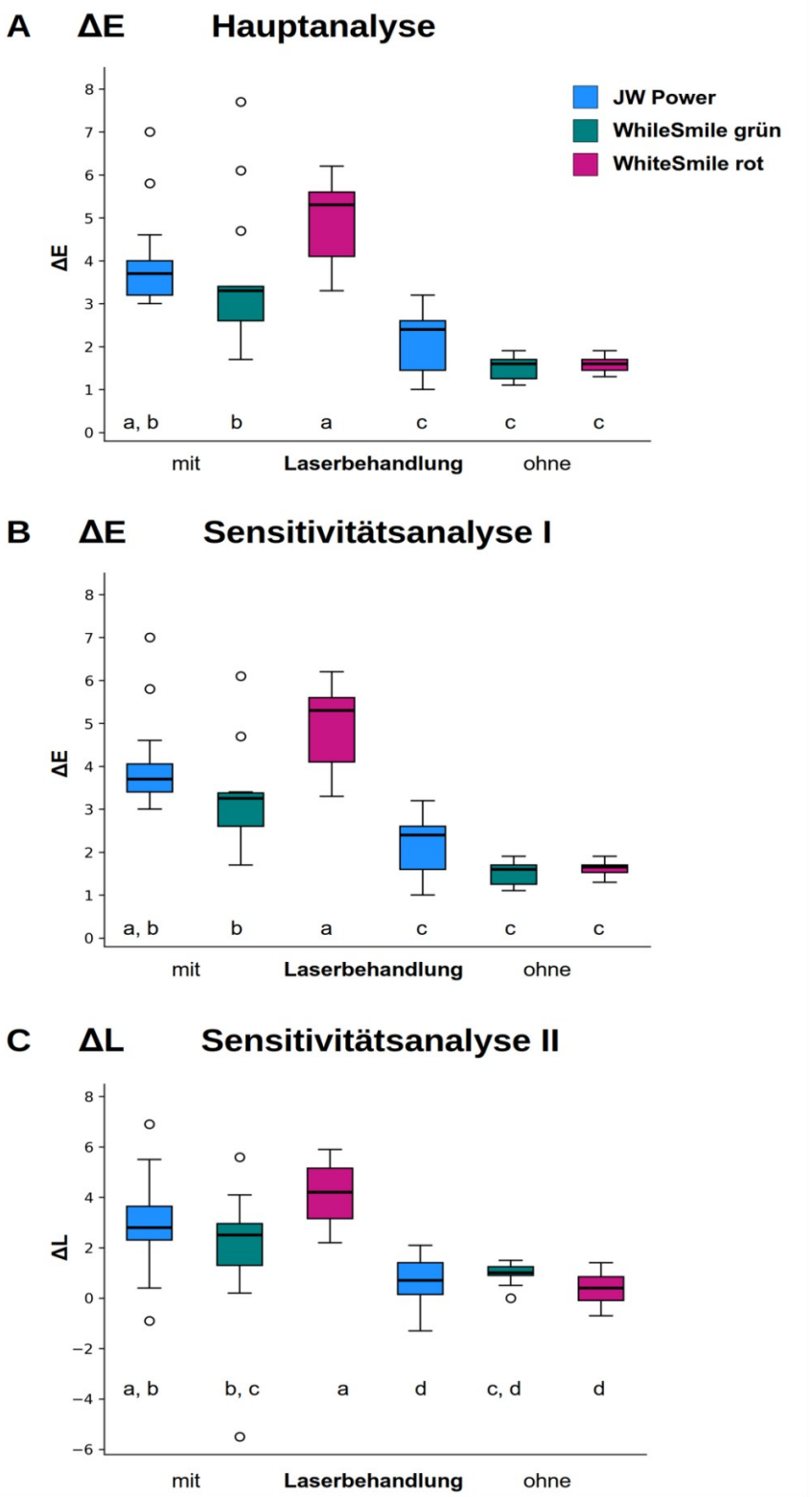


Abbildung 20: Darstellung der Ergebnisse als Boxplot. Resultate der (A) Hauptanalyse mit Zielparameter ΔE für alle n=15 Zähne in jeder der 6 Gruppen, (B) Sensitivitätsanalyse I mit dem gleichen Zielparameter ΔE, aber nur für die Zähne, die durch die Behandlung heller geworden sind (ΔL > 0) und (C) Sensitivitätsanalyse II mit Zielparameter ΔL wiederum mit allen Zähnen in jeder Gruppe. Die Kästchen der Boxplots zeigen wie üblich das 25%-Quantil (unterer Rand), den Median (schwarzer Strich innerhalb des Kästchens) und das 75%-Quantil (oberer Rand). Die Antennen nach unten und oben zeigen das Minimum und das Maximum an, jeweils ohne eventuell vorkommende Ausreißer, die als einzelne Ringe dargestellt sind. Unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede, gleiche Buchstaben das Fehlen statistisch signifikanter Unterschiede zwischen den Gruppen an.

Tabelle 10: P-Wert Tabellen für die Hauptanalyse, Sensitivitätsanalyse I und Sensitivitätsanalyse II. Statistisch signifikante Unterschiede sind farblich hervorgehoben. Testung mittels paarweiser Mann-Whitney Test mit sequentieller Bonferroni-Korrektur.

Δ E		**Mit Laserbehandlung**			**Ohne Laserbehandlung**		
		JW Power (rot)	**WhiteSmile (grün)**	**WhiteSmile (rot)**	**JW Power (rot)**	**WhiteSmile (grün)**	**WhiteSmile (rot)**
Mit Laser-behandlung	**JW Power (rot)**		0.2356	0.0714	0.0001	0.0000	0.0000
	WhiteSmile (grün)	0.2356		0.0120	0.0091	0.0001	0.0001
	WhiteSmile (rot)	0.0714	0.0120		0.0000	0.0000	0.0000
Ohne Laser-behandlung	**JW Power (rot)**	0.0001	0.0091	0.0000		0.2356	0.3681
	WhiteSmile (grün)	0.0000	0.0001	0.0000	0.2356		0.3681
	WhiteSmile (rot)	0.0000	0.0001	0.0000	0.3681	0.3681	
		a b	**b**	**a**	**c**	**c**	**c**

Δ E (bei ΔL > 0)		**Mit Laserbehandlung**			**Ohne Laserbehandlung**		
		JW Power (rot)	**WhiteSmile (grün)**	**WhiteSmile (rot)**	**JW Power (rot)**	**WhiteSmile (grün)**	**WhiteSmile (rot)**
Mit Laser-behandlung	**JW Power (rot)**		0.0788	0.0978	0.0002	0.0001	0.0013
	WhiteSmile (grün)	0.0788		0.0028	0.0292	0.0002	0.0028
	WhiteSmile (rot)	0.0978	0.0028		0.0001	0.0001	0.0001
Ohne Laser-behandlung	**JW Power (rot)**	0.0002	0.0292	0.0001		0.2673	0.5867
	WhiteSmile (grün)	0.0001	0.0002	0.0001	0.2673		0.5867
	WhiteSmile (rot)	0.0013	0.0028	0.0001	0.5867	0.5867	
		a b	**b**	**a**	**c**	**c**	**c**

Δ L		**Mit Laserbehandlung**			**Ohne Laserbehandlung**		
		JW Power (rot)	**WhiteSmile (grün)**	**WhiteSmile (rot)**	**JW Power (rot)**	**WhiteSmile (grün)**	**WhiteSmile (rot)**
Mit Laser-behandlung	**JW Power (rot)**		0.5532	0.0899	0.0040	0.0057	0.0027
	WhiteSmile (grün)	0.5532		0.0104	0.0336	0.0761	0.0102
	WhiteSmile (rot)	0.0899	0.0104		0.0001	0.0001	0.0001
Ohne Laser-behandlung	**JW Power (rot)**	0.0040	0.0336	0.0001		0.5532	0.5532
	WhiteSmile (grün)	0.0057	0.0761	0.0001	0.5532		0.0723
	WhiteSmile (rot)	0.0027	0.0102	0.0001	0.5532	0.0723	
		a b	**b c**	**a**	**d**	**c d**	**d**

5 Diskussion

Die vorliegende Studie untersuchte die Wirkung von laseraktivierten Bleichmitteln auf Zähne und deren Einflussfaktoren. Im folgenden Diskussionsteil werden die Ergebnisse der Untersuchung im Kontext bestehender Forschungsliteratur interpretiert und kritisch reflektiert. Dabei werden sowohl die Stärken als auch die Limitationen der Studie herausgearbeitet, um ein umfassendes Verständnis der Thematik zu fördern. Zudem werden Empfehlungen für zukünftige Forschungen formuliert, um die Erkenntnisse weiter zu vertiefen und die Validität der Ergebnisse zu erhöhen. Abschließend wird die Bedeutung der Resultate im Hinblick auf ihre praktische Relevanz für die Zahnmedizin und die Anwendung von Bleichmitteln im klinischen Alltag bewertet.

5.1 Diskussion der Methode

Verwendete Zahnproben

Im Rahmen dieser Studie wurden insgesamt 90 Zähne verwendet, wobei die Auswahl und Vorbereitung der Proben im Hinblick auf mögliche Einflussfaktoren auf die Bleicheffekte kritisch betrachtet werden muss. Die Wahl der 90 Zähne erscheint als ausreichend. Es hätte jedoch eine detaillierte Analyse der Verteilung und Herkunft der Zähne notwendig sein können, um mögliche Verzerrungen zu vermeiden. Besonders relevant ist hierbei die Frage, ob alle Zähne in einem vergleichbaren Zustand vorlagen. Praktisch ist es unmöglich, gleichaltrige Zähne zu sammeln, weswegen menschliche Frontzähne verschiedenen Alters und Geschlechts mit einer Wurzel verwendet wurden. Bei der Auswahl der Zähne wurde darauf geachtet, dass keine Schäden, Kariesbefall und konservierende Vorbehandlungen vorlagen. Aber auch Unterschiede der natürlichen Zähne in der Grundfarbe, Form, Dicke der Zahnhartsubstanz oder Mineralisierung könnte den Bleicheffekt unterschiedlich beeinflusst haben. Der Aufhelllungseffekt fällt schwächer bzw. stärker aus je heller bzw. gelber der Zahn zu Beginn ist (Gerlach & Zhou, 2001). Die unterschiedlichen Zähne wurden allerdings zufällig in sechs Gruppen verteilt, wodurch die Voraussetzung zu Beginn randomisiert war. Es wäre daher sinnvoll, zukünftig eine genauere Beschreibung des Zahnstatus, einschließlich der Färbung, Mineralisierung und der Anfälligkeit der Zähne gegenüber Bleichmitteln, vorzunehmen. Eine solche detaillierte Kontrolle dieser Parameter würde die Validität der Ergebnisse stärken

und die Vergleichbarkeit der Proben besser gewährleisten. Die Lagerung der extrahierten Zähne in Natriumchlorid (NaCl)-Lösung + 0,001 Gew.-% Natriumazid, wie in der vorliegenden Studie, dient häufig der Erhaltung von physiologischen Bedingungen während experimenteller in vitro Untersuchungen. Obwohl der direkte Einfluss von NaCl auf das Bleaching-Ergebnisse nicht umfassend untersucht wurde, liefern einige Studien indirekte Hinweise auf mögliche Effekte:
So wurde festgestellt, dass Natriumchlorid in Anwesenheit von Säuren Chlordioxid freisetzt, welches ebenfalls eine aufhellende Wirkung besitzt (Zantner et al., 2007). Diese Erkenntnis legt nahe, dass die Lagerungsbedingungen, einschließlich der Verwendung von NaCl, das Bleaching-Ergebnis beeinflussen könnten. Es ist allerdings in der vorliegenden Studie nicht von einer Säureeinwirkung während der Lagerung auszugehen.

Fixierung der Zähne

Die Fixierung der Zähne erfolgte sowohl mit Gips als auch mit Wachs. In der Praxis kann dies mit gewissen Herausforderungen verbunden sein. Ein wesentlicher Kritikpunkt an dieser Technik ist, dass die Gips- bzw. Wachsfixierung potenziell ungleichmäßige Ergebnisse hervorrufen könnte. Dies liegt vor allem daran, dass Gips und Wachsreste, die nach der Fixierung auf den Zähnen zurückbleiben, die nachfolgende Applikation von Gelen oder anderen Materialien negativ beeinflussen könnten. Solche Rückstände können zu einer unregelmäßigen Verteilung des Materials führen, was die Präzision und Qualität des gesamten Verfahrens beeinträchtigen könnte. Darüber hinaus könnten die Reste mechanische Barrieren schaffen, die die vollständige und gleichmäßige Verteilung der Bleichgele verhindern. In der vorliegenden Studie wurde daher sorgfältig auf eine vollständige Entfernung von Materialresten geachtet.

Bleachinggele

Der wichtigste Aspekt beim Bleaching ist die H_2O_2 - Konzentration der Gele. Die H_2O_2 - Konzentration bei beiden WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gels beträgt 32 % und beim JW POWER Bleaching Next Gel 35 %. Die Konzentration ist ähnlich und stellt somit keine klinische relevante Variable dar.

Applikation der Bleachinggele

Die Standardisierung der Applikation, insbesondere die exakte Kontrolle der Schichtdicke des verwendeten Gels, stellt einen entscheidenden Faktor für die Qualität und Wirksamkeit des Verfahrens dar. Im Rahmen der Studie wurde methodisch bedingt, durch die Höhe der Unterlegscheibe, eine Schichtdicke von 1,6 mm verwendet. Laut Gebrauchsanweisung der Gelhersteller sollen die Gele 1 - 2 mm dick aufgetragen werden. Dieses wurde durch die Verwendung der Unterlegscheibe gewährleistet. Allerdings zeigt sich in der praktischen Umsetzung, dass es herausfordernd sein kann, diese Dicke präzise zu erreichen, besonders wenn die Gelapplikation manuell erfolgt. Hierbei ist es schwierig, eine gleichmäßige Verteilung des Gels auf der Zahnoberfläche zu gewährleisten, was zu Abweichungen in der Schichtdicke führen kann. Diese Ungenauigkeiten könnten das Ergebnis der Behandlung negativ beeinflussen, da die Gelmenge nicht immer in der optimalen Weise aufgetragen wird. Zudem ist in der wissenschaftlichen Literatur keine Einigkeit darüber zu finden, dass genau 1 – 2 mm (oder so wie in der vorliegenden Studie 1,6 mm) die ideale Schichtdicke für den Bleicheffekt darstellen. Verschiedene Studien und experimentelle Bedingungen könnten zu abweichenden Empfehlungen führen, was die Notwendigkeit einer weiteren Untersuchung dieses Parameters unterstreicht. Eine zu dünne Schicht könnte die Effektivität des Bleichprozesses verringern, während eine zu dicke Schicht möglicherweise zu unerwünschten Nebenwirkungen führen könnte, wie etwa einer ungleichmäßigen Bleichwirkung oder einer veränderten Einwirkzeit. Ein Verbesserungsvorschlag, um die Schichtdicke präziser zu kontrollieren, wäre die Einführung einer genaueren Kontrolle des Applikationsprozesses. Dies könnte durch den Einsatz spezieller Messvorrichtungen oder durch eine Automatisierung des Applikationsvorgangs erreicht werden. Eine solche Vorrichtung könnte die Gelmenge exakt dosieren und die Schichtdicke auf jedem Zahn konstant halten. Die Automatisierung würde nicht nur die Reproduzierbarkeit des Verfahrens erhöhen, sondern auch dazu beitragen, menschliche Fehlerquellen zu minimieren und die Effizienz der Behandlung zu steigern. Alternativ könnten auch spezifische Applikationshilfen, wie z. B. Applikatoren mit vorgegebenen Schablonen oder Messsystemen, eine präzisere Anwendung des Gels ermöglichen. In der vorliegenden Studie wurden die Zähne in Gips gefasst. Dadurch entstanden in Gips gefasste Zähne (Abb. 15), die genau 1,6 mm Platz zur Gipsoberkante hatten, wodurch eine standardisierte

Schichtdicke für die Applikation der Gele gewährleistet wurde und jeder Zahn mit genau der selben Menge Gel behandelt werden konnte.

Messung der Zahnaufhellung

Die Messung der Aufhellung von Zähnen, häufig durch den ΔE-Wert bestimmt, stellt eine etablierte und weit akzeptierte Methode dar, um die Effektivität von Zahnaufhellungsverfahren objektiv zu quantifizieren (Möbius et al., 2024; Peskersoy et al., 2014). Die spektrophotometrische Messung, die zur Bestimmung des ΔE-Werts verwendet wird, ist eine präzise Technik, die die Farbänderung zwischen zwei Zeitpunkten erfasst. Dennoch gibt es kritische Faktoren, die die Genauigkeit und Reproduzierbarkeit dieser Messung beeinflussen können. Ein bedeutender Kritikpunkt ist die Notwendigkeit, die Messung unter konstanten Umweltbedingungen durchzuführen, insbesondere hinsichtlich der Beleuchtung und der Temperatur. Externe Faktoren wie Veränderungen der Lichtverhältnisse oder Temperaturschwankungen während der Messung könnten die Ergebnisse verzerren und die Validität der Messung beeinträchtigen. Die Spektrophotometrie basiert auf der Erfassung von Farbdaten, die extrem empfindlich auf Lichtquellen und Umgebungsbedingungen reagieren. Wenn diese nicht konstant gehalten werden, könnte dies zu inkonsistenten ΔE-Werten führen, die die Interpretation der Ergebnisse erschweren. Ein standardisiertes Konzept zur photometrischen Messung, wie in der vorliegenden Studie, ist die Positionierung der Zähne in einer Box, um die Belichtung während der photometrischen Messung zu stabilisieren. Hierbei wurden eine Box (Abb. 13), mit einer Öffnung für den Ansatz des Shadepilots hergestellt. Die Öffnung der Box ist gerade so groß, dass der Ansatz hindurchpasst, wodurch zusätzliches Licht abgeschirmt wird. Es erfolgte dadurch eine Farbnahme, die bei jeder Messung gleich war und durch kein zusätzliches Licht von außen beeinflusst wurde. Dieser Ansatz zielt darauf ab, die Zähne in einer konstanten und reproduzierbaren Position zu fixieren, was die Belichtungsbedingungen vereinheitlicht. Allerdings könnte diese Methode, wenn die Zähne nicht perfekt in einer standardisierten Position fixiert sind, ebenfalls zu Ungenauigkeiten führen. Eine fehlerhafte Ausrichtung der Zähne und des Shadepilots könnte eine ungleichmäßige Belichtung verursachen, was die Messergebnisse verzerren würde. Auch wenn die Idee grundsätzlich sinnvoll erscheint, wird die Präzision der Positionierung entscheidend für die Qualität der

Messung sein. Ein Verbesserungsvorschlag zur Erhöhung der Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der spektrophotometrischen Messung wäre eine detaillierte Beschreibung der Kontrollbedingungen während der Messung. Insbesondere die Lichtverhältnisse und die Raumtemperatur sollten exakt spezifiziert und standardisiert werden, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Eine konstante Beleuchtung, idealerweise mit einer standardisierten Lichtquelle (wie einer speziellen Weißlichtquelle) und die Durchführung der Messung unter kontrollierten Temperaturbedingungen, könnten die Messung erheblich stabilisieren. Dies würde nicht nur die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse verbessern, sondern auch die Validität der gewonnenen ΔE-Werte erhöhen, was zu zuverlässigeren und aussagekräftigeren Ergebnissen führen würde.

Zur Verbesserung der Positionierung könnte der Einsatz einer präziseren Vorrichtung beitragen. Eine speziell entwickelte Halterung oder ein stabiler Fixierungsmechanismus könnte sicherstellen, dass die Zähne und der Shadepilot in einer standardisierten, exakt wiederholbaren Position gehalten werden, unabhängig von individuellen Variationen in der Handhabung. Solche Vorrichtungen könnten ebenfalls eine gleichmäßige Belichtung garantieren, wodurch die Messergebnisse verlässlicher und konsistenter würden. Die Einführung solcher Systeme würde nicht nur die Genauigkeit der ΔE-Wert-Messung verbessern, sondern auch die Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Studien und experimentellen Ansätzen erhöhen.

5.2 Diskussion der Ergebnisse

In der Hauptanalyse, für die als Helligkeitsmaß die Vorher-Nachher-Differenz über alle drei Farbkanäle (ΔE) verwendet wurde, ergab sich für das reine Bleaching ohne zusätzliche Laserbehandlung ein kleiner aber signifikanter Vorteil für das Bleachingmittel JW Power, mit dem man größere ΔE-Werte erzielen konnte (ΔE ≈ 2.0) als mit den beiden anderen Bleachingmitteln WhiteSmile grün und WhiteSmile rot (jeweils ΔE ≈ 1.5, bzw. 1.6). Eine zusätzliche Laserbehandlung hatte auf die drei Gruppen unterschiedliche Auswirkungen. Während die Helligkeitswerte für die Gruppen mit den Bleachingmitteln JW Power und WhiteSmile grün um jeweils ca. 2.0 Einheiten auf ΔE ≈ 4.0, bzw. 3.5 anstiegen, war nicht nur die Verbesserung mit einem Plus von 3.3 bei WhiteSmile rot wesentlich größer als bei den beiden anderen Stoffen. Der erzielte Aufhellungseffekt war auch mit einem Wert von ΔE ≈ 4.9 absolut gesehen am

stärksten. Dies lässt darauf schließen, dass das Bleachingmittel WhiteSmile rot bereits mit Hinblick auf eine kombinierte Behandlung aus chemischem Bleaching und einer physikalischen Aktivierung durch eine Laserbehandlung entwickelt und optimiert wurde, da bei einer Behandlung ohne Lasereinwirkung lediglich eine zweitrangige Aufhellung erzielt wurde. Auch im Hinblick darauf, dass ebenfalls ein weiters rotes Gel (JW Power Bleaching Next) verwendet wurde, welches nicht die Ergebnisse vorzuweisen hat, wie das WhiteSmile rot, wird dieses Ergebnis untermauert. Die rot gefärbten Bleichgele schneiden besser ab, da dies auf die erhöhte Absorption der 445 nm – Wellenlänge im roten Pigment zurückzuführen ist (Braun et al., 2018). Das blaue Laserlicht beschleunigt den Bleachingvorgang durch photothermische und photochemische Mechanismen, und der rote Farbstoff absorbiert die Lichtenergie, welche in Wärme umgewandelt wird. Es kommt dadurch zu einem verstärkten Bleicheffekt, welcher auf einem Temperaturanstieg und damit verbunden zu einer beschleunigten Zersetzung der H_2O_2 – Moleküle zurückzuführen ist (Buchalla & Attin, 2007).

In den beiden durchgeführten Sensitivitätsanalysen ergaben sich ähnliche Ergebnisse. In der ersten wurden nur die Zähne betrachtet, bei denen sich eine Aufhellung ergab. In der Hauptanalyse hatten sich bei zwei Zähnen eine Verdunklung ergeben, die aber wegen der Berechnung des ΔE über die euklidische Distanz auch zu positiven ΔE-Werten führte und damit das Ergebnis hätte verfälschen können. Aber auch als diese beiden Zähne aus den Berechnungen entfernt wurden, ergaben sich vergleichbare Werte. Um dieses Problem weiterhin zu kontrollieren, wurde in der zweiten Sensitivitätsanalyse neben dem ΔE aus der Hauptanalyse das Maß ΔL verwendet. Anders als das ΔE basiert ΔL nicht auf der euklidischen Distanz und wird bei Verdunkelung negativ, sodass für diese Analyse wieder alle Werte in die Berechnung einfließen konnten. Die Mittelwerte und Konfidenzintervalle weichen von denen in der Hauptanalyse aufgrund der komplett anderen Bestimmung der Maße ΔL und ΔE ab, und auch die ermittelten Differenzen unterscheiden sich demnach von denen aus der Hauptanalyse (mit ΔE als Maß). Jedoch zeigen sich auch hier qualitativ ähnliche Ergebnisse. Ohne Laserbehandlung kommt es hier zu keinen signifikanten Unterschieden zwischen den drei Bleachinggelen (überlappende Konfidenzintervalle). Bei zusätzlichem Einsatz der Laserbehandlung kommt es zu einer geringen Aufhellung von 0.8 bei WhileSmile grün, zu einer mittelgradigen von 2.2 bei JW Power und zu einer viel größeren von 3.8 Punkten bei

Verwendung von WhiteSmile rot. Die Gesamtinterpretation, dass es zwischen den drei Gelen eher geringe Erfolgsunterschiede bei der Anwendung ohne Laserbehandlung gibt und das aber die Laserbehandlung allgemein und insbesondere die Behandlung mit WhileSmile rot vom zusätzlichen Einsatz der Laserbehandlung zu einem höheren Erfolg führt, blieben damit erhalten.

Die Forschungen der letzten Jahre beschäftigen sich mit der Optimierung des Bleachings mit Hilfe von Lichtquellen. Vergleicht man die Ergebnisse dieser Studie mit den Ergebnissen von ähnlichen Studien der letzten Jahre, kommen diese teilweise zu differenzierten Schlussfolgerungen. In einer systemischen Analyse klinischer und In- vitro – Studien von Anagnostaki et al. aus dem Jahr 2023 wurde die Durchführung von laseraktiviertem Bleaching im Vergleich zu herkömmlichen Bleaching beurteilt. Hierbei verbessert der Laser die Farbe der Zähne im Vergleich zum nicht aktivierten Bleichen nicht signifikant (Anagnostaki et al., 2023). Laut der Arbeitsgruppe um Hein entstehen durch verschiedene Lampen im Wellenlängenbereich von 360 – 580 nm keine besseren Bleichergebnis im Vergleich zum Bleaching ohne Lichtaktivierung (Hein et al., 2003). Auch Giudice und Mitarbeiter kommen zu dem Ergebnis, dass die Laser-Aktivierung die Wirksamkeit des Bleichens nicht verbessert (Lo Giudice et al., 2016).

Im Gegensatz dazu kann mithilfe der vorliegenden Studie gezeigt werden, dass der SiroLaser Blue mit einer Wellenlänge von 445 nm zum Aufhellen von Zähnen verwendet werden kann und das Laserbleaching dabei besser abschließt als das konventionelle Bleaching ohne Laseraktivierung. Dies unterstreicht ebenfalls die Studie von Möbius et al. aus 2024 und die Studie von Shahabi et al. aus 2024, die die Wirksamkeit von Diodenlasern mit verschiedenen Wellenlängen untersuchten. Der größte Aufhellungseffekt tritt bei Diodenlasern mit einer Wellenlänge von 445 nm auf. (Möbius et al., 2024; Shahabi et al., 2024). Auch Möbius et al. kommen zu dem Ergebnis, dass das Laserbleaching effektiver ist als das konventionelle Aufhellen der Zähne ohne Laseraktivierung.

Die unterschiedlichen Ergebnisse sind eventuell darauf zurückzuführen, dass andere Autoren zwar ähnliche Parameter verwendeten, diese aber nicht auf den gewünschten Effekt abgestimmt wurden. Es ist daher wichtig, Laser und die dazugehörigen Parameter auf das Bleaching-Gel und den gewünschten Effekt abzustimmen.

Die Bestrahlungszeit und Leistungseinstellung ist dabei ein wichtiger Aspekt und hat signifikante Auswirkungen auf die Farbveränderung. Dabei ist die Veränderung der Zahnfarbe bei einer Bestrahlungsdauer von 50 – 60 Sekunden bei einer Leistung von 0,5 – 1 Watt stark und wird noch stärker bei 1,5 – 2 Watt mit einer Dauer von 30 – 60 Sekunden (Papadopoulou et al., 2024).

Hinsichtlich der Dauer und Stärke der Bestrahlung kommt die Frage auf, ab wann und mit welchen maximalen Einstellungen des Lasers intrapulpale Temperaturen thermische Schäden auf die Zahnpulpa verursachen. In Studien von Papadopoulou et al. aus 2023 und Saberi et al. aus 2021 kommen die Arbeitsgruppen zu dem Ergebnis, dass die Sicherheitsschwelle um Schäden der Pulpa zu minimieren bei 5,5 °C (Anstieg Temperatur) und bei einer Durchschnittsleistung von 0,5 – 2 Watt und einer Bestrahlungsdauer von 10 – 60 Sekunden liegt (Papadopoulou et al., 2023; Saberi et al., 2021). Die in der vorliegenden Studie verwendeten Parameter liegen hierbei im Einstellungsbereich, weswegen von keiner Schädigung der Pulpa ausgegangen werden muss.

Zudem haben Papadopoulou et al. ebenfalls einen 445 nm Laser (im Dauerstrich Modus) in Kombination mit einem roten Gel untersucht und kamen zu der Schlussfolgerung, dass die Verwendung eines roten Gels mit den oben genannten Parametern als sicher für die Pulpa anzusehen ist (Papadopoulou et al., 2023). Der Grund dafür liegt in der Absorption der Lichtenergie. Es kommt hierbei zu einer physikalischen und chemischen Wechselwirkung zwischen dem Gel und dem Laserlicht. Der Laser (445 nm) gibt blaues Licht ab. Ein rotes Gel absorbiert im blauen Wellenlängenbereich, da sich die Farben komplementär verhalten. Die Wellenlänge des Lichtes befinden sich hierbei räumlich und zeitlich in Phase (Kouros et al., 2020), dabei wird eine Wellenlänge von 445 nm von pigmentierten Zellen wie Hämoglobin und Melanin stark absorbiert. Ein großer Teil der Laserenergie wird bei der Bestrahlung eines vitalen Zahnes vom Pulpagewebe (reich an Hämoglobin) absorbiert, was zu einem Temperaturanstieg und somit zu einer Schädigung führen kann. Bei der Verwendung eines roten Gels wird, wie oben bereits beschrieben, eine Absorption der Lichtenergie erreicht. Folglich beschleunigt das blaue Licht den Vorgang, da die Farbstoffe im Gel die Lichtenergie absorbieren und den Laserstrahl beim Eindringen in den Zahn hindert (Papadopoulou et al., 2023). Außerdem wird, wie in 5.2 bereits erwähnt, die Energie in Wärme umgewandelt.

Es entsteht ein Temperaturanstieg und dadurch eine beschleunigte Zersetzung von Wasserstoffperoxid zu freien Radikalen, was den Bleichprozess effektiver macht (Buchalla & Attin, 2007) als bei der Vergleichsgruppe WhiteSmile grün.
In der vorliegenden Arbeit wurde die Farbbestimmung unmittelbar nach dem Bleaching durchgeführt, was zu Fehlinterpretationen führen kann, da durch den Austrocknungseffekt ein zusätzlicher Bleicheffekt erzielt werden kann. Durch die Isolation von Wasser wirken Zähne weißer. Dies wurde in der Studie von Möbius et al. berücksichtigt, da im Versuchsaufbau die physiologische Blutzirkulation als Parameter mit einbezogen wurde (Möbius et al., 2024). Da diese aber dennoch ähnliche Ergebnisse liefert wie die vorliegende Studie, scheint dieser Parameter vernachlässigbar zu sein. Es kann somit hierbei von einem Aufhellungseffekt allein durch den Bleichvorgang und der Aktivierung durch den Laser ausgegangen werden.

5.3 Schlussfolgerung und klinischer Ausblick

Die Studie zeigt nach Betrachtung der Ergebnisse, dass sich die unter Abschnitt 2 aufgestellten Arbeitshypothesen bestätigen lassen und betonen die Wirksamkeit des diodenlaserbasierten Bleichens von Zähnen mit einer Wellenlänge von 445 nm. Die vorliegende Studie konnte zeigen, dass die verwendete Laserlichtquelle einen signifikanten Einfluss auf klassische Bleichgele ausübt und dadurch insgesamt die Effizienz eines Bleichvorgangs steigern kann. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass insbesondere die Zusammensetzung der Bleichgele bezogen auf die Farbstoffzusätze maßgeblich für den Aufhellungseffekt sein können. Das laserkatalysierte Bleichen von Zähnen mit einer Wellenlange von 445 nm stellt somit eine sinnvolle und effektive Ergänzung zum klassischen Bleichen dar und bietet insbesondere in Hinblick auf kürzere Anwendungszeiten und verbesserte Aufhellungsergebnisse neue Möglichkeiten.
Für die Zukunft zeigen sich außerdem weitere interessante Forschungsansätze: Zum einen sollte die langfristige Stabilität der erzielten Aufhellungseffekte untersucht werden. Aber auch bezogen auf die Sensitivitätsproblemtatik nach Bleichvorgängen sollten bestehenden Forschungslücken näher untersucht und für die Anwendung im praktischen Alltag getestet werden. Ebenfalls wäre eine Erweiterung der Studie unter Hinzunahme von unterschiedlichen Zahnverfärbungstypen oder Patientengruppen denkbar. Standardisierte

Protokolle für den klinischen Einsatz des 445 nm Diodenlasers wäre hier sicherlich sinnvoll und würden helfen, die verwendete Methode klinisch zu etablieren.

6 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht darin, die Effizienz der adjuvanten Therapie durch einen Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 445 nm bei der Katalyse von Bleichprozessen an drei unterschiedlichen Bleich - Gelen zu untersuchen.

90 nicht vorbehandelte, menschliche Ober- und Unterkiefer Frontzähne wurden in Hartgips gefasst und randomisiert in 6 Gruppen (n = 15) aufgeteilt. Gruppe A: WHITEsmile grün 32%, Gruppe B: WHITEsmile rot 32%, Gruppe C: JW Power rot 35%, Gruppe D: WHITEsmile grün 32%, Gruppe E: WHITEsmile rot 32% und Gruppe F: JW Power rot 35%. Die Gele der Gruppe A, B und C wurden mit einem Tastverhältnis in cw (Dauerstrich Modus), mit einer Leistung von 1,2 Watt, einer Lasereinwirkzeit von 4 Intervallen der Bestrahlung á 30 Sekunden mit jeweils 30 Sekunden Bestrahlungspause zwischen den Intervallen und einer Gesamteinwirkdauer des Gels von 30 Minuten durch den SIROLaser Blue – Diodenlaser (445 nm) katalysiert. Die Gele der Gruppen D, E und F erfuhren nach der Applikation des Gels keine durch den Laser katalysierte Behandlung. Die Gesamteinwirkzeit betrug ebenfalls 30 Minuten. Der Bleicheffekt wurde durch eine spektrophotometrische Farbmessung zwischen laserunterstütztem und klassischem Bleichen ohne Diodenlaser durch den ShadepilotTM festgestellt. Dabei wurde eine Messung sowohl vor als auch nach dem Bleichen durchgeführt. Der erreichte Aufhellungsgrad wurde durch die Differenz dieser Werte als ΔE ermittelt und anschließend wurden die Bleicheffekte einander gegenübergestellt. Für den Zielparameter ΔE ergab die ANOVA in der Hauptanalyse über alle 90 Zähne signifikante Ergebnisse. Die Mittelwerte in der Gruppe mit Laserbehandlung sind signifikant größer als in der Gruppe ohne Laserbehandlung ($F(1, 84) = 144.74$, $p < 0.001 < \text{alpha}^* = 0.0167$). Außerdem zeigen die Ergebnisse signifikante Unterscheide zwischen den Bleaching – Gelen ($F(2, 84) = 5.02$, $p = 0.009 < \text{alpha}^* = 0.0167$). Die Post-hoc-Analyse zeigt, dass dieser Gruppenunterschied allein auf einem Unterschied zwischen den Gelen WHITEsmile grün und WHITEsmile rot beruht. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Behandlungserfolge auch unabhängig von der Laserbehandlung für WHITEsmile rot größer sind als die für WHITEsmile grün.

Zusammenfassend lässt sich formulieren, dass der Diodenlaser mit einer Wellenlänge von 445 nm eine signifikante Wirkung auf die Katalyse von Bleichprozessen besitzt.

7 Literatur

Anagnostaki, E., Mylona, V., Parker, S., Cronshaw, M., & Grootveld, M. (2023). Assessing the Viability of Laser-Activated Dental Bleaching Compared to Conventional In-Office Bleaching Methods: A Systematic Review of Clinical and In Vitro Studies. *Applied Sciences*, *13*(22), 12459. https://doi.org/10.3390/app132212459

Anagnostaki, E., Mylona, V., Parker, S., Lynch, E., & Grootveld, M. (2020). Systematic Review on the Role of Lasers in Endodontic Therapy: Valuable Adjunct Treatment? *Dentistry Journal*, *8*(3), 63. https://doi.org/10.3390/dj8030063

Andersen, R., Loebel, N., Hammond, D., & Wilson, M. (2007). Treatment of periodontal disease by photodisinfection compared to scaling and root planing. *The Journal of Clinical Dentistry*, *18*(2), 34–38.

Asnaashari, M., Sadeghian, A., & Hazrati, P. (2022). The Effect of High-Power Lasers on Root Canal Disinfection: A Systematic Review. *Journal of Lasers in Medical Sciences*, *13*, e66. https://doi.org/10.34172/jlms.2022.66

Attin, T. (2009). Farbkorrekturen durch Bleichverfahren. *Zahnmedizin up2date*, *3*(05), 447–466. https://doi.org/10.1055/s-0029-1185872

Bach, G., & Deppe, H. (2007). *Laserzahnheilkunde: Ein Arbeitsbuch für die tägliche Praxis - vom ersten Interesse bis zur Integration*. Spitta.

Baumann, M. A., & Arnold, M. (Hrsg.). (2008). *Endodontologie: 24 Tabellen* (2., überarb. und erw. Aufl). Thieme.

Belcheva, A., & Shindova, M. (2014). Subjective Acceptance of Pediatric Patients during Cavity Preparation with Er:YAG Laser and Conventional Rotary Instruments. *IMAB*, *20*. https://doi.org/10.5272/jimab.2014205.631

Böcher, S., Wenzler, J.-S., Falk, W., & Braun, A. (2019). Comparison of different laser-based photochemical systems for periodontal treatment. *Photodiagnosis and Photodynamic Therapy*, *27*, 433–439. https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2019.06.009

Braun, A. (2010). Antimikrobielle photodynamische Therapie im Rahmen der Endodontie und Parodontitistherapie. *Zahnmedizin up2date*, *4*(06), 599–611. http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-0030-1250365

Braun, A., Dehn, C., Krause, F., & Jepsen, S. (2008). Short-term clinical effects of adjunctive antimicrobial photodynamic therapy in periodontal treatment: A randomized clinical trial. *Journal of Clinical Periodontology*, *35*(10), 877–884. https://doi.org/10.1111/j.1600-051X.2008.01303.x

Braun, A., Graefen, O., Nolden, R., & Frentzen, M. (2000). Vergleich herkömmlich klinisch diagnostizierter Kariesstadien mit Werten der Laser-Fluoreszenz-Messung. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*, *55*, 248–251.

Braun, A., Kettner, M., Berthold, M., Wenzler, J.-S., Heymann, P. G. B., & Frankenberger, R. (2018). Efficiency of soft tissue incision with a novel 445-nm semiconductor laser. *Lasers in Medical Science*, *33*(1), 27–33. https://doi.org/10.1007/s10103-017-2320-9

Buchalla, W., & Attin, T. (2007). External bleaching therapy with activation by heat, light or laser—A systematic review. *Dental Materials*, *23*(5), 586–596. https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.03.018

Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences* (2nd ed). L. Erlbaum Associates.

Dabanoglu, A., Wood, C., García-Godoy, F., & Kunzelmann, K.-H. (2009). Whitening effect and morphological evaluation of hydroxyapatite materials. *American Journal of Dentistry*, *22*(1).

Demtröder, W. (2000). *Laserspektroskopie*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-08266-9

Dommisch, H., Peus, K., Kneist, S., Krause, F., Braun, A., Hedderich, J., Jepsen, S., & Eberhard, J. (2008). Fluorescence-controlled Er:YAG laser for caries removal in permanent teeth: A randomized clinical trial. *European Journal of Oral Sciences*, *116*(2), 170–176. https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.2008.00521.x

Döring, N., & Bortz, J. (with Pöschl-Günther, S.). (2016). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften* (5. vollständig überarbeitete, aktualisierte und erweiterte Auflage 2016). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41089-5

Dunn, W. J., Murchison, D. F., & Broome, J. C. (1996). Esthetics: Patients' Perceptions of Dental Attractiveness. *Journal of Prosthodontics*, *5*(3), 166–171. https://doi.org/10.1111/j.1532-849X.1996.tb00292.x

Eckert, A. W., Just, L., Wilhelms, D., & Schubert, J. (2012). Odontogene Infektionen – Teil I: Zur Wertigkeit der Erregerbestimmung bei odontogenen Infektionen in der klinischen Routine. *Wiener Medizinische Wochenschrift*, *162*(13–14), 316–320. http://link.springer.com/10.1007/s10354-012-0103-2

Eichler, H. J., & Eichler, J. (2015). *Laser: Bauformen, Strahlführung, Anwendungen*. Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-41438-1

Epple, M., Meyer, F., & Enax, J. (2019). A Critical Review of Modern Concepts for Teeth Whitening. *Dentistry Journal*, *7*(3), 79. https://www.mdpi.com/2304-6767/7/3/79

Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G*Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior Research Methods*, *39*(2), 175–191. https://doi.org/10.3758/BF03193146

Galler, K. M., Grubmüller, V., Schlichting, R., Widbiller, M., Eidt, A., Schuller, C., Wölflick, M., Hiller, K. -A., & Buchalla, W. (2019). Penetration depth of irrigants into root dentine after sonic, ultrasonic and photoacoustic activation. *International Endodontic Journal*, *52*(8), 1210–1217. https://doi.org/10.1111/iej.13108

Gängler, P., & Arnold, W. H. (Hrsg.). (2010). *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie: 66 Tabellen* (3., unveränd. Aufl). Thieme.

Gerabek, W. E. (2005). *Enzyklopädie Medizingeschichte*. Walter de Gruyter.

Gerlach, R. W., & Zhou, X. (2001). Vital bleaching with whitening strips: Summary of clinical research on effectiveness and tolerability. *The Journal of Contemporary Dental Practice*, *2*(3), 1–16.

Giesemann, C. (2003). *Entwicklung und Einsatz eines Diodenlaserspektrometers zum quantitativen In-situ-Nachweis von Methan und Wasser in der Stratosphäre*. Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg.

Glockner, K., & Ebeleseder, K. A. (1993). *Indikation und Grenzfälle für das Bleichen von devitalen verfärbten Zähnen*.

Gutknecht, N. (2015). Standortbestimmung der Laser-Technik in der Zahnheilkunde. *Der Freie Zahnarzt*, *59*(6), 78–82. https://www.springermedizin.de/doi/10.1007/s12614-015-5447-8

Haywood, V. B. (1997). NIGHTGUARD VITAL BLEACHING: CURRENT CONCEPTS AND RESEARCH. *The Journal of the American Dental Association*, *128*, 19S-25S. https://doi.org/10.14219/jada.archive.1997.0416

He, L.-B., Shao, M.-Y., Tan, K., Xu, X., & Li, J.-Y. (2012). The effects of light on bleaching and tooth sensitivity during in-office vital bleaching: A systematic review and meta-analysis. *Journal of Dentistry*, *40*(8), 644–653.

Hein, D. K., Ploeger, B. J., Hartup, J. K., Wagstaff, R. S., Palmer, T. M., & Hansen, L. D. (2003). In-office vital tooth bleaching—What do lights add? *Compendium of Continuing Education in Dentistry (Jamesburg, N.J.: 1995)*, *24*(4A), 340–352.

Hellwig, E., Schäfer, E., Klimek, J., & Attin, T. (2018). *Einführung in die Zahnerhaltung: Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie: mit 235 Abbildungen in ca. 300 Einzeldarstellungen und 68 Tabellen* (7. überarbeitete Auflage). Deutscher Zahnärzte Verlag.

Herrera, D., Alonso, B., León, R., Roldán, S., & Sanz, M. (2008). Antimicrobial therapy in periodontitis: The use of systemic antimicrobials against the subgingival biofilm. *Journal of Clinical Periodontology*, *35*(s8), 45–66. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-051X.2008.01260.x

Herrera, D., Sanz, M., Jepsen, S., Needleman, I., & Roldán, S. (2002). A systematic review on the effect of systemic antimicrobials as an adjunct to scaling and root planing in periodontitis patients. *Journal of Clinical Periodontology*, *29*(s3), 136–159. doi/10.1034/j.1600-051X.29.s3.8.x

Hosseinpour, S., Fekrazad, R., Arany, P. R., & Ye, Q. (2019). Molecular impacts of photobiomodulation on bone regeneration: A systematic review. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, *149*, 147–159. https://doi.org/10.1016/j.pbiomolbio.2019.04.005

Hülsmann, M. (2008). *Endodontie*. Thieme.

Jacker-Guhr, S. (2015). Heller, schöner, weißer!: Internes und externes Bleichen. *der junge zahnarzt*, *6*(3), 8–14. https://doi.org/10.1007/s13279-015-5156-3

Jiang, S., Zou, T., Li, D., Chang, J. W. W., Huang, X., & Zhang, C. (2016). Effectiveness of Sonic, Ultrasonic, and Photon-Induced Photoacoustic Streaming Activation of NaOCl on Filling Material Removal Following Retreatment in Oval Canal Anatomy. *Photomedicine and Laser Surgery*, *34*(1), 3–10. https://doi.org/10.1089/pho.2015.3937

Keller, U., Hibst, R., Geurtsen, W., Schilke, R., Heidemann, D., Klaiber, B., & Raab, W. H. M. (1998). Erbium:YAG laser application in caries therapy. Evaluation of patient perception and acceptance. *Journal of Dentistry*, *26*(8), 649–656. https://doi.org/10.1016/S0300-5712(97)00036-5

Kielbassa, A., & Wrbas, K.-T. (2000). *Extrinsische und intrinsische Zahnverfärbungen. Teil 1: Ursachen*.

Kihn, P. W. (2007). Vital Tooth Whitening. *Dental Clinics of North America*, *51*(2), 319–331. https://doi.org/10.1016/j.cden.2006.12.001

Knaup, T., Korbmacher-Steiner, H., Braun, A., Wenzler, J.-S., Knaup, I., & Stein, S. (2020). Effects of 445-nm Diode Laser-Assisted Debonding of Metallic Brackets on Shear Bond Strength and Enamel Surface Morphology. *Photobiomodulation, Photomedicine, and Laser Surgery*, *38*(3), 160–166. https://doi.org/10.1089/photob.2019.4704

Kneubühl, F. K., & Sigrist, M. W. (2005). *Laser*. Vieweg+Teubner Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-322-99688-6

Konopka, K., & Goslinski, T. (2007). Photodynamic Therapy in Dentistry. *Journal of Dental Research*, *86*(8), 694–707. http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/154405910708600803

Kouros, P., Dionysopoulos, D., Deligianni, A., Strakas, D., Sfeikos, T., & Tolidis, K. (2020). Evaluation of photopolymerization efficacy and temperature rise of a composite resin using a blue diode laser (445 nm). *European Journal of Oral Sciences*, *128*(6), 535–541. https://doi.org/10.1111/eos.12742

Lima, F. G., Rotta, T. A., Penso, S., Meireles, S. S., & Demarco, F. F. (2012). In vitro evaluation of the whitening effect of mouth rinses containing hydrogen peroxide. *Brazilian Oral Research*, *26*(3), 269–274. https://doi.org/10.1590/S1806-83242012000300014

Liu, J.-F., Lai, Y.-L., Shu, W.-Y., & Lee, S.-Y. (2006). Acceptance and efficiency of Er:YAG laser for cavity preparation in children. *Photomedicine and Laser Surgery*, *24*(4), 489–493.

Lloyd, A., Uhles, J. P., Clement, D. J., & Garcia-Godoy, F. (2014). Elimination of intracanal tissue and debris through a novel laser-activated system assessed using high-resolution micro-computed tomography: A pilot study. *Journal of Endodontics*, *40*(4), 584–587. https://doi.org/10.1016/j.joen.2013.10.040

Lo Giudice, R., Pantaleo, G., Lizio, A., Romeo, U., Castiello, G., Spagnuolo, G., & Giudice, G. L. (2016). Clinical and Spectrophotometric Evaluation of LED and Laser Activated Teeth Bleaching. *The Open Dentistry Journal*, *10*(1), 242–250. https://doi.org/10.2174/1874210601610010242

López, N. J., Socransky, S. S., Da Silva, I., Japlit, M. R., & Haffajee, A. D. (2006). Effects of metronidazole plus amoxicillin as the only therapy on the microbiological and clinical parameters of untreated chronic periodontitis. *Journal of Clinical Periodontology*, *33*(9), 648–660. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1600-051X.2006.00957.x

Low, S. B., & Mott, A. (2014). Laser Technology to Manage Periodontal Disease: A Valid Concept? *Journal of Evidence Based Dental Practice*, *14*, 154–159. https://doi.org/10.1016/j.jebdp.2014.03.010

Lüllmann-Rauch, R. (Hrsg.). (2015). *Taschenlehrbuch Histologie* (5. Aufl., S. b-003-124637). Georg Thieme Verlag. https://doi.org/10.1055/b-003-124637

Lussi, A., Megert, B., Longbottom, C., Reich, E., & Francescut, P. (2001). Clinical performance of a laser fluorescence device for detection of occlusal caries lesions. *European Journal of Oral Sciences*, *109*(1), 14–19.

Manuel, S. T., Abhishek, P., & Kundabala, M. (2010). Etiology of tooth discoloration- a review. *Nigerian Dental Journal*, *18*(2), 56–63. https://doi.org/10.61172/ndj.v18i2.143

Mettraux, G. (2004). Grundlagen der Lasertherapie in der Zahnmedizin. *Schweiz Monatsschr Zahnmed*, *114*, 7.

Möbius, D., Braun, A., & Franzen, R. (2024). Evaluation of tooth color change after a bleaching process with different lasers. *Odontology*, *112*(3), 872–883. https://doi.org/10.1007/s10266-023-00886-x

Moghtader, D. (2014). Pro und Kontra der Lasertherapie in der Zahnmedizin. *LASER JOURNAL*, *1*, 20–21.

Oosterink, F. M. D., de Jongh, A., & Aartman, I. H. A. (2008). What are people afraid of during dental treatment? Anxiety-provoking capacity of 67 stimuli characteristic of the dental setting. *European Journal of Oral Sciences*, *116*(1), 44–51.

Papadopoulou, A., Dionysopoulos, D., Strakas, D., Kouros, P., Kolokitha, O.-E., & Tolidis, K. (2023). Temperature changes in the pulp chamber and bleaching gel during tooth bleaching assisted by diode laser (445 nm) using different power settings. *Lasers in Medical Science*, *38*(1), 209. https://doi.org/10.1007/s10103-023-03863-6

Papadopoulou, A., Dionysopoulos, D., Strakas, D., Kouros, P., Vamvakoudi, E., Tsetseli, P., Kolokitha, O.-E., & Tolidis, K. (2024). Exploring the efficacy of laser-assisted in-office tooth bleaching: A study on varied irradiation times and power settings utilizing a diode laser (445 nm). *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, *257*, 112970. https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2024.112970

Peskersoy, C., Tetik, A., Ozturk, V. O., & Gokay, N. (2014). Spectrophotometric and computerized evaluation of tooth bleaching employing 10 different home-bleaching procedures: In-vitro study. *European Journal of Dentistry*, *08*(04), 538–545. https://doi.org/10.4103/1305-7456.143639

Pflüger, M. (2014). *Entwicklung eines robusten Verfahrens zur Farbbestimmung von Zähnen auf Basis spektraler Daten*. Fraunhofer-Verl.

Plotino, G., Grande, N. M., & Mercade, M. (2019). Photodynamic therapy in endodontics. *International Endodontic Journal*, *52*(6), 760–774. https://doi.org/10.1111/iej.13057

Polydorou, O. (2023). Zahnaufhellung – aktuelle Entwicklungen. *Zahnmedizin up2date*, *17*(01), 33–45. https://doi.org/10.1055/a-1919-0475

Ramos, T. M., Ramos-Oliveira, T. M., de Freitas, P. M., Azambuja, N., Esteves-Oliveira, M., Gutknecht, N., & de Paula Eduardo, C. (2015). Effects of Er:YAG and Er,Cr:YSGG laser irradiation on the adhesion to eroded dentin. *Lasers in Medical Science*, *30*(1), 17–26.

Rathod, A., Jaiswal, P., Bajaj, P., Kale, B., & Masurkar, D. (2022). Implementation of Low-Level Laser Therapy in Dentistry: A Review. *Cureus*, *14*(9), e28799. https://doi.org/10.7759/cureus.28799

Rodríguez-Martínez, J., Valiente, M., & Sánchez-Martín, M. (2019). Tooth whitening: From the established treatments to novel approaches to prevent side effects. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, *31*(5), 431–440. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jerd.12519

Saberi, S., Shahabi, S., Tohidkhah, S., Jafarnia, S., & Pedram, P. (2021). The effect of laser-activated bleaching with 445 nm and 970 nm diode lasers on pulp chamber temperature rise: An in vitro study. *Laser Physics*, *31*(5), 055601. https://doi.org/10.1088/1555-6611/abece0

Sader, R., & Frankenberger, R. (2017). Zahnmedizin im Spannungsfeld zwischen Ästhetik und Kosmetik. *Zahnärztliche Mitteilungen*, *18*, 16–17.

Schmidseder, J., & Allen, E. P. (Hrsg.). (2009). *Ästhetische Zahnmedizin: 49 Tabellen* (2., vollständig überarb. und erw. Aufl). Thieme.

Seifert, J. T. (2022). *Keimreduktion bei der endodontischen Behandlung mit einem neuartigen 445 nm Diodenlaser*. RWTH Aachen.

Shahabi, S., Tabatabaeian, A., Solimei, L., Benedicenti, S., & Saberi, S. (2024). Effect of laser-activated bleaching with 445, 915, and 970nm diode lasers on enamel color change: An *in vitro* study. *Laser Therapy*, *31*(1). https://doi.org/10.4081/ltj.2024.391

Sjögren, U., Figdor, D., Persson, S., & Sundqvist, G. (1997). Influence of infection at the time of root filling on the outcome of endodontic treatment of teeth with apical periodontitis. *International Endodontic Journal*, *30*(5), 297–306. https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1046/j.1365-2591.1997.00092.x

Sobral, M. C., Crusoé-Rebello, I. M., & Machado, A. W. (2019). Does the presence of maxillary central incisor edge asymmetry influence the perception of dentofacial esthetics in video analysis? *The Angle Orthodontist*, *89*(5), Article 5. https://doi.org/10.2319/080118-556.1

Stein, S., Hellak, A., Schauseil, M., Korbmacher-Steiner, H., & Braun, A. (2018). Effects of 445-nm Diode Laser-Assisted Debonding of Self-Ligating Ceramic Brackets on Shear Bond Strength. *Photomedicine and Laser Surgery*, *36*(1), 31–36. https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/pho.2017.4314

Usta, S. N., Erdem, B. A., & Gündoğar, M. (2024). Comparison of the removal of intracanal medicaments used in regenerative endodontics from root canal system using needle, ultrasonic, sonic, and laser-activated irrigation systems. *Lasers in Medical Science*, *39*(1), 27. https://doi.org/10.1007/s10103-024-03980-w

Vanhee, T., Mourali, S., Bottenberg, P., Jacquet, W., & Vanden Abbeele, A. (2020). Stimuli involved in dental anxiety: What are patients afraid of?: A descriptive study. *International Journal of Paediatric Dentistry*, *30*(3), 276–285.

Watts, A., & Addy, M. (2001). Tooth discolouration and staining: A review of the literature. *British Dental Journal*, *190*(6), 309–316. https://doi.org/10.1038/sj.bdj.4800959

Willershausen, B., Kurth, P., & Schattenberg, A. (2009). Bleichmöglichkeiten und entsprechende Effekte auf die Zahnhartsubstanz. *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*, *118*(03), 86–96. http://www.thieme-connect.de/DOI/DOI?10.1055/s-0029-1216333

Zantner, C., Beheim-Schwarzbach, N., Neumann, K., & Kielbassa, A. M. (2007). Surface microhardness of enamel after different home bleaching procedures. *Dental Materials*, *23*(2), 243–250. https://doi.org/10.1016/j.dental.2006.06.044

Zantner, C., & Kielbassa, A. M. (2004). In-Office-Bleaching—Abgrenzung zu alternativen Therapieverfahren. *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*, *113*(5), 207–215. https://doi.org/10.1055/s-2004-828628

8 Anhang

Tabelle 11: Ergebnistabelle SLB mit WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel (rot)

Farbe vor dem Bleichen			Farbe nach dem Bleichen			Differenz in ΔE		
Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal
L: 55.9 a: 1.8 b: 8.6	L: 61.1 a: 0.3 b: 12.0	L: 58.7 a: -0.2 b: 12.3	L: 58.8 a: 2.6 b: 9.1	L: 63.8 a: 0.7 b: 10.8	L: 62.3 a: 0.4 b: 11.1	L: 2.8 a: 0.8 b: 0.6 **ΔE:3.0**	L: 2.7 a: 0.4 b: -1.2 **ΔE:3**	L: 3.7 a: 0.5 b: -1.3 **ΔE:3.9**
L: 60.9 a: 1.4 b: 12.6	L: 64.4 a: 1.3 b: 15.2	L: 61.1 a: 0.9 b: 12.4	L: 63.3 a: 2.8 b: 13.3	L: 65.5 a: 2.7 b: 18.3	L: 64.3 a: 2.7 b: 14.0	L: 2.3 a: 1.3 b: 0.7 **ΔE:2.8**	L: 1.0 a: 1.4 b: 3.1 **ΔE:3.5**	L: 3.2 a: 1.8 b: 1.7 **ΔE:4.0**
L: 52.4 a: 6.1 b: 13.8	L: 57.8 a: 7.1 b: 23.3	L: 56.7 a: 5.4 b: 24.7	L: 55.5 a: 7.3 b: 15.3	L: 61.6 a: 7.0 b: 20.3	L: 62.1 a: 4.6 b: 21.0	L: 3.1 a: 1.2 b: 1.5 **ΔE:3.7**	L: 3.8 a: -0.1 b: -3.0 **ΔE:4.8**	L: 5.4 a: -0.8 b: -3.7 **ΔE:6.6**
L: 59.0 a: 2.0 b: 12.0	L: 62.9 a: 2.2 b: 15.5	L: 52.8 a: 2.6 b: 15.5	L: 63.9 a: 3.5 b: 12.0	L: 66.5 a: 3.4 b: 15.1	L: 61.0 a: 3.4 b: 17.2	L: 4.8 a: 1.5 b: -0.0 **ΔE:5.0**	L: 4.6 a: 1.2 b: -0.3 **ΔE:4.8**	L: 8.2 a: 0.8 b: 1.7 **ΔE:8.4**
L: 60.0 a: 2.2 b: 11.5	L: 62.7 a: 1.4 b: 15.7	L: 62.7 a: 0.1 b: 14.7	L: 63.2 a: 4.3 b: 13.9	L: 66.0 a: 2.6 b: 15.6	L: 65.2 a: 1.8 b: 14.8	L: 3.2 a: 2.0 b: 2.3 **ΔE:4.5**	L: 3.3 a: 1.2 b: -0.1 **ΔE:3.5**	L: 2.5 a: 1.7 b: 0.1 **ΔE:3.0**
L: 54.1 a: 3.3 b: 8.1	L: 53.1 a: 7.5 b: 23.1	L: 55.3 a: 4.0 b: 14.0	L: 55.0 a: 6.4 b: 11.3	L: 57.3 a: 8.2 b: 21.1	L: 59.9 a: 4.8 b: 12.5	L: 0.9 a: 3.1 b: 3.2 **ΔE:4.6**	L: 4.2 a: 0.7 b: -2.0 **ΔE:4.7**	L: 4.5 a: 0.8 b: -1.5 **ΔE:4.8**
L: 52.0 a: 1.1 b: 11.4	L: 53.0 a: 2.1 b: 15.0	L: 46.1 a: 2.9 b: 15.1	L: 56.5 a: 2.2 b: 13.6	L: 58.2 a: 2.1 b: 15.6	L: 51.9 a: 2.7 b: 16.4	L: 4.4 a: 1.1 b: 2.2 **ΔE:5.1**	L: 5.2 a: 0.1 b: 0.6 **ΔE:5.2**	L: 5.8 a: -0.2 b: 1.3 **ΔE:5.9**
L: 57.0 a: 3.1 b: 12.4	L: 60.7 a: 2.5 b: 13.5	L: 60.4 a: 2.4 b: 12.7	L: 60.3 a: 5.3 b: 12.9	L: 64.1 a: 2.7 b: 11.5	L: 63.7 a: 2.7 b: 11.0	L: 3.3 a: 2.1 b: 0.5 **ΔE:4.0**	L: 3.3 a: 0.2 b: -2.0 **ΔE:3.9**	L: 3.3 a: 0.3 b: -1.7 **ΔE:3.7**
L: 59.1 a: 0.8 b: 9.1	L: 67.1 a: 0.8 b: 18.0	L: 62.2 a: 1.4 b: 14.1	L: 63.4 a: 3.0 b: 11.6	L: 72.1 a: 1.4 b: 15.7	L: 67.8 a: 2.6 b: 14.0	L: 4.3 a: 2.2 b: 2.5 **ΔE:5.5**	L: 5.1 a: 0.6 b: -2.4 **ΔE:5.6**	L: 5.7 a: 1.2 b: -0.1 **ΔE:5.8**

L: 53.7 a: 1.4 b: 7.6	L: 60.2 a: 1.8 b: 15.8	L: 65.8 a: -0.7 b: 17.0	L: 54.8 a: 4.1 b: 10.6	L: 64.1 a: 3.0 b: 15.2	L: 70.1 a: 0.1 b: 16.8	L: 1.1 a: 2.7 b: 3.0 **ΔE:4.2**	L: 3.9 a: 1.2 b: -0.6 **ΔE:4.1**	L: 4.4 a: 0.8 b: -0.2 **ΔE:4.5**
L: 64.1 a: -0.8 b: 4.6	L: 63.2 a: 0.1 b: 11.5	L: 62.4 a: -0.4 b: 8.6	L: 68.0 a: 1.3 b: 8.3	L: 68.2 a: 1.5 b: 12.8	L: 65.9 a: 1.2 b: 11.8	L: 3.9 a: 2.1 b: 3.6 **ΔE:5.8**	L: 5.1 a: 1.4 b: 1.3 **ΔE:5.4**	L: 3.5 a: 1.7 b: 3.2 **ΔE:5.0**
L: 55.3 a: 1.0 b: 4.8	L: 59.0 a: 0.0 b: 4.6	L: 58.5 a: 0.3 b: 4.8	L: 60.0 a: 2.9 b: 6.9	L: 64.0 a: 1.4 b: 5.5	L: 64.4 a: 1.1 b: 4.9	L: 4.6 a: 1.9 b: 2.1 **ΔE:5.5**	L: 5.0 a: 1.4 b: 0.9 **ΔE:5.3**	L: 5.9 a: 0.8 b: 0.1 **ΔE:6.0**
L: 66.0 a: -1.5 b: 5.6	L: 67.6 a: -1.7 b: 6.7	L: 68.5 a: -1.4 b: 12.2	L: 70.8 a: 0.2 b: 8.2	L: 73.5 a: -0.3 b: 7.3	L: 73.5 a: -0.3 b: 11.0	L: 4.7 a: 1.7 b: 2.6 **ΔE:5.7**	L: 5.9 a: 1.5 b: 0.6 **ΔE:6.1**	L: 5.0 a: 1.2 b:- 1.2 **ΔE:5.3**
L: 62.0 a: 1.0 b: 8.6	L: 59.7 a: -1.0 b: 10.2	L: 56.1 a: -1.3 b: 8.2	L: 68.1 a: 1.3 b: 10.9	L: 65.8 a: -0.4 b: 9.3	L: 61.7 a: -0.6 b: 8.2	L: 6.1 a: 0.3 b: 2.4 **ΔE:6.6**	L: 6.1 a: 0.6 b: -0.9 **ΔE:6.2**	L: 5.6 a: 0.7 b: 0.0 **ΔE:5.7**
L: 55.5 a: 1.0 b: 8.3	L: 57.2 a: 0.8 b: 15.4	L: 56.4 a: 2.2 b: 19.6	L: 58.3 a: 3.2 b: 12.2	L: 61.3 a: 2.0 b: 17.9	L: 62.1 a: 2.3 b: 19.3	L: 2.8 a: 2.2 b: 3.9 **ΔE:5.3**	L: 4.0 a: 1.2 b: 2.5 **ΔE:4.9**	L: 5.7 a: 0.1 b: -0.2 **ΔE:5.7**

Tabelle 12: Ergebnistabelle SLB mit WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel (grün)

Farbe vor dem Bleichen			Farbe nach dem Bleichen			Differenz in ΔE		
Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal
L: 60.8 a: 1.6 b: 12.7	L: 66.3 a: 0.8 b: 15.2	L: 74.9 a: -1.1 b: 15.6	L: 69.5 a: 1.5 b: 15.3	L: 71.1 a: 1.4 b: 17.6	L: 78.2 a: 0.1 b: 17.3	L: 8.7 a: -0.1 b: 2.5 **ΔE:9.1**	L: 4.8 a: 0.6 b: 2.4 **ΔE:5.4**	L: 3.3 a: 1.2 b: 1.7 **ΔE:3.8**
L: 63.0 a: 3.0 b: 14.3	L: 70.5 a: 0.9 b: 14.2	L: 73.5 a: -0.1 b: 17.7	L: 54.7 a: 2.0 b: 10.9	L: 62.9 a: -1.1 b: 14.4	L: 73.1 a: -1.5 b: 11.8	L: -8.3 a: -1.0 b: -3.5 **ΔE:9.1**	L: -7.7 a: -2.0 b: 0.2 **ΔE:7.9**	L: -0.4 a: -1.4 b: -5.8 **ΔE:6.0**
L: 69.3 a: 0.3 b: 11.7	L: 70.9 a: 1.0 b: 19.4	L: 75.2 a: 0.6 b: 22.7	L: 68.8 a: 0.9 b: 14.6	L: 70.6 a: 0.3 b: 22.4	L: 78.5 a: 0.0 b: 24.9	L: -0.5 a: 0.6 b: 2.9 **ΔE:3.0**	L: -0.3 a: -0.6 b: 3.0 **ΔE:3.1**	L: 3.3 a: -0.6 b: 2.2 **ΔE:4.0**
L: 71.0 a: -1.2 b: 10.9	L: 73.8 a: -0.2 b: 13.8	L: 77.8 a: -0.1 b: 20.6	L: 70.6 a: -0.4 b: 12.8	L: 73.7 a: 0.5 b: 11.7	L: 80.3 a: -0.1 b: 21.1	L: -0.4 a: 0.7 b: 1.9 **ΔE:2.1**	L: -0.1 a: 0.8 b: -2.1 **ΔE:2.3**	L: 2.5 a: -0.0 b: 0.5 **ΔE:2.5**
L: 67.3 a: -1.3 b: 8.1	L: 73.4 a: -1.1 b: 10.2	L: 77.7 a: -1.7 b: 12.6	L: 70.1 a: -1.0 b: 7.7	L: 75.9 a: -1.0 b: 10.1	L: 79.7 a: -1.5 b: 11.5	L: 2.8 a: 0.3 b: -0.5 **ΔE:2.8**	L: 2.6 a: 0.1 b: -0.1 **ΔE:2.6**	L: 2.1 a: 0.2 b: -1.1 **ΔE:2.3**
L: 59.6 a: 1.3 b: 7.4	L: 65.1 a: -0.8 b: 9.1	L: 59.3 a: 0.5 b: 16.0	L: 62.6 a: 1.7 b: 7.6	L: 67.6 a: 0.0 b: 9.4	L: 63.6 a: 0.6 b: 14.3	L: 3.0 a: 0.3 b: 0.2 **ΔE:3.0**	L: 2.5 a: 0.8 b: 0.3 **ΔE:2.6**	L: 4.4 a: 0.1 b: -1.7 **ΔE:4.7**
L: 60.2 a: 0.5 b: 6.7	L: 63.8 a: 0.1 b: 12.3	L: 62.9 a: -0.1 b: 12.6	L: 62.0 a: 1.3 b: 8.7	L: 65.6 a: 0.5 b: 10.5	L: 64.6 a: -0.5 b: 11.0	L: 1.8 a: 0.8 b: 2.0 **ΔE:2.8**	L: 1.8 a: 0.4 b: -1.8 **ΔE:2.6**	L: 1.7 a: -0.4 b: -1.6 **ΔE:2.4**
L: 66.2 a: 2.1 b: 10.5	L: 65.1 a: 1.6 b: 13.7	L: 65.8 a: 1.4 b: 14.4	L: 65.3 a: 3.0 b: 12.0	L: 65.1 a: 1.8 b:1 5.3	L: 67.3 a: 1.5 b: 13.8	L: -0.9 a: 0.8 b: 1.5 **ΔE:1.9**	L: -0.0 a: 0.2 b: 1.5 **ΔE:1.6**	L: 1.5 a: 0.1 b: -0.6 **ΔE:1.6**
L: 61.6 a: 3.1 b: 15.8	L: 63.4 a: 2.0 b: 12.9	L: 65.7 a: 0.5 b: 14.6	L: 64.0 a: 4.7 b: 18.4	L: 66.7 a: 2.7 b: 13.2	L: 68.4 a: 0.8 b: 15.1	L: 2.4 a: 1.5 b: 2.6 **ΔE:3.8**	L: 3.3 a: 0.7 b: 0.4 **ΔE:3.4**	L: 2.7 a: 0.3 b: 0.5 **ΔE:2.8**
L: 59.8 a: 1.9 b: 13.5	L: 65.3 a: 1.6 b: 18.9	L: 69.2 a: 1.8 b: 23.6	L: 62.2 a: 3.0 b: 15.9	L: 67.9 a: 2.1 b: 17.5	L: 72.2 a: 1.5 b: 22.3	L: 2.4 a: 1.1 b: 2.4 **ΔE:3.5**	L: 2.6 a: 0.5 b: -1.4 **ΔE:3.0**	L: 3.0 a: -0.3 b: -1.3 **ΔE:3.3**

L: 59.3 a: 1.3 b: 9.4	L: 60.8 a: 13.8 b: 84.8	L: 62.3 a: 0.9 b: 8.7	L: 61.8 a: 1.6 b: 9.9	L: 63.1 a: 13.3 b: 83.7	L: 64.2 a: 1.0 b: 10.7	L: 2.5 a: 0.4 b: 0.5 **ΔE:2.6**	L: 2.3 a: -0.5 b: -0.3 **ΔE:2.4**	L: 1.9 a: 0.1 b: 2.0 **ΔE:2.7**
L: 54.1 a: 2.5 b: 7.5	L: 64.1 a: -0.1 b: 14.7	L: 65.2 a: -0.8 b: 14.8	L: 56.1 a: 3.2 b: 9.4	L: 65.8 a: 0.4 b: 15.9	L: 67.3 a: -1.2 b: 14.9	L: 2.0 a: 0.7 b: 1.9 **ΔE:2.8**	L: 1.7 a: 0.5 b: 1.2 **ΔE:2.2**	L: 2.1 a: -0.3 b: 0.1 **ΔE:2.2**
L: 64.4 a: 3.2 b: 14.2	L: 62.8 a: 3.2 b: 20.2	L: 63.8 a: 3.0 b: 19.9	L: 67.3 a: 2.8 b: 15.1	L: 65.5 a: 4.2 b: 20.8	L: 66.8 a: 4.3 b: 21.4	L: 2.9 a: -0.4 b: 0.9 **ΔE:3.1**	L: 2.6 a: 1.0 b: 0.6 **ΔE:2.9**	L: 3.0 a: 1.3 b: 1.4 **ΔE:3.6**
L: 57.9 a: 1.8 b: 10.8	L: 61.2 a: 0.7 b: 12.0	L: 60.7 a: 0.3 b: 11.6	L: 61.8 a: 1.9 b: 12.0	L: 64.0 a: 1.6 b: 12.7	L: 63.3 a: 0.9 b: 11.6	L: 3.9 a: 0.2 b: 1.1 **ΔE:4.1**	L: 2.9 a: 0.9 b: 0.6 **ΔE:3.1**	L: 2.6 a: 0.5 b: -0.0 **ΔE:2.7**
L: 60.6 a: 1.3 b: 12.1	L: 63.1 a: -0.6 b: 8.4	L: 68.4 a: -0.5 b: 9.2	L: 65.8 a: 1.6 b: 14.3	L: 66.6 a: -0.2 b: 11.0	L: 72.0 a: -0.9 b: 10.7	L: 5.3 a: 0.2 b: 2.2 **ΔE:5.7**	L: 3.5 a: 0.5 b: 2.6 **ΔE:4.4**	L: 3.6 a: -0.4 b: 1.4 **ΔE:3.9**

Tabelle 13: Ergebnistabelle SLB mit JW Power Bleaching Next (rot)

Farbe vor dem Bleichen			Farbe nach dem Bleichen			Differenz in ΔE		
Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal
L: 60.2 a: 3.4 b: 14.5	L: 67.1 a: 2.8 b: 20.2	L: 73.2 a: 1.9 b: 22.9	L: 62.5 a: 4.5 b: 13.1	L: 69.8 a: 4.0 b: 20.0	L: 75.8 a: 3.3 b: 22.9	L: 2.2 a: 1.2 b: -1.4 **ΔE:2.9**	L: 2.8 a: 1.3 b: -0.2 **ΔE:3.0**	L: 2.6 a: 1.4 b: 0.0 **ΔE:3.0**
L: 66.7 a: -0.6 b: 13.2	L: 63.6 a: -0.2 b: 15.3	L: 53.5 a: -0.1 b: 13.9	L: 72.7 a: 0.6 b: 11.7	L: 73.0 a: -0.2 b: 13.9	L: 59.4 a: -0.5 b: 14.0	L: 5.5 a: 1.2 b: -1.5 **ΔE:5.8**	L: 9.3 a: 0.0 b: -1.4 **ΔE:9.4**	L: 5.9 a: -0.3 b: 0.0 **ΔE:5.9**
L: 59.0 a: 3.5 b: 14.7	L: 69.0 a: 1.7 b: 15.1	L: 75.5 a: 0.4 b: 19.1	L: 63.5 a: 3.9 b: 16.5	L: 72.6 a: 1.8 b: 15.0	L: 78.1 a: 1.0 b: 18.6	L: 4.5 a: 0.3 b: 1.8 **ΔE:4.9**	L: 3.6 a: 0.1 b: -0.2 **ΔE:3.6**	L: 2.6 a: 0.7 b: -0.5 **ΔE:2.7**
L: 69.3 a: -1.0 b: 12.7	L: 75.0 a: 0.1 b: 19.7	L: 77.6 a: -1.2 b: 24.0	L: 67.2 a: -0.0 b: 11.6	L: 75.3 a: -2.3 b: 24.6	L: 80.5 a: -0.8 b: 24.2	L: -2.1 a: 0.9 b: -1.1 **ΔE:2.6**	L: 0.3 a: -2.4 b: 4.9 **ΔE:5.5**	L: 2.9 a: 0.3 b: 0.2 **ΔE:2.9**
L: 68.8 a: -1.0 b: 13.1	L: 72.3 a: -0.0 b: 13.9	L: 77.7 a: -1.6 b: 17.3	L: 73.0 a: -0.1 b: 12.6	L: 76.0 a: 0.1 b: 12.5	L: 80.9 a: -0.9 b: 17.8	L: 4.2 a: 0.9 b: -0.5 **ΔE:4.3**	L: 3.7 a: 0.1 b: -1.5 **ΔE:4.0**	L: 3.2 a: 0.7 b: 0.6 **ΔE:3.3**
L: 57.4 a: 2.3 b: 12.6	L: 64.6 a: -0.6 b: 16.4	L: 62.5 a:- 0.2 b: 15.9	L: 59.4 a: 3.8 b: 13.0	L: 67.1 a: 0.8 b: 14.7	L: 66.4 a: 0.8 b: 14.3	L: 2.0 a: 1.5 b: 0.4 **ΔE:2.5**	L: 2.5 a: 1.4 b: -1.6 **ΔE:3.3**	L: 4.0 a: 1.0 b: -1.5 **ΔE:4.4**
L: 67.9 a: -0.9 b: 4.9	L: 68.0 a: -0.2 b: 14.7	L: 67.7 a: -1.2 b: 10.2	L: 68.6 a: 1.7 b: 8.8	L: 71.6 a: 1.9 b: 16.2	L: 71.3 a: 1.1 b: 12.4	L: 0.7 a: 2.6 b: 3.9 **ΔE:4.8**	L: 3.6 a: 2.0 b: 1.5 **ΔE:4.4**	L: 3.5 a: 2.3 b: 2.2 **ΔE:4.7**
L: 60.8 a: 1.4 b: 11.2	L: 72.1 a: 1.3 b: 19.6	L: 64.5 a: 2.4 b: 18.9	L: 58.9 a: 3.6 b: 12.3	L: 72.7 a: 2.3 b: 17.1	L: 62.9 a: 4.2 b: 20.8	L: -1.9 a: 2.2 b: 1.1 **ΔE:3.1**	L: 0.6 a: 1.0 b: -2.6 **ΔE:2.8**	L: -1.5 a: 1.7 b: 2.0 **ΔE:3.0**
L: 59.0 a: 0.6 b: 10.8	L: 57.4 a: 0.9 b: 12.2	L: 61.2 a: 1.3 b: 17.8	L: 60.4 a: 2.8 b: 11.7	L: 59.8 a: 3.0 b: 12.9	L: 63.7 a: 2.5 b: 19.2	L: 1.4 a: 2.2 b: 0.9 **ΔE:2.8**	L: 2.4 a: 2.1 b: 0.7 **ΔE:3.2**	L: 2.5 a: 1.2 b: 1.3 **ΔE:3.1**
L: 56.4 a: 0.7 b: 9.7	L: 58.3 a: 0.2 b: 10.6	L: 57.4 a: -1.2 b: 5.7	L: 59.6 a: 1.6 b: 10.9	L: 60.9 a: 0.9 b: 9.5	L: 59.9 a: 0.5 b: 7.9	L: 3.2 a: 0.9 b: 1.3 **ΔE:3.6**	L: 2.7 a: 0.7 b: -1.1 **ΔE:3.0**	L: 2.4 a: 1.7 b: 2.2 **ΔE:3.7**

L: 65.8 a: 2.1 b: 11.5	L: 68.1 a: 1.6 b: 13.2	L: 67.6 a: 1.1 b: 15.9	L: 67.1 a: 4.6 b: 12.1	L: 69.9 a: 3.1 b: 14.3	L: 70.8 a: 1.8 b: 15.1	L: 1.3 a: 2.5 b: 0.6 **ΔE:2.9**	L: 1.8 a: 1.5 b: 1.1 **ΔE:2.6**	L: 3.2 a: 0.8 b: -0.8 **ΔE:3.4**
L: 57.8 a: 1.2 b: 8.3	L: 59.1 a: 0.5 b: 10.0	L: 64.2 a: 0.1 b: 20.3	L: 61.1 a: 2.1 b: 9.8	L: 62.3 a: 1.7 b: 10.5	L: 66.0 a: 1.6 b: 18.3	L: 3.3 a: 0.9 b: 1.5 **ΔE:3.7**	L: 3.2 a: 1.2 b: 0.5 **ΔE:3.5**	L: 1.8 a: 1.5 b: -2.1 **ΔE:3.1**
L: 58.6 a: 0.6 b: 8.0	L: 60.8 a: 0.2 b: 9.3	L: 56.8 a: 0.5 b: 8.3	L: 61.9 a: 1.8 b: 8.6	L: 64.6 a: 1.1 b: 9.1	L: 61.4 a: 1.7 b: 9.6	L: 3.3 a: 1.2 b: 0.5 **ΔE:3.6**	L: 3.8 a: 0.9 b: -0.3 **ΔE:3.9**	L: 4.6 a: 1.2 b: 1.3 **ΔE:4.9**
L: 54.4 a: 1.8 b: 12.0	L: 64.4 a: 1.2 b: 14.2	L: 60.5 a: 0.7 b: 5.0	L: 60.5 a: 2.6 b: 12.8	L: 69.0 a: 1.4 b: 11.7	L: 66.2 a: 2.6 b: 6.4	L: 6.1 a: 0.9 b: 0.9 **ΔE:6.2**	L: 4.6 a: 0.2 b: -2.5 **ΔE:5.2**	L: 5.7 a: 1.9 b: 1.4 **ΔE:6.1**
L: 62.0 a: 2.9 b: 16.4	L: 62.0 a: 2.0 b: 13.1	L: 61.6 a: 1.2 b: 14.5	L: 66.0 a: 2.7 b: 16.1	L: 65.5 a: 2.3 b: 12.1	L: 64.7 a: 1.6 b: 13.0	L: 4.0 a: -0.2 b: -0.3 **ΔE:4.0**	L: 3.5 a: 0.3 b: -0.9 **ΔE:3.7**	L: 3.1 a: 0.4 b: -1.5 **ΔE:3.5**

Tabelle 14: Ergebnistabelle ohne Laserbehandlung mit WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel (rot)

Farbe vor dem Bleichen			Farbe nach dem Bleichen			Differenz in ΔE		
Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal
L: 64.2 a: 0.5 b: 8.4	L: 67.7 a: -0.4 b: 9.3	L: 68.4 a: -0.6 b: 8.7	L: 64.4 a: 1.6 b: 9.4	L: 67.9 a: 0.2 b: 10.1	L: 69.5 a: 0.2 b: 8.3	L: 0.2 a: 1.1 b: 1.0 **ΔE: 1.5**	L: 1.2 a: 0.6 b: 0.8 **ΔE:1.6**	L: 1.1 a: 0.8 b: -0.4 **ΔE:1.5**
L: 63.0 a: 0.3 b: 10.8	L: 70.5 a: -0.3 b: 16.7	L: 68.8 a: 0.0 b: 19.1	L: 62.9 a: 2.0 b: 11.3	L: 70.6 a: 1.1 b:18.0	L: 68.8 a: 1.5 b: 19.9	L: -0.0 a: 1.8 b: 0.5 **ΔE: 1.9**	L: 0.1 a: 1.4 b: 1.3 **ΔE:1.9**	L: -0.1 a: 1.5 b: 0.8 **ΔE:1.7**
L: 70.1 a: -1.1 b: 14.7	L: 71.2 a: -0.8 b: 16.6	L: 70.8 a: -0.6 b: 18.6	L: 70.6 a: 0.5 b: 15.5	L: 71.3 a: 0.6 b: 17.1	L: 71.5 a: 0.6 b: 19.5	L: 0.5 a: 1.6 b: 0.8 **ΔE: 1.9**	L: 0.1 a: 1.4 b: 0.5 **ΔE:1.5**	L: 0.7 a: 1.2 b: 1.0 **ΔE:1.7**
L: 59.4 a: 1.1 b: 17.2	L: 59.1 a: 1.4 b: 19.5	L: 58.7 a: 1.4 b: 19.6	L: 60.1 a: 2.8 b: 17.9	L: 60.0 a: 2.8 b: 20.1	L: 59.5 a: 3.0 b: 20.4	L: 0.7 a: 1.7 b: 0.7 **ΔE: 2.0**	L: 0.9 a: 1.5 b: 0.5 **ΔE:1.8**	L: 0.8 a: 1.6 b: 0.8 **ΔE:1.9**
L: 62.1 a: 2.4 b: 12.1	L: 65.4 a: -0.2 b: 13.2	L: 65.5 a: -0.8 b: 15.0	L: 63.2 a: 3.4 b: 13.3	L: 66.2 a: 1.1 b: 13.8	L: 66.3 a: 0.6 b: 15.3	L: 1.1 a: 1.0 b: 1.2 **ΔE:1.9**	L: 0.8 a: 1.3 b: 0.6 **ΔE:1.6**	L: 0.9 a: 1.4 b: 0.3 **ΔE:1.7**
L: 70.1 a: -0.2 b: 13.1	L: 71.9 a: 0.1 b: 14.8	L: 73.8 a: -0.9 b: 11.6	L: 71.5 a: 1.0 b: 13.5	L: 73.4 a: 0.8 b: 15.1	L: 74.9 a: 0.1 b: 12.0	L: 1.5 a: 1.1 b: 0.4 **ΔE:1.9**	L: 1.6 a: 0.7 b: 0.3 **ΔE:1.7**	L: 1.1 a: 1.0 b: 0.4 **ΔE:1.6**
L: 67.5 a: 2.6 b: 22.4	L: 69.5 a: 2.8 b: 25.1	L: 69.0 a: 2.4 b: 26.1	L: 67.9 a: 3.5 b: 23.7	L: 70.0 a: 3.6 b: 25.8	L: 69.6 a: 3.2 b: 26.4	L: 0.4 a: 0.9 b: 1.3 **ΔE:1.6**	L: 0.5 a: 0.8 b: 0.8 **ΔE:1.2**	L: 0.6 a: 0.8 b: 0.3 **ΔE:1.1**
L: 60.3 a: -1.0 b: 6.2	L: 64.4 a: -0.9 b: 7.7	L: 64.9 a: -0.9 b: 9.6	L: 61.2 a: -0.3 b: 7.4	L: 65.9 a: -0.4 b: 7.7	L: 66.4 a: -0.7 b: 9.2	L: 1.0 a: 0.7 b: 1.2 **ΔE:1.7**	L: 1.5 a: 0.4 b: -0.0 **ΔE:1.5**	L: 1.5 a: 0.2 b: -0.5 **ΔE:1.6**
L: 61.3 a: -1.2 b: 4.6	L: 59.1 a: -1.4 b: 7.2	L: 52.5 a: -1.3 b: 9.6	L: 62.4 a: -0.3 b: 5.6	L: 60.5 a: -0.8 b: 7.7	L: 53.9 a: -0.6 b: 9.4	L: 1.0 a: 0.9 b: 1.0 **ΔE:1.7**	L: 1.4 a: 0.6 b: 0.5 **ΔE:1.6**	L: 1.4 a: 0.6 b: -0.2 **ΔE:1.5**
L: 64.4 a: 0.2 b: 15.4	L: 64.8 a: 0.1 b: 13.7	L: 63.9 a: 0.2 b: 12.1	L: 63.9 a: 1.5 b: 15.8	L: 64.1 a: 1.3 b: 13.4	L: 63.3 a: 1.3 b: 12.0	L: -0.5 a: 1.3 b: 0.3 **ΔE:1.5**	L: -0.7 a: 1.2 b: -0.2 **ΔE:1.4**	L: -0.5 a: 1.1 b: -0.1 **ΔE:1.2**

L: 59.5 a: 2.0 b: 14.7	L: 61.7 a: 1.8 b: 21.7	L: 65.3 a: 1.5 b: 20.8	L: 59.1 a: 3.5 b: 15.1	L: 61.7 a: 3.0 b: 22.6	L: 65.2 a: 2.6 b: 21.7	L: -0.4 a: 1.5 b: 0.4 **ΔE:1.6**	L: 0.1 a: 1.2 b: 0.9 **ΔE:1.5**	L: -0.1 a: 1.1 b: 0.9 **ΔE:1.4**
L: 63.7 a: -0.7 b: 7.3	L: 63.9 a: -0.9 b: 7.2	L: 63.2 a: -0.9 b: 7.1	L: 62.8 a: 0.8 b: 8.4	L: 63.3 a: 0.4 b: 8.2	L: 62.6 a: 0.5 b: 8.2	L: -0.9 a: 1.5 b: 1.1 **ΔE:2.0**	L: -0.6 a: 1.3 b: 1.0 **ΔE:1.8**	L: -0.6 a: 1.5 b: 1.1 **ΔE:1.9**
L: 73.0 a: -0.2 b: 10.7	L: 72.5 a: -0.6 b: 10.5	L: 74.1 a: -1.4 b: 9.3	L: 72.3 a: 0.6 b: 12.3	L: 71.9 a: 0.7 b: 11.5	L: 75.0 a: -0.2 b: 9.8	L: -0.7 a: 0.8 b: 1.6 **ΔE:1.9**	L: -0.6 a: 1.2 b: 1.0 **ΔE:1.7**	L: 1.0 a: 1.2 b: 0.5 **ΔE:1.6**
L: 73.9 a: -1.6 b: 6.9	L: 76.7 a: -1.7 b: 7.7	L: 75.2 a: -1.8 b: 9.4	L: 73.5 a: -0.6 b: 7.8	L: 76.2 a: -0.9 b: 8.5	L: 74.6 a: -1.0 b: 10.1	L: -0.4 a: 1.0 b: 1.0 **ΔE:1.4**	L: -0.5 a: 0.8 b: 0.8 **ΔE:1.3**	L: -0.6 a: 0.8 b: 0.7 **ΔE:1.2**
L: 69.5 a: 2.0 b: 16.6	L: 67.5 a: 1.1 b: 14.8	L: 71.5 a: -0.6 b: 13.5	L: 69.1 a: 3.4 b: 16.8	L: 67.9 a: 2.3 b: 14.5	L: 71.5 a: 0.8 b: 13.8	L: -0.4 a: 1.4 b: 0.2 **ΔE: 1.4**	L: 0.5 a: 1.2 b: -0.3 **ΔE:1.3**	L: -0.1 a: 1.4 b: 0.3 **ΔE:1.4**

Tabelle 15: Ergebnistabelle ohne Laserbehandlung mit WHITEsmile LIGHT WHITENING AC – Gel (grün)

Farbe vor dem Bleichen			Farbe nach dem Bleichen			Differenz in ΔE		
Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal
L: 67.0 a: 2.4 b: 15.2	L: 73.9 a: 2.8 b: 20.7	L: 67.5 a: 4.0 b: 19.3	L: 68.2 a: 1.6 b: 15.3	L: 75.0 a: 2.8 b: 20.8	L: 68.3 a: 3.4 b: 18.9	L: 1.3 a: -0.8 b: 0.3 **ΔE:1.5**	L: 1.1 a: -0.0 b: 0.2 **ΔE:1.1**	L: 0.8 a: -0.5 b: -0.4 **ΔE:1.1**
L: 61.9 a: 2.4 b: 11.4	L: 66.1 a: 1.5 b: 13.8	L: 71.2 a: -0.2 b: 13.6	L: 63.1 a: 2.5 b: 11.6	L: 67.6 a: 1.7 b: 14.4	L: 72.8 a: 0.3 b: 14.3	L: 1.2 a: 0.2 b: 0.2 **ΔE:1.2**	L: 1.5 a: 0.2 b: 0.6 **ΔE:1.7**	L: 1.6 a: 0.5 b: 0.7 **ΔE:1.8**
L: 62.0 a: 3.1 b: 13.6	L: 63.8 a: 3.6 b: 18.6	L: 64.6 a: 3.7 b: 22.5	L: 62.7 a: 2.9 b: 14.6	L: 64.0 a: 3.4 b: 19.8	L: 65.1 a: 3.1 b: 23.6	L: 0.7 a: -0.2 b: 1.0 **ΔE:1.2**	L: 0.2 a: -0.2 b: 1.2 **ΔE:1.3**	L: 0.5 a: -0.6 b: 1.1 **ΔE:1.3**
L: 51.0 a: 5.0 b: 10.1	L: 59.0 a: 2.5 b: 13.6	L: 65.3 a: 0.3 b: 15.2	L: 52.1 a: 5.0 b: 10.5	L: 60.2 a: 2.8 b: 14.5	L: 66.7 a: -0.0 b: 16.3	L: 1.1 a: -0.0 b: 0.4 **ΔE:1.1**	L: 1.2 a: 0.2 b: 1.0 **ΔE:1.5**	L: 1.4 a: -0.4 b: 1.2 **ΔE:1.9**
L: 65.1 a: 2.1 b: 14.2	L: 65.6 a: 3.2 b: 18.5	L: 63.2 a: 2.2 b: 14.9	L: 66.0 a: 2.5 b: 16.0	L: 66.6 a: 3.5 b: 19.5	L: 64.2 a: 2.2 b: 15.3	L: 1.0 a: 0.4 b: 1.9 **ΔE:2.1**	L: 1.0 a: 0.3 b: 1.1 **ΔE:1.5**	L: 1.0 a: -0.0 b: 0.4 **ΔE:1.1**
L: 69.2 a: -0.4 b: 13.0	L: 72.4 a: -0.5 b: 16.2	L: 75.4 a: -0.4 b: 14.3	L: 70.9 a: -0.1 b: 14.1	L: 73.5 a: -0.5 b: 14.7	L: 75.1 a: -0.6 b: 16.0	L: 1.7 a: 0.2 b: 1.1 **ΔE:2.0**	L: 1.2 a: -0.0 b: -1.5 **ΔE:1.9**	L: -0.3 a: -0.2 b: 1.7 **ΔE:1.7**
L: 58.1 a: 2.5 b: 11.9	L: 61.6 a: 0.0 b: 11.4	L: 65.2 a: -0.7 b: 13.3	L: 59.8 a: 2.5 b: 12.4	L: 63.1 a: 0.3 b: 12.5	L: 66.5 a: -0.2 b: 14.1	L: 1.7 a: 0.0 b: 0.5 **ΔE:1.8**	L: 1.5 a: 0.3 b: 1.2 **ΔE:1.9**	L: 1.3 a: 0.5 b: 0.7 **ΔE:1.6**
L: 52.9 a: 2.4 b: 6.9	L: 60.9 a: 2.7 b: 19.4	L: 55.7 a: 2.6 b: 8.5	L: 54.2 a 3.2 b: 7.8	L: 61.4 a: 2.9 b: 18.3	L: 57.6 a: 2.8 b: 8.8	L: 1.3 a: 0.8 b: 1.0 **ΔE:1.8**	L: 0.6 a: 0.1 b: -1.1 **ΔE:1.3**	L: 1.9 a: 0.2 b: 0.3 **ΔE:1.9**
L: 56.2 a: 4.2 b: 16.7	L: 59.8 a: 3.1 b: 19.9	L: 62.6 a: 1.0 b: 19.9	L: 56.5 a: 5.0 b: 17.8	L: 60.2 a: 3.5 b: 20.7	L: 61.9 a: 1.5 b: 20.6	L: 0.3 a: 0.7 b: 1.1 **ΔE:1.3**	L: 0.4 a: 0.4 b: 0.9 **ΔE:1.0**	L: -0.7 a: 0.5 b: 0.7 **ΔE:1.1**
L: 59.9 a: 0.1 b: 9.6	L: 68.1 a: -0.4 b: 16.0	L: 66.9 a: 0.4 b: 20.2	L: 60.7 a: 0.8 b: 9.7	L: 68.6 a: 0.2 b: 16.7	L: 67.6 a: 1.0 b: 20.8	L: 0.8 a: 0.6 b: 0.0 **ΔE:1.0**	L: 0.5 a: 0.7 b: 0.8 **ΔE:1.1**	L: 0.7 a: 0.6 b: 0.6 **ΔE:1.1**

L: 55.7 a: 2.7 b: 14.9	L: 58.3 a: 3.5 b: 21.7	L: 56.8 a: 5.0 b: 26.0	L: 56.7 a: 3.7 b: 16.0	L: 59.6 a: 4.3 b: 21.9	L: 58.4 a: 5.4 b: 26.2	L: 1.0 a: 1.0 b: 1.1 **ΔE:1.8**	L: 1.3 a: 0.8 b: 0.2 **ΔE:1.5**	L: 1.7 a: 0.4 b: 0.2 **ΔE:1.7**
L: 64.5 a: 2.5 b: 16.5	L: 66.2 a: 2.2 b: 20.0	L: 67.5 a: 4.0 b: 29.5	L: 65.7 a: 3.2 b: 17.3	L: 67.0 a: 2.8 b: 20.9	L: 68.5 a: 4.0 b: 29.8	L: 1.2 a: 0.6 b: 0.8 **ΔE:1.6**	L: 0.7 a: 0.6 b: 0.9 **ΔE:1.3**	L: 1.0 a: -0.0 b: 0.2 **ΔE:1.0**
L: 54.5 a: 3.8 b: 16.8	L: 60.8 a: 2.6 b: 18.8	L: 62.6 a: 2.0 b: 19.0	L: 55.4 a: 4.9 b: 17.9	L: 61.7 a: 3.4 b: 19.8	L: 64.0 a: 2.4 b: 20.8	L: 0.9 a: 1.1 b: 1.1 **ΔE:1.9**	L: 0.8 a: 0.9 b: 1.0 **ΔE:1.6**	L: 1.5 a: 0.4 b: 0.9 **ΔE:1.7**
L: 57.3 a: 1.7 b: 12.8	L: 58.0 a: 0.7 b: 15.4	L: 59.6 a: 0.6 b: 15.5	L: 58.1 a: 2.2 b: 13.8	L: 59.0 a: 1.3 b: 16.1	L: 60.5 a: 1.0 b: 15.4	L: 0.8 a: 0.6 b: 1.1 **ΔE:1.4**	L: 1.0 a: 0.6 b: 0.7 **ΔE:1.3**	L: 0.9 a: 0.4 b: -0.1 **ΔE:1.0**
L: 62.3 a: -0.2 b: 7.6	L: 64.5 a: -0.7 b: 8.8	L: 64.3 a: -2.1 b: 8.1	L: 63.6 a: -0.4 b: 9.1	L: 65.6 a: -1.0 b: 10.1	L: 65.0 a: -2.2 b: 9.7	L: 1.3 a: -0.2 b: 1.5 **ΔE:2.0**	L: 1.1 a: -0.3 b: 1.3 **ΔE:1.8**	L: 0.7 a: -0.1 b: 1.6 **ΔE:1.7**

Tabelle 16: Ergebnistabelle ohne Laserbehandlung mit JW Power Bleaching Next (rot)

Farbe vor dem Bleichen			Farbe nach dem Bleichen			Differenz in ΔE		
Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal	Inzisal	Zentral	Zervikal
L: 77.5 a: 0.9 b: 11.8	L: 78.7 a: 3.0 b: 20.8	L: 74.9 a: 2.8 b: 21.5	L: 77.3 a: 2.6 b: 12.6	L: 78.1 a: 4.3 b: 21.2	L: 75.8 a: 3.5 b: 22.4	L: -0.3 a: 1.6 b: 0.9 **ΔE:1.9**	L: - 0.6 a: 1.4 b: 0.4 **ΔE 1.5**	L: 0.9 a: 0.8 b: 0.9 **ΔE:1.5**
L: 81.2 a: -1.1 b: 7.3	L: 81.8 a: -1.1 b: 8.1	L: 79.2 a: -1.0 b: 17.1	L: 79.9 a: 0.1 b: 6.1	L: 81.6 a: -0.6 b: 7.8	L: 80.2 a: -0.2 b: 16.6	L: -1.3 a: 1.2 b: -1.1 **ΔE:2.1**	L: -0.3 a: 0.5 b: -0.3 **ΔE:0.6**	L: 1.0 a: 0.8 b: - 0.4 **ΔE:1.3**
L: 79.4 a: 0.3 b: 11.0	L: 84.2 a: -0.7 b: 12.8	L: 83.6 a: -0.5 b: 19.3	L: 77.7 a: 1.0 b: 9.7	L: 84.8 a: -0.5 b: 12.0	L: 84.9 a: -0.2 b: 18.0	L: -1.6 a: 0.7 b: -1.4 **ΔE:2.2**	L: 0.6 a: 0.2 b: -0.8 **ΔE:1.0**	L: 1.3 a: 0.3 b: -1.3 **ΔE:1.9**
L: 78.2 a: 0.5 b: 9.7	L: 80.2 a: 0.5 b: 17.0	L: 82.5 a: 1.0 b: 18.4	L: 80.0 a: 0.9 b: 10.4	L: 81.5 a: 0.4 b: 17.9	L: 83.2 a: 1.4 b: 19.3	L: 1.8 a: 0.4 b: 0.7 **ΔE:1.9**	L: 1.4 a: -0.1 b: 0.9 **ΔE:1.6**	L: 0.7 a: 0.4 b: 1.0 **ΔE:1.3**
L: 79.7 a: 0.2 b: 10.7	L: 84.9 a: -0.4 b: 15.9	L: 79.6 a: 0.9 b: 26.9	L: 78.4 a: 1.0 b: 9.3	L: 85.0 a: -0.3 b: 14.3	L: 81.5 a: 0.8 b: 24.2	L: -1.3 a: 0.8 b: -1.4 **ΔE:2.1**	L: 0.1 a: 0.1 b: -1.6 **ΔE:1.6**	L: 1.9 a: -0.0 b: -2.8 **ΔE:3.4**
L: 67.4 a: -0.7 b: 10.9	L: 73.0 a: -0.4 b: 15.1	L: 72.2 a: -0.7 b: 17.3	L: 69.5 a: 0.2 b: 11.9	L: 74.7 a: 0.6 b: 13.3	L: 72.2 a: 1.5 b: 17.3	L: -2.1 a: -0.8 b: - 1.0 **ΔE:2.4**	L: -1.7 a: -1.0 b: 1.7 **ΔE:2.6**	L: 0.0 a: -2.1 b: - 0.0 **ΔE:2.1**
L: 64.3 a: 0.8 b: 10.2	L: 77.9 a: -0.1 b: 18.9	L: 76.7 a: -0.2 b: 19.7	L: 65.2 a: 1.3 b: 10.4	L: 78.7 a: 0.5 b: 19.7	L: 77.3 a: 0.9 b: 19.8	L: 0.9 a: 0.5 b: 0.3 **ΔE:1.1**	L: 0.8 a: 0.7 b: 0.8 **ΔE:1.3**	L: 0.6 a: 1.1 b: 0.1 **ΔE:1.3**
L: 59.0 a: 3.1 b: 11.9	L: 54.1 a: 1.6 b: 12.4	L: 52.4 a: 0.7 b: 10.2	L: 58.7 a: 3.4 b: 12.6	L: 55.0 a: 2.1 b: 12.5	L: 53.6 a: 1.4 b: 10.1	L: -0.3 a: 0.3 b: 0.7 **ΔE:0.8**	L: 0.9 a: 0.5 b: 0.1 **ΔE:1.1**	L: 1.2 a: 0.7 b: -0.1 **ΔE:1.3**
L: 70.8 a: -1.1 b: 11.6	L: 75.0 a: -1.3 b: 14.2	L: 69.7 a: -1.3 b: 14.8	L: 73.3 a: -0.9 b: 12.0	L: 76.5 a: -1.1 b: 14.4	L: 70.5 a: -1.1 b: 18.1	L: 2.5 a: 0.1 b: 0.4 **ΔE:2.5**	L: 1.5 a: 0.2 b: 0.2 **ΔE:1.5**	L: 0.8 a: 0.3 b: 3.3 **ΔE:3.4**
L: 59.4 a: 5.1 b: 15.8	L: 66.1 a: 0.7 b: 13.8	L: 65.6 a: -0.4 b: 12.5	L: 59.3 a: 5.8 b: 19.4	L: 66.7 a: 1.3 b: 15.4	L: 67.1 a: 0.2 b: 16.1	L: -0.2 a: 0.6 b: 3.6 **ΔE:3.7**	L: 0.7 a: 0.6 b: 1.6 **ΔE:1.8**	L: 1.6 a: 0.7 b: 3.6 **ΔE:4.0**

L: 64.6 a: 2.7 b: 15.6	L: 65.6 a: 1.2 b: 13.8	L: 63.0 a: -0.3 b: 9.5	L:67.0 a: 3.3 b:17.9	L: 66.7 a: 1.8 b: 15.2	L: 63.8 a: 0.1 b: 13.0	L: 2.3 a: 0.5 b: 2.4 **ΔE:3.4**	L: 1.1 a: 0.6 b: 1.4 **ΔE:1.9**	L: 0.8 a: 0.5 b: 3.5 **ΔE:3.6**
L: 65.6 a: 1.7 b: 12.7	L: 67.2 a: 0.5 b: 13.5	L: 64.2 a: -0.0 b: 11.9	L: 66.8 a: 3.1 b: 14.6	L: 68.0 a: 1.4 b: 14.4	L: 66.6 a: 0.9 b: 15.4	L: 1.3 a: 1.4 b: 2.0 **ΔE:2.7**	L: 0.8 a: 0.9 b: 0.8 **ΔE:1.4**	L: 2.3 a: 0.9 b: 3.4 **ΔE:4.3**
L: 72.6 a: 0.0 b: 15.4	L: 73.9 a: 0.8 b: 20.8	L: 72.9 a: 1.7 b: 21.6	L: 74.6 a: 0.1 b: 16.2	L:75.8 a: 1.3 b:20.7	L: 75.4 a: 2.5 b: 24.2	L: 2.0 a: 0.1 b: 0.8 **ΔE:2.2**	L: 1.9 a: 0.5 b: -0.2 **ΔE:1.9**	L: 2.5 a: 0.7 b: 2.7 **ΔE:3.7**
L: 66.3 a: -1.6 b: 9.9	L: 68.9 a: -1.7 b: 10.0	L: 74.3 a: -1.5 b: 10.6	L: 67.5 a: -1.2 b: 9.6	L: 68.9 a: -1.2 b: 10.6	L: 74.2 a: -1.1 b: 11.2	L: 1.2 a: 0.4 b: -0.3 **ΔE:1.3**	L: 0.1 a: 0.5 b: 0.6 **ΔE:0.8**	L: -0.1 a: 0.4 b: 0.7 **ΔE:0.8**
L: 64.0 a: - 0.1 b: 6.1	L: 63.5 a: 0.2 b: 9.4	L: 55.5 a: -0.5 b: 7.2	L: 66.7 a: 0.5 b: 7.1	L: 65.3 a: 0.9 b: 10.7	L: 57.0 a: 0.6 b: 8.7	L: 2.7 a: 0.6 b: 1.0 **ΔE:2.9**	L: 1.9 a: 0.6 b: 1.3 **ΔE:2.4**	L: 1.5 a: 1.1 b: 1.5 **ΔE:2.4**

Danksagung

Ein besonderer Dank geht an Herrn Univ.-Prof. Dr. med. dent. Andreas Braun, für die Überlassung des spannenden Dissertationsthemas. Besonders dankbar bin ich für seine stets offene Tür und sein offenes Ohr für meine Fragen und Herausforderungen während der gesamten Promotionszeit. Für all dies gebührt ihm mein aufrichtiger Dank. Ebenso möchte ich mich herzlich bei der Firma Ortmann-Statistik, insbesondere beim Statistiker Herrn Dr. Farid Kandil (Dipl.-Psych.), für das grundsätzliche Vorgehen und Überprüfen der Ergebnisse auf Richtigkeit bedanken. Außerdem möchte ich mich bei meiner Frau bedanken, die mich während der Schreibphase unermüdlich unterstützt hat. Ihre stetige Motivation und ihr Glaube an mich haben mich immer wieder angetrieben, diese Arbeit zu Ende zu bringen. Besonders dankbar bin ich dafür, dass sie mir den Rücken und Raum freigehalten hat, damit ich mich auf die Dissertation konzentrieren konnte. Ohne ihre Geduld, ihr Verständnis und ihre Unterstützung wäre dies nicht möglich gewesen. Von Herzen danke ich dir, Sara, für alles!

Erklärung § 5 Abs. 1 zur Datenaufbewahrung

Hiermit erkläre ich, dass die dieser Dissertation zu Grunde liegenden Originaldaten bei Herrn Univ.-Prof. Dr. med. dent. Andreas Braun, Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde des Universitätsklinikums Aachen, hinterlegt sind.

Eidesstattliche Erklärung gemäß § 5 Abs. (1) und § 11 Abs. (3) 12. der Promotionsordnung

Hiermit erkläre ich, Daniel Weltermann an Eides statt, dass ich folgende in der von mir selbstständig erstellten Dissertation „Aufhellung von Zähnen unter Verwendung einer adjuvanten 445 nm Laserbestrahlung“ dargestellten Ergebnisse erhoben habe. Bei der Durchführung der Arbeit hatte ich folgende Hilfestellungen, die in der Danksagung angegeben sind.

	Doktorrand (Daniel Weltermann)	Praktischer Betreuer (Dr. J.-S. Wenzler)	Statistiker (Dr. Farid Kandil)	Doktorvater (Prof. Dr. Andreas Braun)	Summe %
Studienüberwachung		30		70	100
Studiendesign/Konzeption	10	20		70	100
Untersuchung der Probekörper	90	10			100
Datenerhebung	100				100
Datenauswertung	80		20		100
Durchführung der Experimente	100				100
Statistische Auswertung	60		40		100
Bereitstellung von Materialien				100	100
Interpretation der Datenauswertung	90			10	100

Unterschrift der Doktorandin/des Doktoranden

Als Betreuer der obigen Dissertation bestätige ich die Angaben von Daniel Weltermann.

Unterschrift des Doktorvaters