

Aus dem Zentrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der
Universität zu Köln
Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
Direktorin: Univ.-Prof. Dr. med. dent. Anja Liebermann

In-vitro-Farbveränderungen adhäsiv befestigter Keramikveneers unter künstlicher Langzeitalterung

Inaugural-Dissertation zur Erlangung
der zahnärztlichen Doktorwürde
der Medizinischen Fakultät
der Universität zu Köln

vorgelegt von
Julia Caroline Richard
aus Köln

promoviert am 08. Juli 2026

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink

1. Gutachterin: Universitätsprofessorin Dr. med. dent. A. Liebermann
2. Gutachter: Professor Dr. med. Dr. med. dent. T. Dreiseidler

Erklärung

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskriptes habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Frau Univ.-Prof. Dr. med. dent. A. Liebermann, M. Sc., MME, MHBA

Frau Dr. med. dent. M. G. Di Gregorio-Schininà

Frau Dr. med. dent. B. Steeger

Herrn Dr. rer. medic. F.-J. Faber

Weitere Personen waren an der Erstellung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer Promotionsberaterin/eines Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertationsschrift stehen.

Die Dissertationsschrift wurde von mir bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Die den Untersuchungen dieser Arbeit zugrunde liegenden Versuche wurden von mir unter Vorgabe von Frau Prof. Dr. med. dent. A. Liebermann, M. Sc., MME, MHBA konzipiert und eigenständig durchgeführt. Die Prüfkörper wurden von Herrn Dr. med. dent. L. V. Brackhagen und Herrn P. Binner, Doktoranden meiner Arbeitsgruppe, im Rahmen eines großen Forschungsvorhabens ohne meine Mithilfe erstellt und für diese Dissertationsarbeit übernommen.

Die zur Medianbestimmung der Messwiederholungen verwendete Datenbank wurde von Herrn Dr. rer. medic. F.-J. Faber programmiert.

Die statistische Auswertung erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. rer. medic. F.-J. Faber.

Erklärung zur guten wissenschaftlichen Praxis:

Ich erkläre hiermit, dass ich die Ordnung zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten (Amtliche Mitteilung der Universität zu Köln AM 132/2020) der Universität zu Köln gelesen habe und verpflichte mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 19.03.2026

Unterschrift:

Danksagung

Ich möchte mich bei allen Personen bedanken, die durch ihre fachliche und menschliche Unterstützung zum Gelingen dieser Dissertationsarbeit beigetragen haben.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Doktormutter, Frau Univ.-Prof. Dr. Anja Liebermann, M. Sc., MME, MHBA, die mir diese Arbeit anvertraut hat und mir mit ihrer umfassenden fachlichen Expertise, klaren Impulsen sowie ihrer immer zugewandten und menschlich wertschätzenden Art zur Seite gestanden hat. Vielen Dank.

Für die Betreuung während der gesamten Dissertation möchte ich Frau Dr. Maria Grazia Di Gregorio-Schininà und Frau Dr. Bianca Steeger herzlich danken. Ihre kontinuierlichen Anregungen und die verlässliche Begleitung haben wesentlich zum Fortschritt meiner Arbeit beigetragen. Ohne Sie wäre die Arbeit in ihrer jetzigen Form nicht möglich gewesen.

Herrn Dr. Franz-Josef Faber danke ich sehr für sein stets offenes Ohr, seine konstruktiven Rückmeldungen sowie seine fundierten Anregungen, die meine wissenschaftliche Herangehensweise bereichert haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei allen Mitarbeitern und Mitarbeiterinnen der Werkstoffkunde für die herzliche Aufnahme, die Nutzung der Räumlichkeiten und die Bereitstellung der Gerätschaften bedanken.

Auf persönlicher Ebene möchte ich mich herzlichst bei meinem Partner bedanken, der mir in dieser intensiven Zeit mit viel Geduld und Rückhalt begegnet ist und vieles leichter gemacht hat. Auch meinen Eltern danke ich von ganzem Herzen. Ihr habt mir den Rücken gestärkt, Verständnis gezeigt und wart immer an meiner Seite.

Ein besonderer Dank gilt meiner lieben Oma.

Mein herzlicher Dank gilt der Medizinischen Fakultät für die Aufnahme in das Köln Fortune Stipendienprogramm.

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
1. ZUSAMMENFASSUNG	7
2. EINLEITUNG	8
2.1. Farbe	9
2.1.1. Farbbestimmung in der Zahnmedizin	11
2.1.2. Technische Farbmessung	12
2.1.3. Farbbestimmung durch digitale Fotografie	14
2.1.4. Farbabstandsformel CIEDE2000	15
2.2. Veneers	16
2.2.1. Veneerkeramik	17
2.2.2. Befestigungskomposite	18
2.3. Künstliche Alterung	19
2.4. Fragestellungen und Ziel der Arbeit	21
3. MATERIAL UND METHODEN	22
3.1. Material	22
3.1.1. Materialien der Prüfkörper	22
3.1.2. Herstellung der Zahnstümpfe	23
3.1.3. Herstellung der Veneers	23
3.1.4. Herstellung der Befestigungshilfe	24
3.1.5. Herstellung der Arbeitsvorrichtung	24
3.2. Methoden	26
3.2.1. Aufbau der Testgruppen	26
3.2.2. Künstliche Alterung	28
3.2.3. Alterungsparameter	29
3.2.4. Messintervalle	30
3.2.5. Vorbereitung der Prüfkörper vor Messung	30
3.2.6. Farbmessung	31
3.2.7. Messwertauswertung und ΔE_{00} -Berechnung	33
3.2.8. Nachuntersuchungen zu einem möglichen Einfluss der Stumpfverfärbung	33
3.2.9. Datenerhebung und Statistik	36

4.	ERGEBNISSE	37
4.1.	Vergleich der Befestigungsmaterialien	37
4.2.	Vergleich verschiedener Stumpffarben	38
4.3.	Vergleich verschiedener Spaltbreiten	39
4.4.	Farbstabilität zentral und im Randbereich	41
4.5.	Nachversuch	50
5.	DISKUSSION	51
5.1.	Diskussion der Methodik	51
5.1.1.	Kunststoffstümpfe	51
5.1.2.	Externe Farbeinflüsse	52
5.1.3.	Einflussanalyse unter kontrollierten Bedingungen	52
5.1.4.	Gültigkeitsbereich der Ergebnisse	53
5.2.	Diskussion der Ergebnisse	54
5.2.1.	Farbabweichungen nach Alterung	54
5.2.2.	Vergleich der Befestigungsmaterialien	54
5.2.3.	Vergleich verschiedener Stumpffarben	55
5.2.4.	Vergleich verschiedener Spaltbreiten	56
5.2.5.	Farbstabilität zentral und im Randbereich	57
5.2.6.	Schlussfolgerung	57
6.	LITERATURVERZEICHNIS	59
7.	ANHANG	64
7.1.	Abbildungsverzeichnis	64
7.2.	Tabellenverzeichnis	66
7.3.	Messergebnisse	66
8.	VORABVERÖFFENTLICHUNGEN VON ERGEBNISSEN	77

Abkürzungsverzeichnis

CAD/CAM	Computer-Aided Design/Computer-Aided Manufacturing
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CIEDE2000	Commission Internationale de l'Éclairage Delta E 2000
Dest. Wasser	destilliertes Wasser
GC A2	G-CEM Veneer A2
GC trans	G-CEM Veneer Translucent
ISO	International Organization for Standardization
MDP	10-Methacryloyloxydecyl dihydrogenphosphat
Pan clear	Panavia Veneer LC Clear
Pan uni	Panavia Veneer LC Universal
VE light+	Variolink Esthetic LC Light +
VE warm+	Variolink Esthetic LC Warm+

1. Zusammenfassung

Ästhetische Frontzahnrehabilitationen spielen eine immer größere Rolle, da ein harmonisches Lächeln nicht nur als Schönheitsmerkmal gilt, sondern auch das soziale Wohlbefinden beeinflussen kann. Keramikveneers ermöglichen eine minimalinvasive, langlebige Korrektur der Frontzähne, sind jedoch aufgrund ihrer hohen Transluzenz und geringen Materialschichtstärke anfällig für Farbveränderungen. Die Wahl des Befestigungskomposits beeinflusst das endgültige Farbergebnis maßgeblich. Vor diesem Hintergrund analysierte die vorliegende Untersuchung, wie sich künstliche Alterung in verschiedenen Lagerungsmedien auf die Farbstabilität von Befestigungskompositen auswirkt.

Dazu wurden 270 Keramikveneers aus Lithiumdisilikatkeramik (0,4 mm) angefertigt und mittels sechs verschiedener Befestigungskomposite mit Kunststoffstümpfen in drei Farben verklebt. Die künstliche Alterung erfolgte durch 48-tägige Lagerung der Prüfkörper in destilliertem Wasser (Kontrollgruppe), schwarzem Tee und Rotwein. Aufgetretene Farbveränderungen wurden zu vier Zeitpunkten mittels digitaler Fotografie erfasst und in der eLAB-Software (Emulation S. Hein) ausgewertet. Anschließend erfolgte die Berechnung der Farbabstände mithilfe der CIEDE2000-Farbabstandsformel (Commission Internationale de l'Éclairage Delta E 2000). Zudem wurde geprüft, ob die Stumpffarbe, die Breite des Randspalts oder die Position der Messung (zentral oder randseitig) das Farbergebnis beeinflussen. Die ermittelten Daten wurden in einer Datenbank (Access 2016) erfasst und mit IBM SPSS Statistics 28.0 statistisch ausgewertet. Die Analyse erfolgte mithilfe des Kolmogorov-Smirnow-Tests, der Varianzanalyse (ANOVA) sowie des Kruskal-Wallis-Tests.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung belegten, dass das verwendete Befestigungskomposit ($p < 0,001$), die Stumpffarbe ($p < 0,001$) und die Messposition ($p < 0,001$) einen signifikanten Einfluss auf die Farbstabilität von Befestigungskompositen hatten. Unter den untersuchten Materialien erwies sich G-CEM Veneer A2 (GC Corporation) als am farbstabilsten, allerdings überschritten alle Befestigungskomposite die klinische Akzeptanzschwelle ($\Delta E_{00} > 1,8$) nach 48-tägiger Alterung in Rotwein deutlich ($M_{\Delta E_{00}} = 7,785 \pm 0,594$). Eine helle Stumpffarbe (A1) stellte einen Risikofaktor für signifikant höhere Farbabweichungen dar. Die Farbabweichungen traten randständig (mesial/distal) signifikant stärker auf als zentral. Für die untersuchten Spaltbreiten (50 μm und 80 μm) konnte kein signifikanter Einfluss auf die Farbstabilität nachgewiesen werden ($p = 0,116$).

Es kann resümiert werden, dass das Befestigungskomposit einen signifikanten Einfluss auf den langfristigen ästhetischen Erfolg von Veneers hat. Die strategische Planung der Präparationsgrenze empfiehlt sich. Bei sehr hellen und gebleachten Zahnstümpfen sollten eine kritische Indikationsstellung und die Aufklärung des Patienten erfolgen.

2. Einleitung

Die ästhetische Rehabilitation der Frontzähne nimmt in der modernen Zahnmedizin einen zunehmend großen Stellenwert ein. Zum einen ist der Wunsch von Patientinnen und Patienten nach einem harmonischen Lächeln in den letzten Jahren gewachsen, zum anderen erstreckt sich die Bedeutung schöner Zähne weit über die ästhetische Komponente hinaus. So ist ein natürliches, harmonisches Lächeln nicht nur Ausdruck für Gesundheit, sondern kann auch in erheblichem Maße das individuelle Wohlbefinden sowie soziale Interaktionen beeinflussen. Ein harmonisches und gesund aussehendes Lachen wird mit Attraktivität, Vitalität und Kompetenz assoziiert.^{1,2}

Eine ästhetisch hochwertige und langlebige Möglichkeit der Frontzahnrestauration stellen Keramikveneers dar.³ Das Anwendungsgebiet umfasst die Verbesserung von Zahnfarb-, Stellungs-, Form- und Hartsubstanzanomalien. Im Vergleich zu herkömmlichen prothetischen Versorgungsmöglichkeiten wie Vollkronen sind Veneers deutlich substanzschonender. Das Präparationsdesign erfolgt minimalinvasiv und in bestimmten Ausgangssituationen kann auf einen Substanzabtrag vollständig verzichtet werden (Non-Prep-Veneers).^{4,5}

Veneers weisen aufgrund der geringen Materialschichtstärke und hohen Transluzenz eine erhöhte Empfindlichkeit gegenüber Farbveränderungen auf. Diese können durch eine farblich ungeeignete Wahl des Befestigungskomposits oder dessen unzureichende Farbstabilität begünstigt werden.⁶⁻⁹ Die Farbe des Befestigungsmaterials beeinflusst signifikant das endgültige Farberscheinungsbild des Veneers.¹⁰ Daher sollte bei Veneers mit einer Schichtstärke unter 0,5 mm neben der Restaurationsfarbe und dem Keramiktyp auch die Farbe des Befestigungskomposits berücksichtigt werden.¹¹ Der ästhetische Langzeiterfolg einer Frontzahnrestauration hängt folglich neben der Farbstabilität der Keramik auch von der Farbauswahl und der Farbstabilität des Befestigungskomposits ab.^{8,12-14}

Die Anforderungen an die Befestigungsmaterialien sind hoch, da Veneers nach der definitiven Eingliederung verschiedenen thermischen, chemischen und mechanischen Einflüssen, wie Nahrungs- und Trinkgewohnheiten, Speichel, Temperaturschwankungen, schwankenden pH-Werten, Kaukräften sowie der patientenindividuellen Mundhygiene, ausgesetzt sind. Zusätzlich können auch endogene Faktoren wie die Materialzusammensetzung der Befestigungskomposite und die Art der Polymerisation zu Farbveränderungen der Veneers führen.¹⁵

Die aktuelle Studienlage zum Einfluss von Befestigungskompositen auf die Farbveränderung basiert überwiegend auf In-vitro-Untersuchungen mit Keramikplättchen anstelle von Veneers.¹⁶⁻²⁰ Flache Keramikplättchen weisen eine homogene Lichttransmission auf, während

die Krümmung der Oberfläche des Veneers dazu führt, dass die auftreffenden Lichtstrahlen unterschiedlich gebrochen und reflektiert werden.²¹ Dies könnte die Wahrnehmung der endgültigen Zahnfarbe beeinflussen und damit die klinische Akzeptanz verändern.

In dieser In-vitro-Untersuchung wurden 270 Veneerversorgungen künstlich in Färbemedien gealtert und die Farbstabilität zu vier verschiedenen Zeitpunkten gemessen. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Arbeit sollten dazu beitragen, die Auswahl geeigneter Befestigungskomposite für Veneerversorgungen zu optimieren und daraus Empfehlungen für die klinische Anwendung abzuleiten.

2.1. Farbe

Die Wahrnehmung von Farbe durch den Menschen ist ein vielschichtiger Prozess, der auf dem komplexen Zusammenspiel physikalischer, physiologischer und psychologischer Faktoren beruht. Im Zentrum steht das Wechselspiel zwischen Licht, materiellen Oberflächen und dem visuellen System.^{22,23}

Trifft Licht auf ein Objekt, so werden dessen Strahlen in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit und den materialtypischen Molekülstrukturen unterschiedlich behandelt. Bestimmte Wellenlängen werden absorbiert, andere reflektiert oder transmittiert. Die reflektierten Anteile des einfallenden Lichts gelangen schließlich in das Auge und bestimmen, welche Farbe ein Betrachter subjektiv wahrnimmt. Entscheidend ist hierbei, dass Farbe keine objektive Eigenschaft eines Gegenstandes ist, sondern als bewusste Sinnesempfindung im Gehirn entsteht. Erst das Zusammenspiel von Lichtquelle, Objekt und dem visuellen Apparat lässt den Farbeindruck entstehen.^{22,23}

Aus physikalischer Sicht handelt es sich bei Licht um elektromagnetische Wellen im Bereich von etwa 400 Nanometern (nm) (kurzwelliges Violett) bis zu etwa 720 nm (langwelliges Rot). Die spezifische Zusammensetzung dieser Wellen entscheidet darüber, welcher Farbeindruck im Gehirn entsteht. Objekte reflektieren jedoch nicht das gesamte Lichtspektrum gleichmäßig, sondern bevorzugt bestimmte Wellenlängen, während andere absorbiert oder durchgelassen werden. Die Art und Weise, wie ein Material Licht selektiv reflektiert, prägt entscheidend die sichtbare Oberflächenfarbe. Wird das gesamte sichtbare Spektrum nahezu vollständig reflektiert, erscheint das Objekt Weiß. Wird hingegen nahezu alles Licht absorbiert, so erscheint es Schwarz.²²

Auf physiologischer Ebene setzt die Farbwahrnehmung bei der Reizaufnahme in der Netzhaut (Retina) an. Dort sind spezialisierte Photorezeptoren lokalisiert. Stäbchen, die für das Hell-Dunkel-Sehen verantwortlich sind und Zapfen, die das Farbsehen ermöglichen. Die Zapfen lassen sich in drei Typen unterteilen, die jeweils auf bestimmte Wellenlängenbereiche reagieren. Kurzwellige Zapfen (S-Typ) für Blau, mittelwellige (M-Typ) für Grün und langwellige (L-Typ) für Rot. Der Farbeindruck entsteht aus den relativen Erregungsmustern dieser drei Zapfentypen, die im visuellen Cortex integriert und interpretiert werden.²²

Damit ein Farbreiz bewusst wahrgenommen werden kann, müssen bestimmte physikalische und physiologische Schwellenwerte überschritten werden. Dazu zählen eine minimale Lichtintensität, eine ausreichende Dauer der Reizung sowie eine gewisse Größe des erregten Netzhautareals. Erst wenn diese Bedingungen erfüllt sind, wird der visuelle Reiz über die nachgeschalteten neuronalen Strukturen der Sehbahn in das Gehirn weitergeleitet und dort zu einem kohärenten Farbeindruck verarbeitet.²²

In der theoretischen Erklärung des Farbsehens haben sich zwei Modelle besonders etabliert, die Trichromatische Theorie von Young und Helmholtz sowie die Gegenfarbtheorie von Hering. Erst im Zusammenspiel beider Ansätze lässt sich die Komplexität der Farbwahrnehmung umfassend verstehen.²²

Individuelle Faktoren wie Alter, visuelle Ermüdung, individuelle Farbsehschwächen oder auch emotionale Zustände beeinflussen zusätzlich die Farbwahrnehmung. Ebenso entscheidend ist die Qualität der Lichtquelle, da dieselbe Objektfarbe unter unterschiedlichen Beleuchtungsarten (z. B. Tageslicht vs. Kunstlicht) stark variieren kann. Dieser Effekt wird als Metamerie bezeichnet. Zwei Objekte mit identischer spektraler Zusammensetzung können so unter verschiedenen Lichtbedingungen unterschiedlich erscheinen.²²⁻²⁴

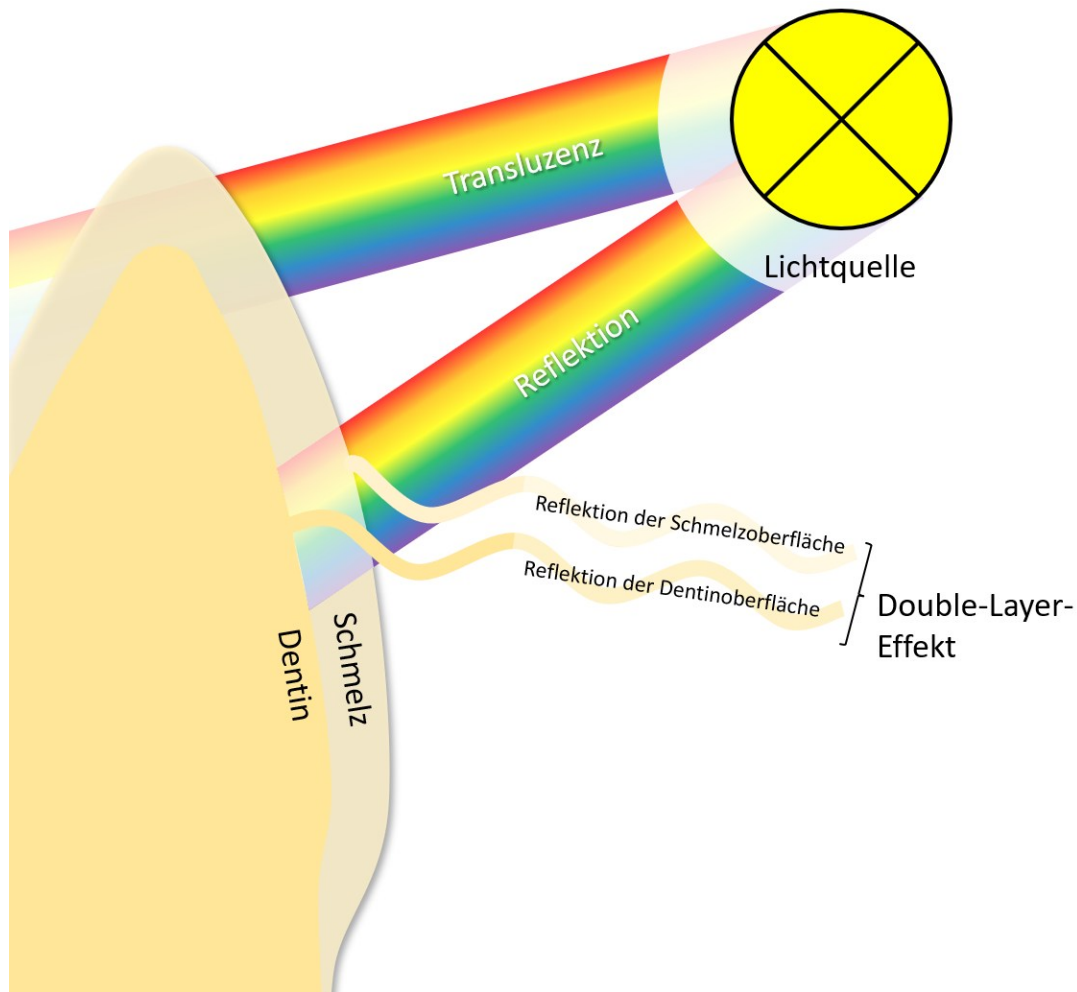


Abbildung 1 - Interaktion des Lichts mit einem Zahn (aus Brackhagen²⁵)

Die physikalische Objektivierung von Farben stützt sich auf die X-, Y-, Z-Normfarbwerte (Rot-orange, Grün, Blau). Diese Werte werden in der Farbmeterik aus den sensorischen Lichtreizen gewonnen und bilden die Grundlage der quantitativen Beschreibung von Farben. Damit spielen sie sowohl in der allgemeinen Farbtheorie als auch in der zahnmedizinischen Farbbestimmung eine entscheidende Rolle.^{22,24}

Gerade bei der Anfertigung ästhetisch anspruchsvoller Restaurationen ist es notwendig, Farbe systematisch zu erfassen, objektiv zu bewerten und reproduzierbar zu übertragen, damit die Zusammenarbeit zwischen zahnärztlicher Praxis und Dentallabor gelingen kann.²¹

2.1.1. Farbbestimmung in der Zahnmedizin

Neben der bereits dargestellten physiologischen Verarbeitung visueller Reize durch die Retina und den visuellen Kortex beeinflussen zahlreiche zahnmedizinisch relevante Faktoren die wahrgenommene Zahnfarbe. Dazu zählen insbesondere die Oberflächenstruktur und die

Transluzenz eines Zahnes, welche maßgeblich die Lichtreflexion beeinflussen. So erscheinen transluzente Zähne aufgrund ihrer Durchlässigkeit für Licht tendenziell gräulicher und dunkler, während opakere Zähne durch stärkere Lichtreflexion heller und farbintensiver wirken. Die Reflexionseigenschaften werden zusätzlich durch die Oberflächentextur modifiziert, da glatte und raue Flächen Licht unterschiedlich stark streuen.²¹ Die Farbwirkung eines Zahnes ist darüber hinaus nicht homogen, sondern variiert in unterschiedlichen Zonen. Aus diesem Grund wird die Farbnahme in drei Ebenen durchgeführt, im Bereich der Schneidekante, des Zahnkörpers und des zervikalen Anteils. Diese segmentierte Herangehensweise ermöglicht eine differenzierte Betrachtung individueller Farbverläufe und der natürlichen Farbdynamik.²⁴

Für die klinische Farbbestimmung haben sich bestimmte Grundprinzipien etabliert. Die Farbbestimmung sollte stets vor der Behandlung erfolgen, um durch Austrocknung verursachte Veränderungen der Zahnfarbe zu vermeiden. Die Zähne müssen gereinigt und feucht sein, da nur so die natürliche Transluzenz und Opazität sichtbar bleiben. Es ist empfehlenswert, die Betrachtungsdauer pro Zahn auf maximal fünf Sekunden zu begrenzen, um eine Anpassung des Auges zu verhindern, welche die objektive Wahrnehmung verfälschen könnte. Zudem sollte das Referenzmuster parallel zur Betrachtungsrichtung gehalten und nicht gegen den natürlichen Zahn geneigt werden.^{23,24}

Auch der Einfluss des Umfelds ist zu beachten. Lippenstift, starkfarbige Kleidung oder der individuelle Ton des Lippenrots können die subjektive Farbwahrnehmung des Zahnes beeinflussen.²⁴

Für die optimale Kommunikation zwischen Praxis und Dentallabor ist die präzise Beschreibung der beobachteten Farbmerkmale essenziell. Neben dem gewählten Farbton sollte der Zahnarzt oder die Zahnärztin auch Angaben zur Oberflächenstruktur, Transluzenz, individuellen Charakteristika und Lichtwirkung machen. Dabei können fotografische Dokumentationen mit Farbringreferenz sowie standardisierte Aufnahmebedingungen die Übertragung wesentlich verbessern.^{21,24}

2.1.2. Technische Farbmessung

In der Zahnmedizin ist eine präzise Farbbestimmung von höchster Bedeutung, um die Farbe von direkten oder indirekten Restaurationen vor allem im sichtbaren Bereich passend bestimmen zu können. Gegenüber der herkömmlichen visuellen Farbbestimmung mittels Farbringen gilt die instrumentelle Farbbestimmung als präziser.²⁶⁻³¹ Bei letzterer wird rein visuell bestimmt,

welcher Farbton auf einer standardisierten Farbkarte beispielsweise der Farbe eines Zahnes am genauesten entspricht.

Die instrumentelle Farbmessung ermöglicht es, jedem Farbton einen individuellen, messbaren und reproduzierbaren Wert zuzuordnen. Grundlage dafür sind international anerkannte Farbmodelle und Farbräume. Ein in der Medizin häufig genutzter Farbraum ist der CIE $L^*a^*b^*$ -Farbraum. Dieser wurde durch die Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) etabliert. Dieses System beschreibt Farben in einem dreidimensionalen Modell, das aus den Komponenten L^* für die Helligkeit, a^* für die Rot-Grün-Achse und b^* für die Gelb-Blau-Achse besteht. Hieraus ergibt sich der $L^*a^*b^*$ -Wert.³²⁻³⁴

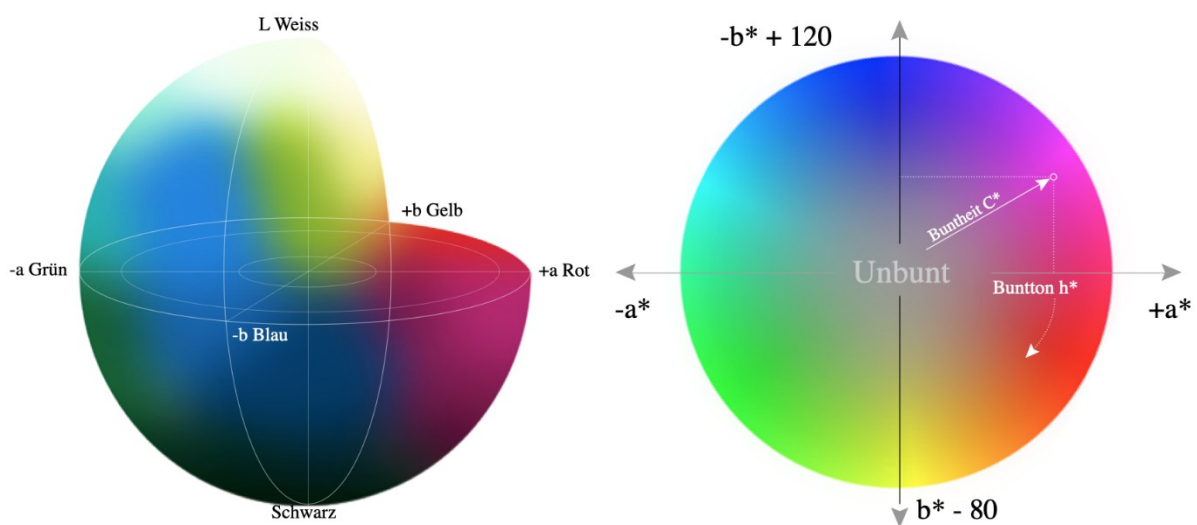


Abbildung 2 - CIE $L^*a^*b^*$ -Farbraum³⁵

Die instrumentelle Farbmessung kann mithilfe unterschiedlicher Methoden erfolgen. Hierzu gehören die digitale Fotografie, Spektrofotometrie, Kolorimetrie und Intraoralscanner. Alle Arten der instrumentellen Farbbestimmung sind sehr techniksensibel und folglich fehleranfällig. Es ist bislang nicht abschließend geklärt, welche gerätegestützte Messmethode die genauesten Ergebnisse liefert. Intraoralscanner gelten als am ungenauesten. Hinsichtlich der Bewertung digitaler Fotografie mit Weißabgleich, Kolorimetrie und Spektrofotometrie besteht Uneinigkeit.^{22,26,29,31,36}

Spektrofotometrische Messsysteme basieren auf dem Spektralverfahren, bei dem der zu untersuchende Prüfkörper mit Licht im sichtbaren Spektralbereich (400-700 nm) beleuchtet wird. Dabei wird eine Remissionskurve erfasst, die das reflektierte Licht in Abhängigkeit von der Wellenlänge darstellt. Unter Berücksichtigung der jeweiligen Lichtart (Beleuchtungsbedingung) lassen sich daraus die normierten Farbkoordinaten gemäß internationaler Farbsysteme berechnen.^{22,36}

Kolorimeter arbeiten nach einem ähnlichen Prinzip wie Spektralfotometer, indem sie das Prüfobjekt mit einer standardisierten Weißlichtquelle beleuchten. Im Gegensatz zum Spektralfotometer wird das reflektierte Licht jedoch nicht spektral aufgelöst, sondern über Tristimulus-Filter geleitet, die die Farbwahrnehmung des menschlichen Auges nachbilden. Die Farbbestimmung erfolgt auf Basis der daraus berechneten Normfarbwerte.^{22,26}

2.1.3. Farbbestimmung durch digitale Fotografie

Zur Bestimmung von Farbinformationen werden digitale Aufnahmen mithilfe spezialisierter Kamerasysteme erstellt. Die Farbbestimmung erfolgt anschließend durch eine Bildverarbeitungssoftware. Das in dieser Untersuchung genutzte eLAB-System (Emulation S. Hein) verwendet hierfür eine Kreuzpolarisationstechnik, bei der durch eine Kombination aus polarisiertem Blitzlicht und zwei gekreuzten Polarisationsfiltern (polar_eyes, Emulation, D-Freiburg) direkte Lichtreflexionen auf der Zahnoberfläche unterdrückt beziehungsweise herausgefiltert werden. Dadurch wird ausschließlich diffus reflektiertes Licht vom Kamerasensor erfasst, was eine unverfälschte Farbmessung ermöglicht.³⁷

Um die Farbtreue zusätzlich zu erhöhen, wird eine genormte Graukarte (white_balance, Emulation, D-Freiburg) in die Aufnahme integriert, über die in der eLAB-Prime-Software ein automatisierter Weißabgleich erfolgt.³⁷



Abbildung 3 - Aufnahme mit Graukarte für eLAB-Prime

2.1.4. Farbabstandsformel CIEDE2000

Im CIE L*a*b*-Farbraum dient der Farbabstandsindex ΔE als Maß für die Differenz zwischen zwei Farbtönen. Ein ΔE -Wert von 1 entspricht dabei der Wahrnehmungsschwelle, bei der 50 % der BeobachterInnen einen Farbunterschied erkennen können. Die mathematische Bestimmung von ΔE wurde über die Jahre immer wieder verfeinert, um der ungleichmäßigen Farbwahrnehmung des menschlichen Auges besser gerecht zu werden. Das aktuell differenzierteste Modell ist die CIEDE2000-Farbabstandsformel (Anhang Abbildung 33).³⁸

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H}{K_H S_H}\right)}$$

Die Internationale Organisation für Normung (ISO) hat für die CIEDE2000-Formel konkrete Schwellenwerte definiert. Die Wahrnehmungsgrenze liegt bei einem ΔE_{00} -Wert von 0,81, wobei 50 % der Beobachter einen Farbunterschied zwischen zwei Farbmustern erkennen können. Die Akzeptanzschwelle hingegen befindet sich bei einem ΔE_{00} -Wert von 1,77. Ab diesem Wert wird der Farbunterschied von 50 % der Beobachter als nicht mehr akzeptabel bewertet.³⁹

Diese Werte sind auf die Anforderungen von Farbbestimmungen in der Zahnmedizin abgestimmt.³⁸

2.2. Veneers

Veneers sind hauchdünne, transluzente Verblendschalen aus Keramik, die permanent mit den Frontzähnen mittels eines Befestigungskomposits verklebt werden. Für die Präparation von Veneers wird empfohlen, ausschließlich Zahnschmelz abzutragen, um optimale Haftwerte zu gewährleisten. Dabei sollte ein Materialabtrag von etwa 0,3 bis 0,5 mm erfolgen, um so substanzschonend wie möglich zu arbeiten und gleichzeitig die erforderlichen Mindeststärken der verwendeten Keramiken einhalten zu können.^{24,40}

Das Einsatzgebiet umfasst den Ausgleich von Zahnanomalien in Farbe, Form, Stellung und Hartschubstanz. Kontraindikationen stellen ein ungenügendes Schmelzangebot sowie große proximale Füllungen dar.²⁴ Die vollkeramischen, indirekten Restaurationen zeichnen sich durch hohe Ästhetik, Langlebigkeit und Gewebeverträglichkeit aus.^{4,13,24,41}

Zur Vorbereitung eines Zahns für die Versorgung mit keramischen Veneers haben sich klinisch drei grundlegende Präparationskonzepte herausgebildet. Die konventionelle Form umfasst eine ausschließlich vestibuläre Reduktion des Zahnschmelzes, bei der die inzisale Kante in oro-vestibulärer Richtung etwa zur Hälfte einbezogen wird. Ergänzend dazu existieren modifizierte Präparationsformen, die entweder eine zusätzliche inzisale Reduktion in horizontaler Richtung (inzisale Stufe) oder eine Kombination aus horizontaler Inzisalreduktion und oraler Umschließung der Schneidekante (inzisale Überkuppelung) beinhalten. Letztere weisen in Bezug auf Ausdehnung und Gestaltung fließende Übergänge zur Teilkronenpräparation im Frontzahnbereich auf. Im Fall einer notwendigen Verlängerung der Inzisalkante ist eine Reduktion von ca. 1,5 mm unterhalb der neu geplanten Inzisalkante erforderlich.^{24,40,42}

Darüber hinaus finden auch Sonderformen Anwendung, wie 360°-Veneers, orale Veneers zur Rekonstruktion palatinaler Führungsflächen oder additive keramische Restaurationsformen (Additional), die dem partiellen Ersatz verloren gegangener Zahnhartschubstanz dienen. In bestimmten klinischen Ausgangssituationen kann vollständig auf eine Präparation des Zahnes verzichtet werden. Solche Fälle eignen sich für die Versorgung mit sogenannten Non-Prep-Veneers. Diese kommen bevorzugt bei kariesfreien Zähnen zur Anwendung, die entweder in retrudierter Stellung im Zahnbogen stehen oder morphologische Besonderheiten, wie beispielsweise dentale Dysplasien, aufweisen.^{41,43} Die Art des Veneers ist abhängig von der Indikation und der zu erwartenden Kaubelastung der Restauration.

Eine möglichst große Klebefläche im Schmelz ist essenziell für den Haftverbund der dünnen Verblendschale mit dem Zahn. Liegt ein ausreichendes Schmelzangebot vor, so kann durch eine adhäsive Befestigung am Schmelz (Haftkraft ca. 30 N/mm²) eine dauerhaft stabile Verbindung erreicht werden. Eine Verbindung im Bereich von Dentin ist aufgrund geringerer Haftwerte nur eingeschränkt geeignet.^{24,42}

Veneers können im konventionellen Workflow nach analoger Abformung auf einem physischen Modell im Dentallabor angefertigt werden oder im digitalen Workflow nach Aufnahme der Präparation mittels Intraoralscan virtuell designt und anschließend gefräst werden. Für die ästhetische Planung und Beurteilung der Formveränderung empfiehlt sich der Einsatz eines Wax-Ups, das mithilfe eines Mock-Ups gemeinsam mit dem Patienten oder der Patientin intraoral überprüft werden sollte.²⁴

Zahlreiche klinische Studien belegen die hohe Langzeitstabilität keramischer Veneers, insbesondere bei der Verwendung moderner Glaskeramiken wie Lithiumdisilikat. Die Überlebensraten liegen je nach Studiendauer und Patientenkollektiv konstant über 90 %, wobei Veneers auf Schmelz eine signifikant bessere Haftung zeigen. Mögliche Komplikationen betreffen vorrangig Randverfärbungen oder Frakturen.^{24,44,45} Im Vergleich zu direkten Veneers aus Komposit sind indirekte Restaurationen aus Keramik in Bezug auf die Überlebensdauer und die Qualität der Restauration überlegen.⁴⁴

2.2.1. Veneerkeramik

Dentalkeramiken lassen sich entsprechend ihrer chemischen Zusammensetzung in Silikat- und Oxidkeramiken einteilen. Silikatkeramiken sind durch eine glasartige Matrix charakterisiert, in die verschieden große Mengen an Kristallen eingelagert sind. Diese Kristalle, beispielsweise Leuzit oder Lithiumdisilikat, beeinflussen wesentlich die optischen und physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs. Je nach Art und Anteil der eingelagerten Kristallphase variieren Lichtbrechung, Transluzenz, Festigkeit sowie die Verarbeitungseigenschaften. Im Bereich ästhetischer Versorgungen gelten Silikatkeramiken als besonders geeignet.^{24,40}

Im direkten Vergleich dazu zeichnen sich Oxidkeramiken, wie zum Beispiel Zirkonoxid, durch eine höhere mechanische Stabilität und opakeres Aussehen aus. Diese hohe Opazität kann zwar bei monolithischen Restaurationen im Seitenzahnbereich vorteilhaft sein, erweist sich jedoch im ästhetisch sensiblen Bereich häufig als nachteilig. Die Lichttransmission ist reduziert, woraus eine weniger natürliche Erscheinung resultiert, wobei neuere Weiterentwicklungen eine immer höhere Transluzenz ermöglichen. Oxidkeramiken spielen aufgrund ihrer

ausgezeichneten Bruchfestigkeit eine bedeutende Rolle, etwa bei Gerüstmaterialien für mehrgliedrige Brücken oder implantatgetragene Versorgungen.^{24,40}

Für vollkeramische Veneers kommen hauptsächlich feldspatbasierte Silikatkeramiken, leuzit-verstärkte Keramiken sowie Lithiumdisilikatkeramiken zum Einsatz.^{24,40} Diese Materialien sind in unterschiedlichen Farbvarianten und Transluzenzstufen erhältlich, was eine individuelle Anpassung an den natürlichen Zahn sowie eine differenzierte Ästhetik ermöglicht.⁴⁶⁻⁴⁸ Insbesondere Lithiumdisilikat vereint eine für Frontzahnveneers ausreichende Festigkeit mit guten lichtoptischen Eigenschaften.²⁴

2.2.2. Befestigungskomposite

Die adhäsive Befestigung von Veneers mit einem Befestigungskomposit ist aufgrund der fehlenden Retention am präparierten Zahnstumpf, der Minimalinvasivität der Präparation und der geringen Materialstärke des Veneers der Goldstandard.^{6,37,49}

Es gibt verschiedene Arten von Befestigungskompositen: selbsthärtende, dualhärtende und lichthärtende Komposite. Bei lichthärtenden Befestigungskompositen erfolgt die Polymerisation durch fotochemische Initiierung. Dualhärtende Befestigungskomposite hingegen verfügen über ein kombiniertes Aushärtungssystem, bei dem die Polymerisation sowohl durch Lichtaktivierung als auch über eine rein chemische Reaktion initiiert wird.²⁴

Befestigungskomposite basieren auf einer Monomermatrix, die überwiegend aus verschiedenen modifizierten Methacrylatgruppen zusammengesetzt ist. Zur Optimierung der Materialeigenschaften wird diese organische Matrix mit anorganischen Füllstoffen angereichert. Als Füllmaterialien finden feinkörnige Gläser, Oxide und Silikate Anwendung, da ihre geringen Partikelgrößen die Verwendung extrem dünner Materialschichten in der Befestigungsfuge ermöglichen.^{50,51}

Sowohl der Zahn als auch die Restauration müssen entsprechend vorbehandelt werden. Dieser Prozess ist zeitintensiver und techniksensibel und erfordert die Eingliederung der Restauration unter absoluter Trockenlegung. Die Verankerung am Zahn geschieht mittels eines Befestigungskomposits durch mechanische und chemische Haftmechanismen. Selbstadhäsive Befestigungskomposite bedürfen keines zusätzlichen Adhäsivsystems, da diese modifizierte Monomere mit sauren Gruppen enthalten und damit die Demineralisation des Zahnschmelzes bewirken.²⁴ Adhäsive Befestigungskomposite bedürfen eines separaten Adhäsivsystems.

Die Vorbehandlung der Restauration richtet sich nach der Art der verwendeten Keramik. Bei Silikatkeramiken empfiehlt sich ein Ätzvorgang mit 5-9,5 % Flusssäure, gefolgt von einer Silanisierung. Für Zirkonoxidkeramiken gilt als Goldstandard das Abstrahlen der Oberfläche ($< 50 \mu\text{m}$; $\leq 1 \text{ bar}$) mit anschließender Verwendung eines Adhäsivsystems auf Basis von MDP oder Dimethacrylaten mit phosphorsäuremodifizierten Gruppen.⁵²

Zu den häufigsten Fehlerquellen im Zusammenhang mit adhäsiven Befestigungsverfahren zählen die Auswahl eines nicht geeigneten Adhäsivsystems sowie die Kontamination von geätzten Schmelzflächen oder konditionierten Restaurationsoberflächen mit organischen Substanzen, insbesondere Speichel und Sulkusflüssigkeit. Solche Verunreinigungen können die Haftfestigkeit deutlich reduzieren. Weitere potenzielle Ursachen für eine herabgesetzte Haftfestigkeit sind Anwendungsfehler bei der Verarbeitung der Materialien, wie etwa ungenaue Applikation oder unvollständige Durchmischung. Auch ein geringer Anteil an Schmelz im Bereich der Klebefläche stellt einen Risikofaktor dar, da Schmelz bessere Haftwerte als Dentin aufweist. Zudem kann eine unzureichende Fixierung der Restauration während der Aushärtung insbesondere bei autopolymerisierenden Systemen zu Positionsabweichungen führen. Bei lichtpolymerisierenden Adhäsiven spielt eine vollständige und gleichmäßige Lichtpolymerisation eine zentrale Rolle für die Ausbildung einer stabilen Verbindung.²⁴

Aktuelle Studien belegen, dass adhäsive Befestigungskomposite aufgrund ihrer überlegenen Haftwerte und besseren ästhetischen Eigenschaften den Goldstandard darstellen.⁵³⁻⁵⁵ Selbstätzende Adhäsivsysteme sollten lediglich bei temporären Versorgungen zum Einsatz kommen, wie beispielsweise bei provisorischen Adhäsivbrücken im Rahmen einer implantatprothetischen Therapie.⁵⁶

Viele Hersteller bieten korrespondierende Try-In-Pasten zu den Befestigungskompositen an, um den Farbeinfluss des Komposits auf die Restauration vor der definitiven Befestigung abschätzen zu können.⁵⁷

2.3. Künstliche Alterung

Um das Langzeitverhalten von dentalen Werkstoffen zu erforschen und damit auch mögliche Schwachstellen identifizieren zu können, werden Materialien vor dem klinischen Einsatz in vitro gealtert. Dabei simulieren verschiedene Verfahren die unterschiedlichen Einflüsse, denen die Werkstoffe klinisch ausgesetzt sind. Da für Farbalterungsprozesse in der Zahnmedizin derzeit keine spezifische ISO-Norm existiert, orientierten sich die in dieser Untersuchung gewählten Vorgehen an in der Fachliteratur etablierten Verfahren. Häufig verwendete

Verfahren zur Untersuchung von mechanischen und hydrothermalen Eigenschaften sind Thermocycling oder rein mechanische Belastungstests. Für Farbuntersuchungen wird häufig die Einlagerung in Lagerungsmedien mit Farbpartikeln gewählt.⁵⁸⁻⁶²

Die thermozyklische Alterung von Prüfkörpern stellt ein anerkanntes Verfahren in der zahnärztlichen Werkstoffkunde dar. Zur Nachbildung der thermischen Belastung durch beispielsweise heiße und kalte Getränke im feuchten Milieu des Mundes werden die Prüfkörper in einem offenen Halter abwechselnd in 5 °C kaltes und 55 °C warmes, destilliertes Wasser getaucht. Durch die wiederkehrenden Temperaturwechsel entstehen thermische Spannungsunterschiede an der Oberfläche der Prüfkörper. Neben der thermischen Alterung spielt auch die permanente Einwirkung der feuchten Umgebung eine bedeutende Rolle für die Materialeigenschaften von Kompositen. Wasser wird vom Material absorbiert, fungiert dabei als Weichmacher und kann zur Hydrolyse chemischer Bindungen innerhalb der Polymermatrix führen.⁶³⁻⁶⁵ Die reine Lagerung in warmem Wasser (min. 37 °C warm) ohne Temperaturschwankungen stellt eine weitere Möglichkeit der hydrothermalen Alterung dar.

Neben der thermischen und wässrigen Einwirkung müssen die Materialien der Beanspruchung durch Bestandteile des Speichels und der Nahrung standhalten. Zur Nachbildung werden in vitro unterschiedliche Lagerungsmedien eingesetzt, die eine Alterung unter realitätsnahen Bedingungen simulieren und Rückschlüsse auf die Veränderung mechanischer und ästhetischer Eigenschaften ermöglichen. Zum Einsatz kommen dabei unter anderem destilliertes Wasser, physiologische Kochsalzlösung (NaCl), künstlicher Speichel, Genussmittel wie Tee, Kaffee, Rotwein oder Alkohol, farbstoffhaltige Substanzen wie Curry sowie Noxen wie Tabak.⁶⁶

Darüber hinaus müssen dentale Werkstoffe mechanischen Kräften wie Kaubelastungen standhalten. Zur Simulation dieser können Werkstoffe in speziellen Kausimulatoren einer künstlichen Alterung unterzogen werden.^{66,67} Ein Beispiel hierfür ist der computergesteuerte Willytec-Kausimulator, in dem definierte vertikale und horizontale Bewegungsabläufe zwischen einem Prüfkörper und einem antagonistischen Gegenkörper nachgebildet werden. Nach Abschluss der Simulation lassen sich die abrasiven Veränderungen sowohl auf der Oberfläche des Prüfkörpers als auch am Antagonisten analysieren.⁶⁸ Die wiederholte mechanische Beanspruchung durch simulierte Kaubelastung erfolgt in Form zyklischer vertikaler Kräfte, die im nicht-destruktiven Bereich liegen und somit kein sofortiges Materialversagen hervorrufen. Anhand der Anzahl der Belastungszyklen bis zum strukturellen Versagen bei konstanter Kraft kann das Ermüdungsverhalten des getesteten Materials beurteilt werden.^{66,67}

2.4. Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Ziel dieser experimentellen In-vitro-Untersuchung war es, den Einfluss künstlicher Alterungsprozesse auf die Farbstabilität verschiedener Befestigungskomposite zu analysieren.

Die zu klärenden Forschungsfragen lauteten:

1. Ist ein Farbeinfluss durch Alterungsprozesse in Lagerungsmedien bei adhäsiv befestigten Keramikveneers messbar?
2. Sind mögliche Farbabweichungen bei verschiedenen Befestigungskompositen messbar unterschiedlich?
3. Beeinflusst die Stumpffarbe die Farbstabilität?
4. Beeinflusst die Größe der Spaltbreite der Befestigungsfuge die Farbabweichung der gealterten keramischen Restauration messbar?
5. Ist das Ausmaß ggf. vorhandener Farbabweichungen abhängig von der Messposition am Zahn?

Die zu widerlegenden Nullhypothesen lauteten:

1. Es gibt keinen klinisch relevanten Effekt auf die Farbe von adhäsiv befestigten Keramikveneers abhängig vom Alterungsprozess der Restauration.
2. Die Farbabweichung der Befestigungskomposite ist bei allen untersuchten Befestigungskompositen gleich.
3. Die Stumpffarbe hat keinen Einfluss auf die Farbstabilität.
4. Die Farbveränderung ist bei 50 µm und bei 80 µm Spaltbreite der Befestigungsfuge gleich.
5. Es gibt keinen farblich messbaren Unterschied zwischen den Randbereichen (mesial/distal) und den zentralen Bereichen der Restauration.

3. Material und Methoden

3.1. Material

Die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten 270 Prüfkörper wurden im Rahmen eines übergeordneten Forschungsprojekts der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik hergestellt. Der Herstellungsprozess erfolgte nach dem von Brackhagen²⁵ und Binner⁶⁹ beschriebenen Protokoll. Die nachfolgenden Abschnitte 3.1.1.-3.1.5. fassen diese standardisierten Abläufe zusammen, um die methodische Grundlage für die in dieser Untersuchung durchgeführten Alterungsprozesse und Farbmessungen darzustellen.

3.1.1. Materialien der Prüfkörper

Jeder Prüfkörper bestand aus einem gedruckten Zahnstumpf (FREEPRINT temp 385, Detax GmbH) mit einem darauf adhäsiv befestigten Veneer. Die Zahnstümpfe lagen in den Vita-Farben A1, A2 und A3 vor.

Die Veneers wurden aus IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent AG) in A2 HT mit einer Materialschichtstärke von 0,4 mm gefertigt und mit einem Kristallisationsbrand (IPS e.max CAD Crystall./Glaze Spray Ivoclar Vivadent AG) in einem Sinterofen (Vacumat 6000 M, Vita Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG) fertiggestellt. Sowohl die Stümpfe als auch die Veneers wurden randomisiert in Untergruppen verteilt. Zur adhäsiven Befestigung wurden die in Tabelle 1 dargestellten Befestigungskomposite Variolink Esthetic LC Light + (VE light+), Variolink Esthetic LC Warm + (VE warm+), Panavia Veneer LC Universal (Pan uni), Panavia Veneer LC Clear (Pan clear), G-CEM Veneer Translucent (GC trans) und G-CEM Veneer A2 (GC A2) verwendet.

Befestigungskomposit	Abkürzung	Hersteller
Variolink Esthetic LC Light +	VE light+	Ivoclar Vivadent AG
Variolink Esthetic LC Warm +	VE warm+	Ivoclar Vivadent AG
Panavia Veneer LC Universal	Pan uni	Kuraray Co., Ltd.
Panavia Veneer LC Clear	Pan clear	Kuraray Co., Ltd.
G-CEM Veneer Translucent	GC trans	GC Corporation
G-CEM Veneer A2	GC A2	GC Corporation

Tabelle 1 - Befestigungskomposite

3.1.2. Herstellung der Zahnstümpfe

Sowohl die Zahnstümpfe als auch die Veneers entstanden innerhalb eines digitalen Workflows. Die Zahnstümpfe wurden auf Basis der STL-Datei einer Masterpräparation des Frascozahnes 21 angefertigt. Für die Herstellung der Kunststoffstümpfe kam ein 3D-Drucker (SolFlex 350, Voco GmbH) zum Einsatz. Dabei wurde die höchste Druckauflösung mit einer Schichtstärke von 25 µm gewählt, was zu einer Oberflächenwelligkeit von ± 15 µm an den gedruckten Stümpfen führte. Insgesamt wurden die Zahnstümpfe in zwölf separaten Druckvorgängen hergestellt, wobei vier Durchgänge pro verwendeter Kunststofffarbe erfolgten.

Nach dem Druckprozess wurden die Stümpfe in mehreren Schritten mit Isopropanol gereinigt. Zunächst fand eine grobe Reinigung ohne Ultraschall statt, um die Resinrückstände zu entfernen. Es folgten eine Zwischenreinigung (2 Minuten Ultraschallbad) und eine Endreinigung (ebenfalls 2 Minuten Ultraschallbad), jeweils in separaten Reinigungsbecken.

Im Anschluss an die Reinigung wurden die Zahnstümpfe getrocknet und in einem Endhärtungsgerät (Otoflash G171, Voco GmbH) mit jeweils 2000 Lichtblitzen in zwei Durchgängen vollständig ausgehärtet.

Vor der Weiterverarbeitung erfolgte eine sorgfältige Überprüfung auf Defekte oder Verunreinigungen. Danach wurden die Zahnstümpfe für drei Minuten in einem Ultraschallbad mit destilliertem Wasser gereinigt.

3.1.3. Herstellung der Veneers

Zur Herstellung der Veneers wurde ein gedruckter Zahnstumpf in ein Oberkiefermodell (Frasco ANA-4 OK) integriert und anschließend mit einem Intraoralscanner (3Shape TRIOS® MOVE+, Straumann Group) digitalisiert. Das so erstellte digitale Modell wurde dann mit dem Ceramill CAD/CAM-System (Amann Girrbach AG) weiterbearbeitet.

Zunächst wurde in der Software Ceramill Mind das Veneer für den Zahn 21 entworfen, wobei eine Spaltbreite von 50 µm und 80 µm sowie eine Materialschichtstärke von 0,4 mm berücksichtigt wurden. Diese Designs wurden in der Ceramill Match genestet und anschließend mit der Ceramill Motion 2 geschliffen. Die geschliffenen Veneers wurden unter Wasserkühlung vom Rohling getrennt und auf eine gleichmäßige Schichtstärke von 0,4 mm ($\pm 0,05$ mm) poliert. Im Rahmen eines Kristallisationsbrandes mit IPS e.max CAD Crystall./Glaze Spray (Ivoclar Vivadent AG) wurden die Veneers im Sinterofen (Vacumat 6000 M, Vita Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG) finalisiert.

Die Passgenauigkeit der Veneers auf den Zahnstümpfen sowie die Materialschichtstärke und der Glanzbrand wurden vor Versuchsbeginn überprüft. Zur Vorbereitung der Versuche wurden alle Veneers zunächst mit einem Dampfstrahler (Steamer X3, Amann Girrbach AG) vorgereinigt und danach für drei Minuten in einem Ultraschallbad mit Isopropanol gereinigt.

3.1.4. Herstellung der Befestigungshilfe

Um eine einheitliche Positionierung der Veneers auf dem Zahnstumpf zu gewährleisten und verklebungsbedingte Farbunterschiede weitestgehend zu minimieren, wurde eine Befestigungshilfe entworfen (Fusion 360, Autodesk, Inc.). Die Befestigungshilfe ermöglichte die exakte Repositionierung der gefertigten Veneers auf dem Arbeitsmodell.

3.1.5. Herstellung der Arbeitsvorrichtung

Es wurde eine spezielle Vorrichtung zur stabilen Positionierung der Kamera sowie eine Haltevorrichtung für das prüfkörpertragende Oberkiefermodell angefertigt. Die Kamerahalterung wurde aus Silikon gefertigt und ermöglichte eine präzise Fixierung der Kamera in einer definierten Position. Dadurch blieben sowohl der Abstand zwischen Kamera und Prüfkörper als auch der Aufnahmewinkel über alle Messungen hinweg unverändert. Dies gewährleistete eine hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse sowie die Reproduzierbarkeit der Messungen.

Zusätzlich wurde der Aufnahmebereich so gestaltet, dass externe Störeinflüsse, insbesondere Lichtreflexionen oder Schattenbildungen, minimiert wurden. Die Messungen fanden in einem abgedunkelten Raum ohne direkten Lichteinfall statt, um mögliche Variationen in der Belichtung auszuschließen. Um den Einfluss des Hintergrundes auf die Farbmessung zu evaluieren, wurden verschiedene Materialien getestet, darunter schwarzer, matter Stoff, weißer oder grauer Stoff sowie eine Phantommaske. Die Analyse ergab, dass die geringste Standardabweichung der Messwerte mit einem schwarzen, matten Hintergrund erzielt wurde, weshalb dieser für die finalen Messungen verwendet wurde.



Abbildung 4 - Versuchsaufbau (aus Brackhagen²⁵)

Zur weiteren Standardisierung wurde bei der späteren Auswertung eine Rasterfolie am Bildschirm angebracht, sodass exakte Farbmessungen der Prüfkörper an identischen Messorten möglich waren.

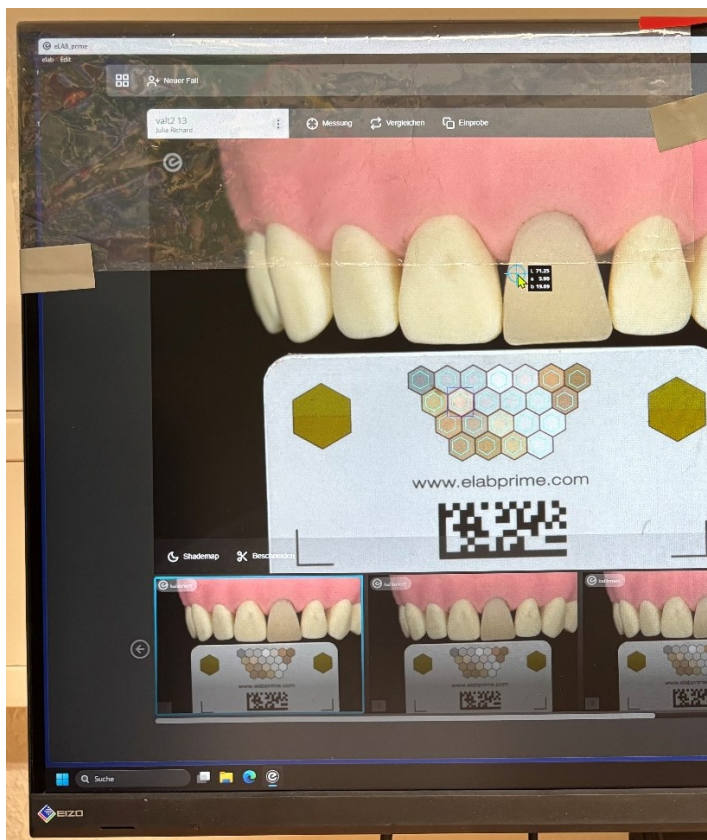


Abbildung 5 - Einheitliche Position der Farbmessung am Zahn durch eine auf dem Bildschirm angebrachte Folie

3.2. Methoden

3.2.1. Aufbau der Testgruppen

Die insgesamt 270 Prüfkörper wurden randomisiert in verschiedene Gruppen aufgeteilt. Je 27 Veneers mit 50 µm Randspalt wurden pro Zahnstumpffarbe (A1, A2, A3) mit den Befestigungskompositen VE light+, VE warm+, Pan uni, Pan clear, GC trans und GC A2 verklebt. Je 27 Veneers mit einem Spalt von 80 µm wurden mit VE light+, VE warm+, Pan uni und Pan clear befestigt. Die Untergruppengröße von n = 9 wurde auf Grundlage vorangegangener Untersuchungen der Arbeitsgruppe festgelegt. Dabei wurden pro Untergruppe identische Bedingungen hinsichtlich Stumpffarbe, Alterungsmedium, Randspaltbreite sowie des verwendeten Befestigungskomposits berücksichtigt (Abbildung 6-9).

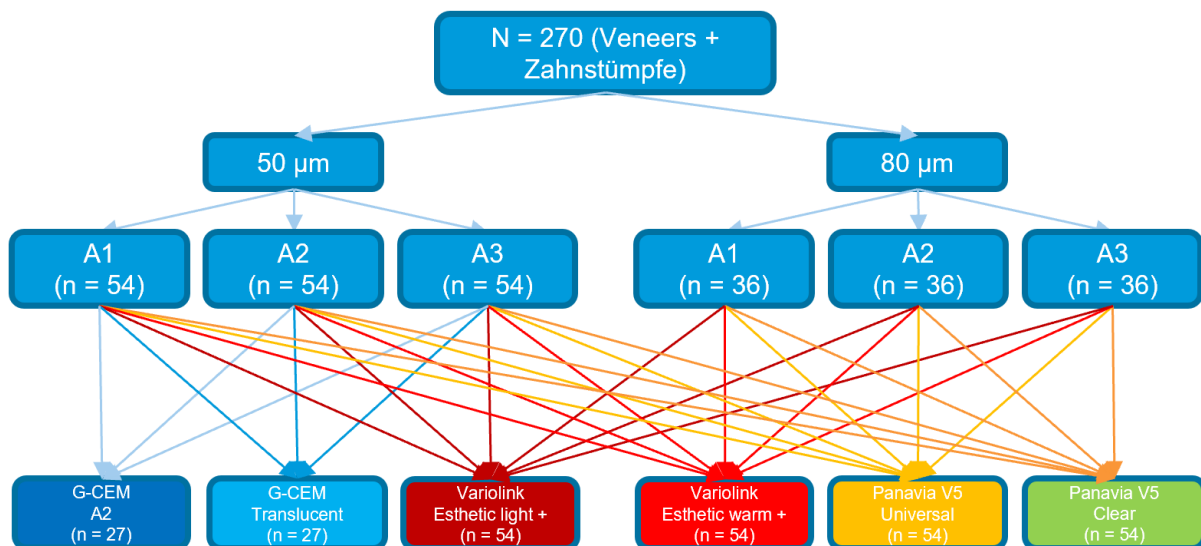


Abbildung 6 - Aufteilung der 270 Prüfkörper nach Schichtstärke des Befestigungskomposits, Stumpffarbe und Befestigungsmaterial

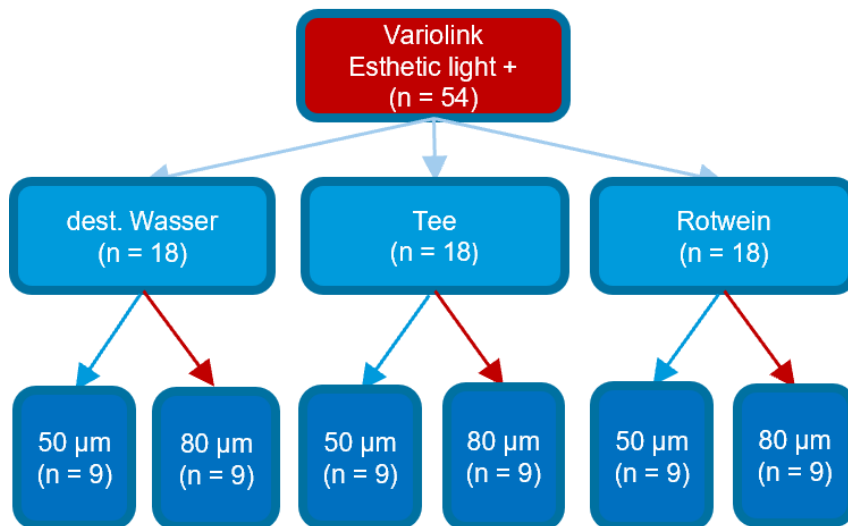


Abbildung 7 - Aufteilung der Prüfkörper auf die Lagerungsmedien bei 50 µm und 80 µm Schichtstärke des Befestigungskomposits am Beispiel von VE light+

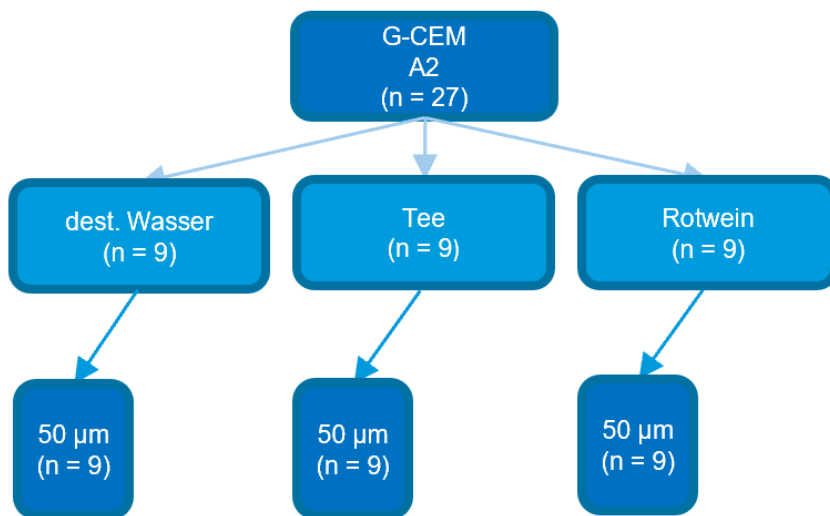


Abbildung 8 - Aufteilung der Prüfkörper auf die Lagerungsmedien bei 50 µm Schichtstärke des Befestigungskomposits am Beispiel von GC A2



Abbildung 9 - Sortierung der 270 Prüfkörper in Kästen nach Befestigungskomposit, Lagerungsmedium, Stumpffarbe und Größe der Befestigungsfuge

3.2.2. Künstliche Alterung

Zur Beurteilung der Farb- und Stabilitätsveränderungen des Befestigungskomposits unter simulierten oralen Bedingungen wurden die Prüfkörper einer standardisierten künstlichen Alterung über einen Zeitraum von 48 Tagen unterzogen. Hierfür wurden die 270 Prüfkörper in drei Gruppen eingeteilt und in drei verschiedenen Medien gelagert: schwarzer Tee, Rotwein und destilliertes Wasser. Das destillierte Wasser diente als Kontrollmedium, da es keine färbenden Substanzen enthält und somit als Vergleichsbasis herangezogen werden konnte.

Um eine gleichmäßige Umspülung der Prüfkörper sicherzustellen und Kreuzkontaminationen zwischen den Färbemedien auszuschließen, wurden pro Aufbewahrungskasten ausschließlich Prüfkörper desselben Mediums gelagert.

3.2.3. Alterungsparameter

Die Lagerung erfolgte unter kontrollierten Bedingungen in einem Brutschrank (MELAG Brutschrank Typ A) bei konstanten 37 °C, um die feuchtwarme Umgebung der Mundhöhle möglichst realitätsnah nachzubilden.



Abbildung 10 - Künstliche Langzeitalterung der Prüfkörper im Brutschrank bei 37 °C

Die Auswahl der Lagerungsmedien, insbesondere schwarzer Tee und Rotwein, erfolgte gezielt, da diese Getränke aufgrund ihres hohen Gehalts an Farbpigmenten häufig mit Verfärbungen dentaler Restaurationsmaterialien in Verbindung gebracht werden. Zur Vermeidung einer bakteriellen Kontamination der Prüfkörper erfolgte ein wöchentlicher Wechsel der Färbemedien. So konnte auch eine möglichst konstante Dosierung der Färbepartikel sichergestellt werden. Die Zubereitung des schwarzen Tees erfolgte nach Packungsanleitung mit destilliertem Wasser.

3.2.4. Messintervalle

Die Farbmessungen der Veneers wurden sowohl vor als auch nach der Alterungsphase mittels digitaler Fotografie und Farbbestimmung durch das eLAB-System durchgeführt. Um die zeitliche Entwicklung der Farbveränderungen zu erfassen, wurden Messungen an vier festgelegten Zeitpunkten vorgenommen. Zu Beginn der Untersuchung ($t = 0$) wurde die Ausgangsfarbe der Veneers im trockenen Zustand bestimmt. Anschließend erfolgte eine siebentägige Lagerung aller Prüfkörper in destilliertem Wasser. Nach dieser Vorbehandlung wurden die Prüfkörper in die jeweiligen Lagerungsmedien überführt, woraufhin nach 14 Tagen ($t = 14$) eine Zwischenmessung stattfand, um erste Veränderungen zu dokumentieren. Nach Abschluss der 48-tägigen ($t = 48$) Lagerungsperiode wurde eine abschließende Messung durchgeführt, um die langfristigen Farbveränderungen zu bestimmen.

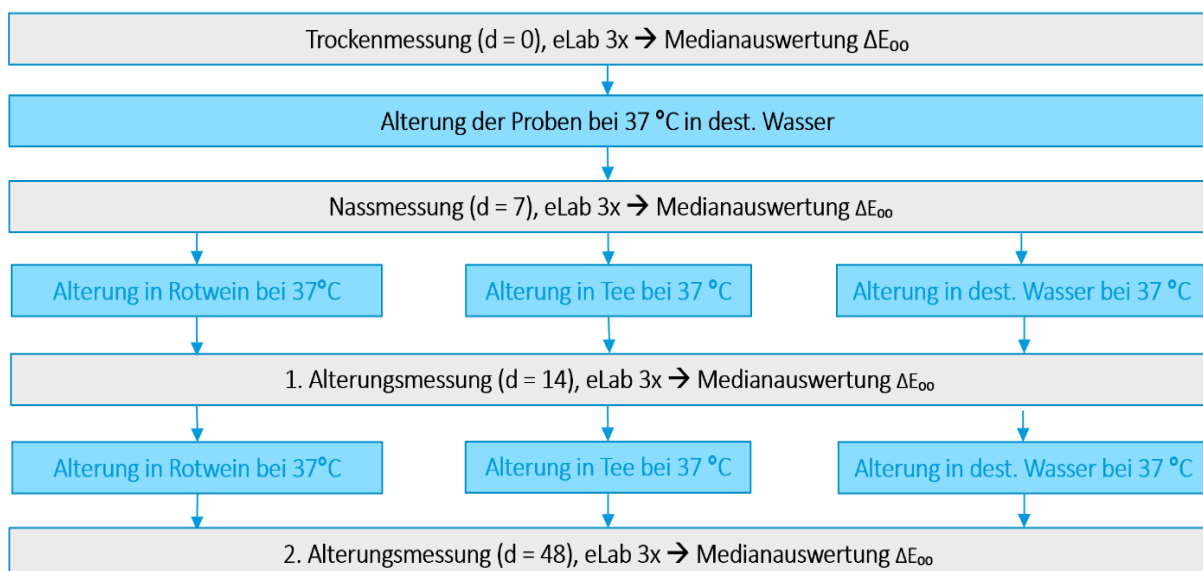


Abbildung 11 - Protokoll zum Ablauf der Messungen

3.2.5. Vorbereitung der Prüfkörper vor Messung

Vor jeder Farbmessung wurden die Prüfkörper für 20 Sekunden in dest. Wasser gelagert und anschließend mittels Druckluft getrocknet, um oberflächliche Ablagerungen und Feuchtigkeitsrückstände zu entfernen.

Die abschließende Auswertung der Messdaten erfolgte durch den Vergleich mit der Kontrollgruppe, um mögliche Unterschiede im Verfärbungsverhalten der verschiedenen Prüfkörper zu analysieren.

3.2.6. Farbmessung

Die Farbmessung der Prüfkörper erfolgte in den jeweiligen Alterungsstadien mittels digitaler Fotografie und nachträglicher Farbbestimmung in eLAB_prime, einer Software zur standardisierten digitalen Zahnfarbbestimmung. Zur Aufnahme wurde eine Spiegelreflexkamera (EOS 6D Mark 2, Canon) mit dazugehörigem Lateralblitz (Macro Twin Lite MT-24EX, Canon) und einem 100 mm Macroobjektiv herangezogen. Ein Kreuzpolfilter (polar_eyes, eLAB) entspiegelte die Aufnahmen (Abbildung 4).²⁵

Jeder Prüfkörper wurde dreifach vermessen, wobei die Farbwerte jeweils zentral auf dem Veneer sowie mesial und distal im Randspaltbereich des mittleren Kronendrittels erfasst wurden (Abbildung 12-14). Der Weißabgleich erfolgte softwaregestützt anhand einer standardisierten Grauwertkarte. Die ermittelten $L^*a^*b^*$ -Farbwerte wurden in das LCh-Farbraumsystem überführt und die Farbabstände gemäß der CIEDE2000-Farbabstandsformel berechnet. Die Farbmessungen erfolgten in Anlehnung an die ISO/TR 28642:2016, welche derzeit die technischen Parameter für die Bestimmung optischer Eigenschaften zahnmedizinischer Materialien sowie die Schwellenwerte für die klinische Akzeptanz definiert.³⁹

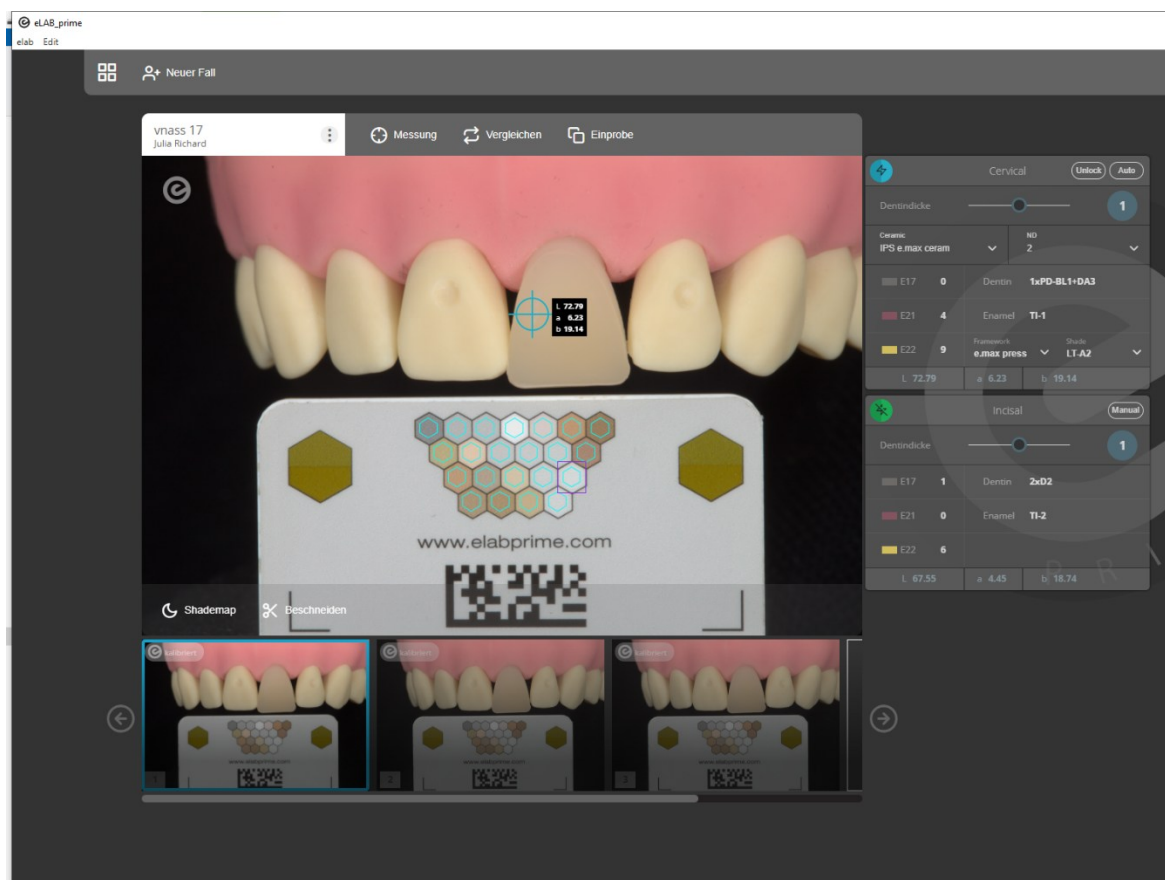


Abbildung 12 - Farbmessung in eLAB mesial

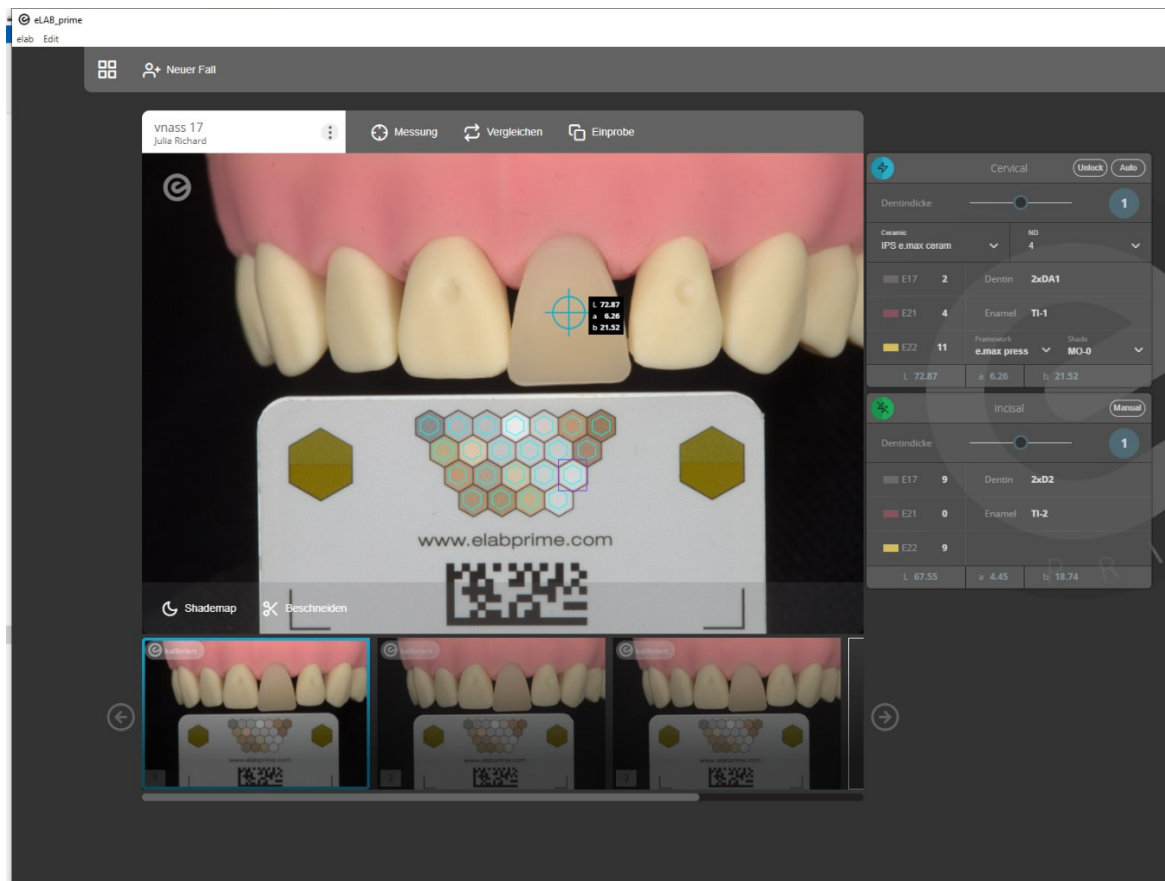


Abbildung 13 - Farbbestimmung in eLAB zentral

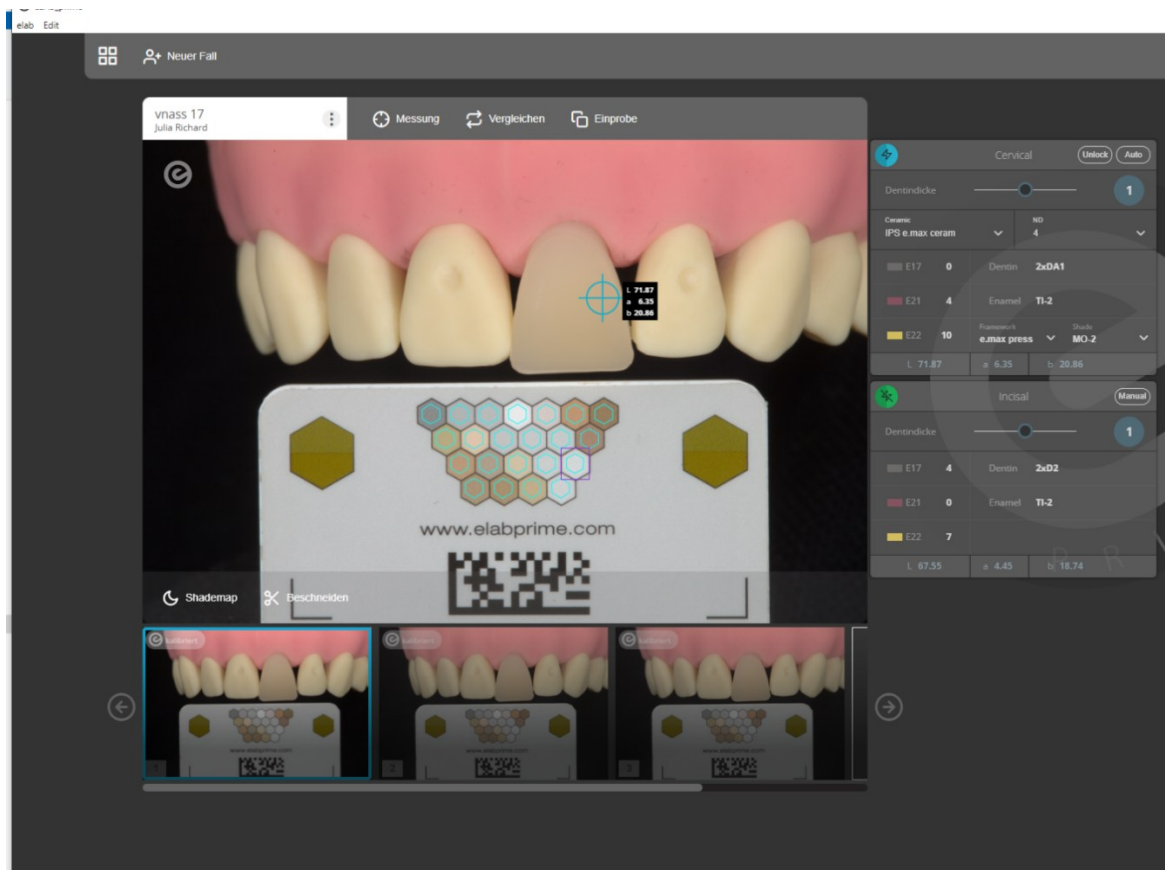


Abbildung 14 - Farbbestimmung in eLAB distal

3.2.7. Messwertauswertung und ΔE_{00} -Berechnung

Die ermittelten Lab-Werte wurden in eine Access-Datenbank (2016) übertragen. Dort wurde der Medianwert der drei wiederholten Messungen bestimmt. Die so ausgewählten Messungen wurden in eine Excel-Tabelle exportiert und das ΔE_{00} zwischen den verschiedenen Prüfkörpern mithilfe der CIEDE2000-Farbabstandsformel berechnet.

3.2.8. Nachuntersuchungen zu einem möglichen Einfluss der Stumpfverfärbung

Um eine potenzielle Beeinflussung der gemessenen Farbveränderungen durch eine Verfärbung der Kunststoffstümpfe zu evaluieren, wurde nach Abschluss der künstlichen Alterung eine gezielte Analyse der untersuchten Prüfkörper durchgeführt. Hierzu wurden zum einen stichprobenartig Querschnitte der gealterten Prüfkörper angefertigt, um mögliche Farbmodifikationen innerhalb der Materialstruktur zu identifizieren. Die Querschnitte wurden in einem Leerrohr mit transparentem Kunststoff eingebettet. Anschließend erfolgte eine sukzessive mechanische Politur (Buehler Phoenix Beta Grinder/Polisher) der Querschnitte in mehreren definierten Stufen bis zu einer Körnung von P1200, um eine optimale Oberflächenqualität für die mikroskopische Untersuchung sicherzustellen.

Für eine differenzierte Betrachtung wurden Querschnitte sowohl in Bereichen mit direkter Materialübergangszone zwischen Kunststoffstumpf, Befestigungskomposit und Verblendmaterial angefertigt als auch in Bereichen, die ausschließlich den Kunststoffstumpf betrafen. Die aufbereiteten Querschnitte wurden unter einem digitalen Mikroskop (Keyence VHX-5000) systematisch auf mögliche Farbveränderungen untersucht. Es wurden sowohl Materialübergangszonen zwischen Stumpf, Befestigungskomposit und Veneer als auch rein kunststoffbasierte Bereiche betrachtet. Die Analyse zeigte Pigmentanlagerungen im Befestigungskomposit, jedoch keine Farbveränderungen im Kunststoff der gedruckten Stümpfe (Abbildung 29-32).

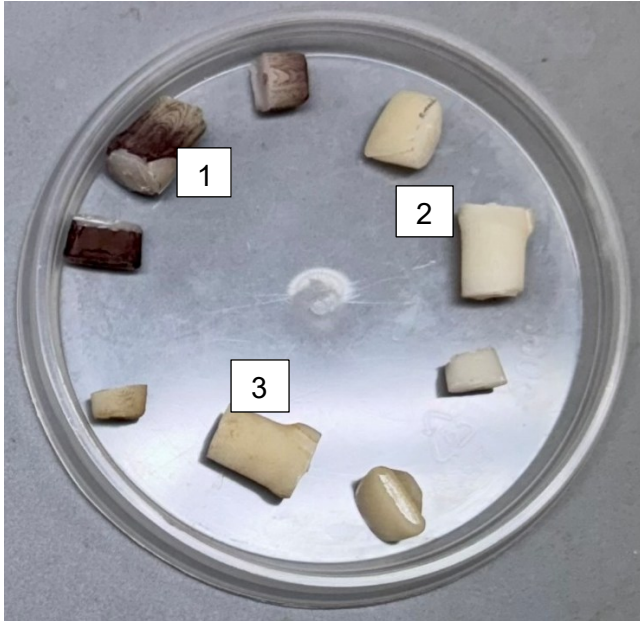


Abbildung 15 - Querschnitte der gealterten Prüfkörper (1: Rotwein, 2: dest. Wasser, 3: Tee)



Abbildung 16 - Politur der in Kunststoff eingebetteten Querschnitte der Prüfkörper

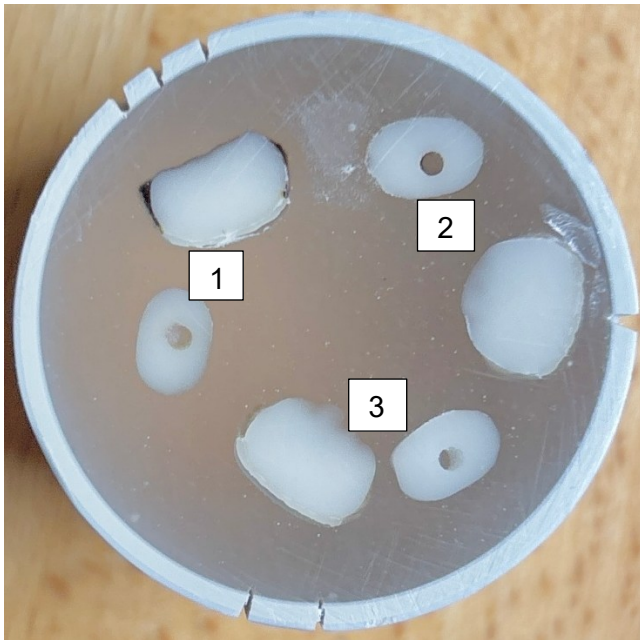


Abbildung 17 - Querschnitte der in Kunststoff eingebetteten gealterten Veneers für die Analyse der Materialverfärbung unter dem Mikroskop (1: Rotwein, 2: dest. Wasser, 3: Tee)

Ergänzend wurden Kunststoffstümpfe ohne aufgeklebte Veneers für einen Zeitraum von 15 Tagen in Färbemedien (Tee und Rotwein) gelagert, gemäß des Versuchsprotokolls künstlich gealtert und anschließend mittels des eLAB-Systems farbmétrisch analysiert.

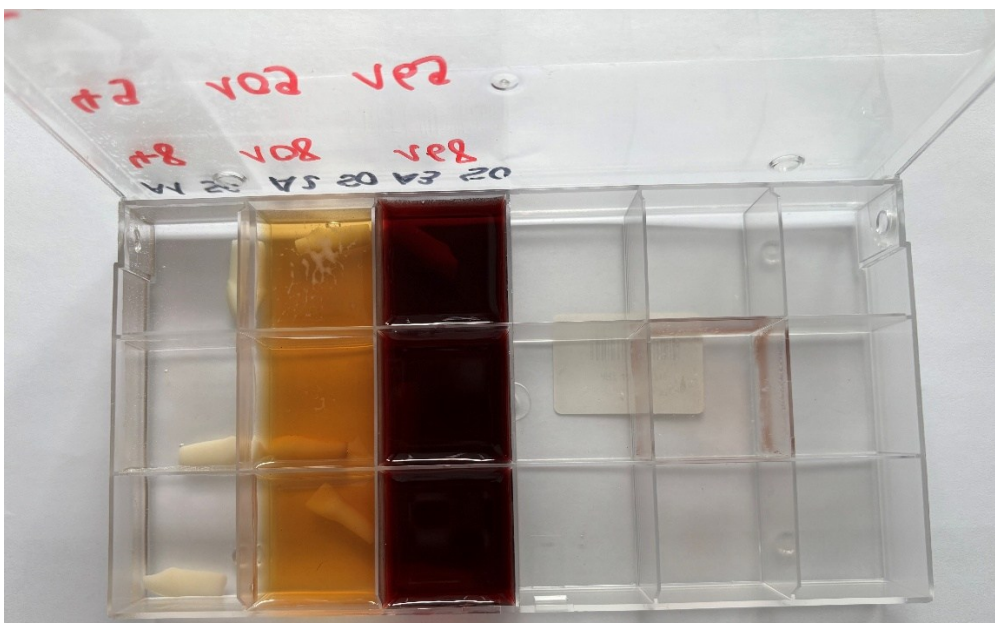


Abbildung 18 - Nachversuch zu einer möglichen Verfärbung der Kunststoffstümpfe nach Alterung in dest. Wasser, Tee und Rotwein

3.2.9. Datenerhebung und Statistik

Alle ermittelten Daten wurden in einer Access-Datenbank (2016) eingetragen und anschließend mit dem Programm IBM SPSS Statistics 28.0 (International Business Machines Corporation) für Windows ausgewertet. Die Überprüfung der Normalverteilung wurde mithilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests durchgeführt. Nicht normalverteilte Proben wurden mit dem Kruskal-Wallis-Test ausgewertet und normalverteilte Stichproben mittels Varianzanalyse und anschließendem Post-hoc-Test nach Duncan auf Signifikanz überprüft.

4. Ergebnisse

Die durch künstliche Alterung entstandenen Farbabstände sind in den nachfolgenden Grafiken durch farbliche Hinterlegung visualisiert. Dabei kennzeichnet Grün einen geringen Farbabstand ($\Delta E_{00} < 0,8$), Gelb einen klinisch akzeptablen Farbabstand ($0,8 < \Delta E_{00} < 1,8$) und Rot einen klinisch nicht akzeptablen Farbabstand ($\Delta E_{00} > 1,8$).⁷⁰

Im Text werden arithmetische Mittelwerte angegeben. Zur Veranschaulichung der Datenverteilung werden Boxplots dargestellt, die den Median und die Quartile wiedergeben. Sämtliche Signifikanztabellen lassen sich dem Anhang entnehmen.

4.1. Vergleich der Befestigungsmaterialien

Abbildung 19 zeigt die Farbabweichung (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite nach 48 Tagen Lagerung der Prüfkörper mit einer Spaltbreite von 50 μm . Randständige Messpositionen wurden zusammengefasst dargestellt. Die statistische Analyse ergab einen hochsignifikanten Einfluss des Befestigungsmaterials auf die Farbveränderung ($p < 0,001$) (Anhang Tabelle 3-5). In Rotwein gealterte Prüfkörper zeigten für VE light+, VE warm+, GC trans und GC A2 untereinander keine signifikanten Unterschiede ($p \geq 0,306$). Ebenso unterschieden sich Pan uni und Pan clear nicht signifikant voneinander ($p > 0,999$) (Anhang Tabelle 2).

Die Kontrollgruppe wies mit einer durchschnittlichen Farbabweichung von $M_{\Delta E_{00}} = 1,219 \pm 0,194$ eine geringe Veränderung weit unterhalb der klinischen Akzeptanzschwelle auf. In Tee gelagerte Prüfkörper zeigten Farbabweichungen oberhalb der klinischen Akzeptanzschwelle bei VE warm+ und Pan clear, wobei VE warm+ die durchschnittlich höchste Veränderung aufwies ($\Delta E_{00} = 2,357 \pm 0,408$) und GC trans die geringste ($\Delta E_{00} = 1,220 \pm 0,356$). Die durchschnittliche Farbabweichung für in Tee gealterte Prüfkörper betrug $M_{\Delta E_{00}} = 1,755 \pm 0,240$. In Rotwein gealterte Prüfkörper wiesen deutlich stärkere Farbabweichungen auf ($M_{\Delta E_{00}} = 7,785 \pm 0,594$). Diese lagen alle weit oberhalb des klinisch akzeptablen Farbabstands. Pan uni zeigte die durchschnittlich höchste Farbveränderung ($\Delta E_{00} = 8,382 \pm 1,456$), während GC A2 mit $\Delta E_{00} = 7,171 \pm 1,431$ die durchschnittlich geringste Farbabweichung aufwies (Anhang Tabelle 2).

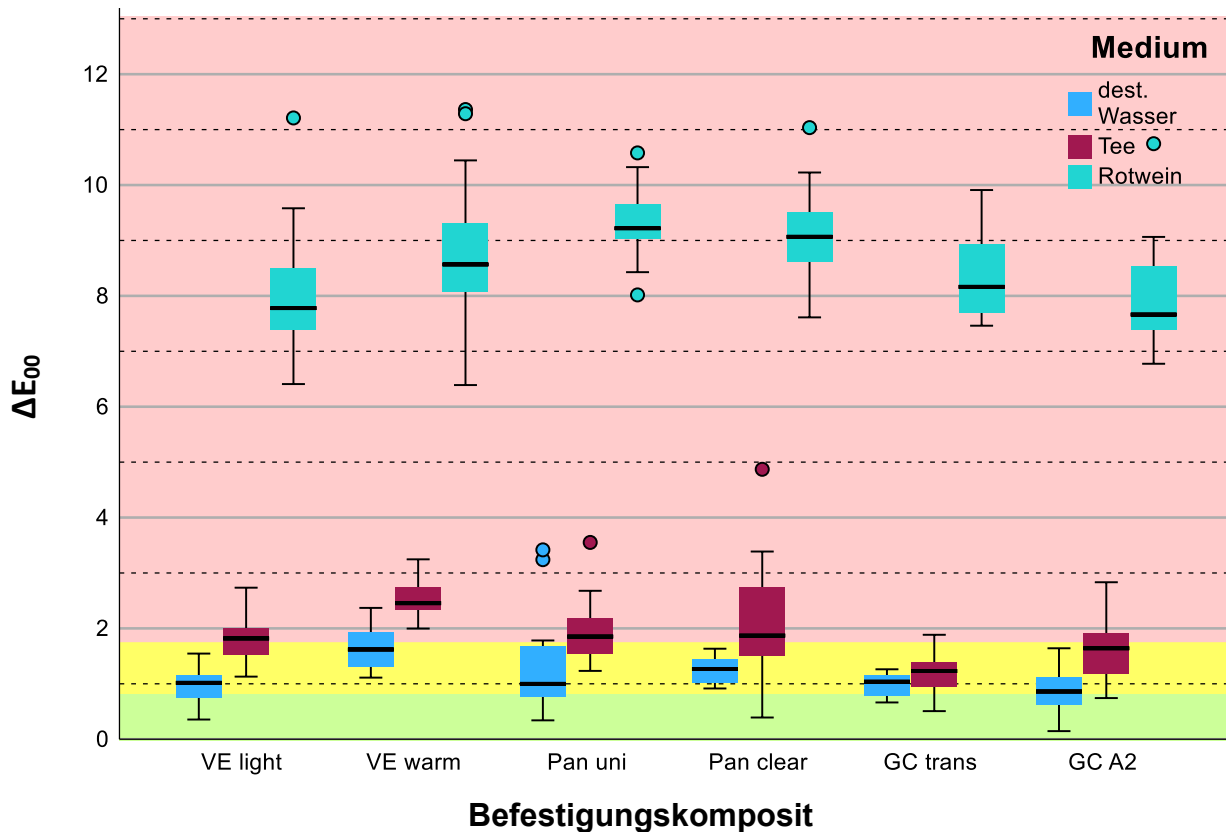


Abbildung 19 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit vom Medium nach 48 Tagen Lagerung bei einer Spaltbreite von 50 μm

4.2. Vergleich verschiedener Stumpffarben

Die Farbdifferenz (ΔE_{00}) der Befestigungskomposite zeigte signifikante Unterschiede in Abhängigkeit von der Stumpffarbe ($p < 0,001$) (Anhang Tabelle 5, 7). Abbildung 20 fasst die randständigen Messpositionen für Prüfkörper mit einer Spaltbreite von 50 μm nach 48 Tagen Lagerung in Rotwein zusammen.

Die statistische Analyse ergab, dass bei den dunkleren Stumpffarben A2 und A3 keine signifikanten Unterschiede auftraten ($p > 0,999$). Hingegen unterschieden sich die Gruppen mit der helleren Stumpffarbe A1 signifikant von A2 und A3 ($p = 0,001$) (Anhang Tabelle 7). Die durchschnittliche Farbdifferenz zwischen den Gruppen A1 und A2/A3 betrug $\Delta E_{00} = 0,603 \pm 0,782$, wobei bei der Stumpffarbe A1 durchschnittlich größere Abweichungen auftraten. Die höchsten Farbwerte wurden für Pan uni in der Stumpffarbe A1 mit durchschnittlich $\Delta E_{00} = 8,854 \pm 1,474$ gemessen, die geringsten Farbwerte für GC A2 in der Stumpffarbe A3 mit durchschnittlich ΔE_{00}

= $7,028 \pm 1,280$. Die Werte lagen für alle Stumpffarben deutlich oberhalb des klinisch akzeptablen Farbabstands (Anhang Tabelle 6).

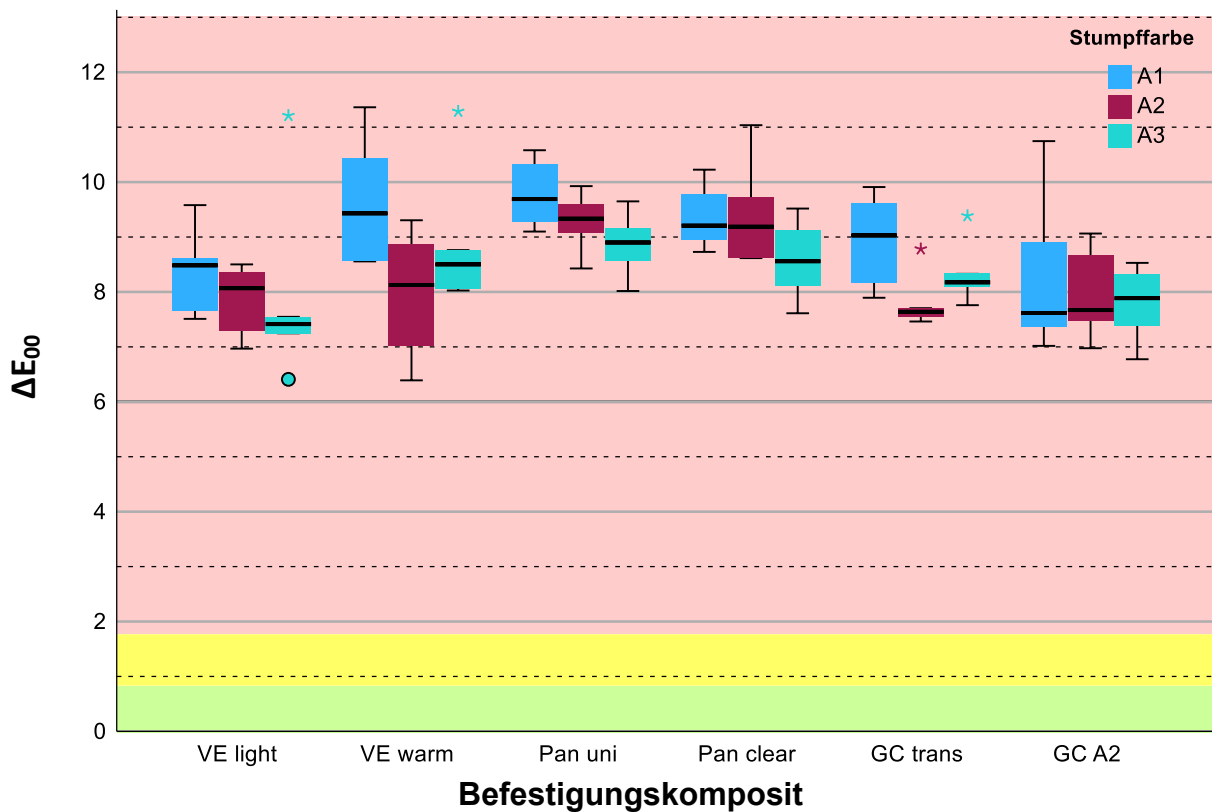


Abbildung 20 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit der Stumpffarbe nach 48 Tagen Lagerung in Rotwein bei einer Spaltbreite von 50 μm

4.3. Vergleich verschiedener Spaltbreiten

Abbildungen 21 und 22 zeigen den Einfluss der Spaltbreiten der Befestigungsfuge bei 50 μm und 80 μm auf die Farbstabilität der Befestigungskomposite an den randständigen Messpositionen mesial und distal. Abbildung 21 stellt die Ergebnisse nach 48 Tagen in schwarzem Tee dar, Abbildung 22 die Ergebnisse nach Lagerung in Rotwein ebenfalls nach 48 Tagen. Die statistische Analyse ergab keinen signifikanten Einfluss der Spaltbreite auf die Farbveränderung ($p = 0,116$) (Anhang Tabelle 9).

In schwarzem Tee betrug die durchschnittliche Farbabweichung $M_{\Delta E_{00}} = 1,928 \pm 0,311$ (50 μm) bzw. $M_{\Delta E_{00}} = 1,799 \pm 0,291$ (80 μm). In Rotwein lag sie bei $M_{\Delta E_{00}} = 7,988 \pm 0,752$ (50 μm) bzw. $M_{\Delta E_{00}} = 7,792 \pm 0,671$ (80 μm). Die Nullhypothese konnte nicht verworfen werden.

Die durchschnittlichen Farbabweichungen waren abhängig vom Lagerungsmedium ($p < 0,001$) (Anhang Tabelle 9). Alle in Rotwein gealterten Prüfkörper wiesen Farbabweichungen deutlich über der klinischen Akzeptanzschwelle auf. Bei den in Tee gealterten Prüfkörpern lagen die mit den Befestigungsmaterialien VE light+ ($\Delta E_{00} = 1,694 \pm 0,435$ (50 μm) bzw. $\Delta E_{00} = 1,625 \pm 0,388$ (80 μm)) und Pan uni ($\Delta E_{00} = 1,675 \pm 0,621$ (50 μm) bzw. $\Delta E_{00} = 1,394 \pm 0,547$ (80 μm)) verklebten Prüfkörper noch im klinisch akzeptablen Bereich, unabhängig von der eingestellten Spaltbreite der Befestigungsfuge (Anhang Tabelle 8).

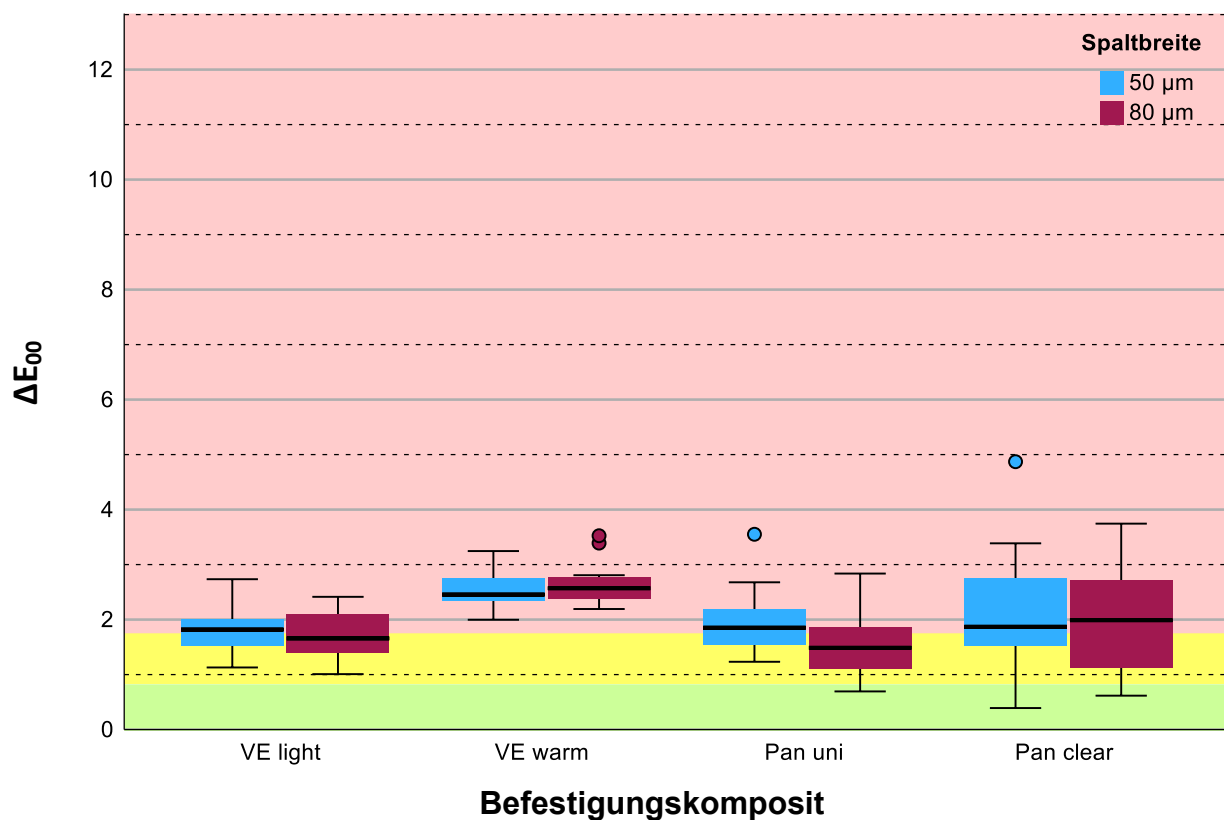


Abbildung 21 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von den Befestigungsfugenbreiten nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Tee

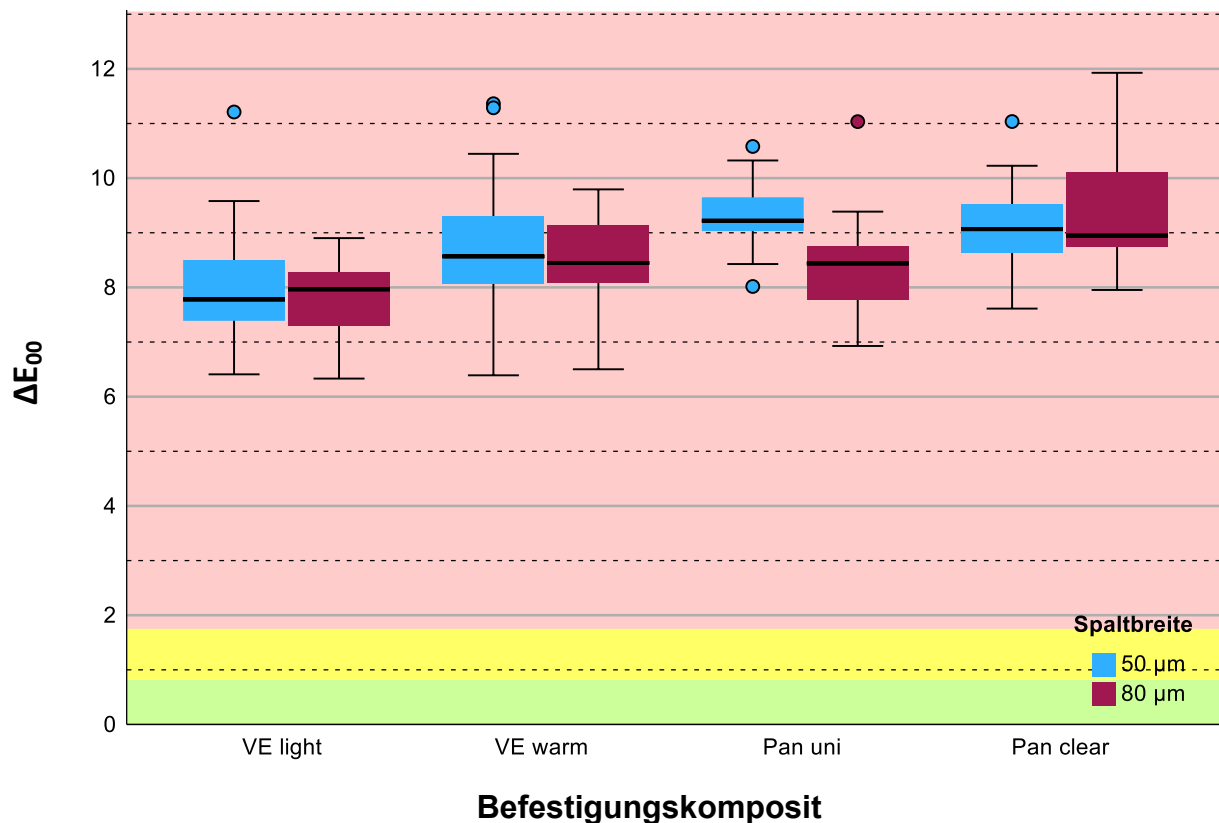


Abbildung 22 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von den Befestigungsfugenbreiten nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Rotwein

4.4. Farbstabilität zentral und im Randbereich

Zur Darstellung der Farbstabilität werden die Komponenten L^* für die Helligkeit, a^* für die Rot-Grün-Achse und b^* für die Gelb-Blau-Achse in diesem Abschnitt einzeln angegeben, um eine genaue Beurteilung der Art der Farbabweichung zu ermöglichen. Für diese Einzelkomponenten existieren keine eigenständigen Grenzwerte. Die CIEDE2000-Formel berechnet den Gesamtabstand durch eine Gewichtung dieser Werte, weshalb nur der ΔE_{00} -Wert für die klinische Beurteilung herangezogen werden kann. Die Einzelwerte dienen folglich der rein qualitativen Analyse der Farbabweichungen.^{34,70,71}

Die Abbildungen 23 und 24 zeigen die ΔL^* -Werte nach 48-tägiger Lagerung in schwarzem Tee bzw. Rotwein für Prüfkörper mit einer Spaltbreite der Befestigungsfuge von 50 μm . Die Messposition erwies sich als signifikanter Einflussfaktor ($p < 0,001$) (Anhang Tabelle 12).

In Abbildung 23 wird deutlich, dass die randständig gemessenen ΔL^* -Werte für die in Tee gealterten Prüfkörper durchweg negativer waren als die zentral gemessenen Werte. Dies wies

auf eine stärkere Verdunkelung mesial und distal hin. Die durchschnittliche Differenz zwischen den randständigen Werten (mesial/distal) und dem zentralen Wert betrug $\Delta L^* = -0,871 \pm 0,834$ (Anhang Tabelle 11). Die stärksten Helligkeitsverluste wiesen VE light+ und VE warm+ auf. GC trans und GC A2 wiesen hingegen zentral mit ΔL^* -Werten von $0,173 \pm 0,510$ bzw. $0,361 \pm 1,103$ leichte Helligkeitszunahmen auf, wobei die vergleichsweise hohen Standardabweichungen bei diesen Gruppen auf eine ausgeprägte Streuung der Einzelwerte hindeuteten (Anhang Tabelle 10).

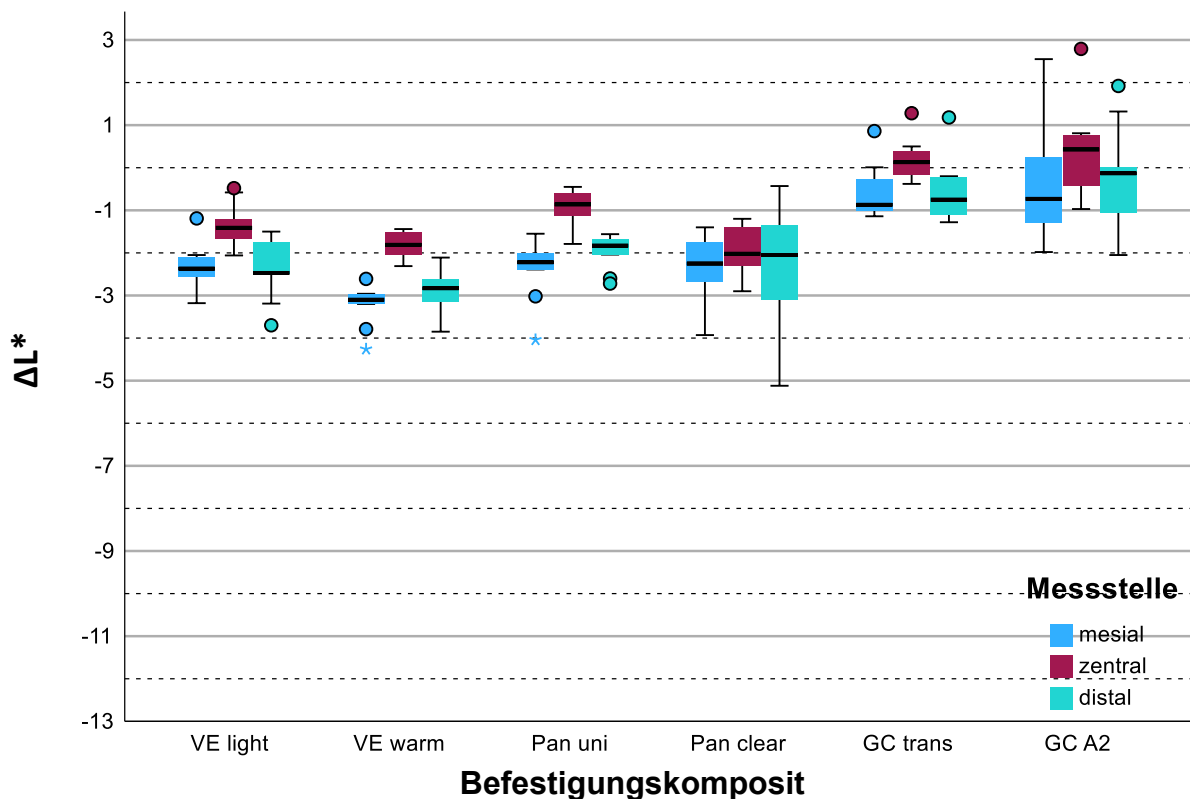


Abbildung 23 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔL^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Tee mit einer Spaltbreite von 50 μm

Bei den in Rotwein gealterten Prüfkörpern sanken die Helligkeitswerte über alle untersuchten Befestigungskomposite hinweg stark. Die durchschnittliche ΔL^* -Wert-Abnahme war an den Rändern mit $M_{\Delta L^*} = -9,722 \pm 0,497$ (mesial) und $M_{\Delta L^*} = -9,388 \pm 0,406$ (distal) deutlich größer als an der zentralen Messposition ($M_{\Delta L^*} = -5,774 \pm 0,310$), was auf eine stärkere Färbepartikelaufnahme bzw. -ablagerung im Randbereich der Prüfkörper schließen ließ (Anhang Tabelle 10).

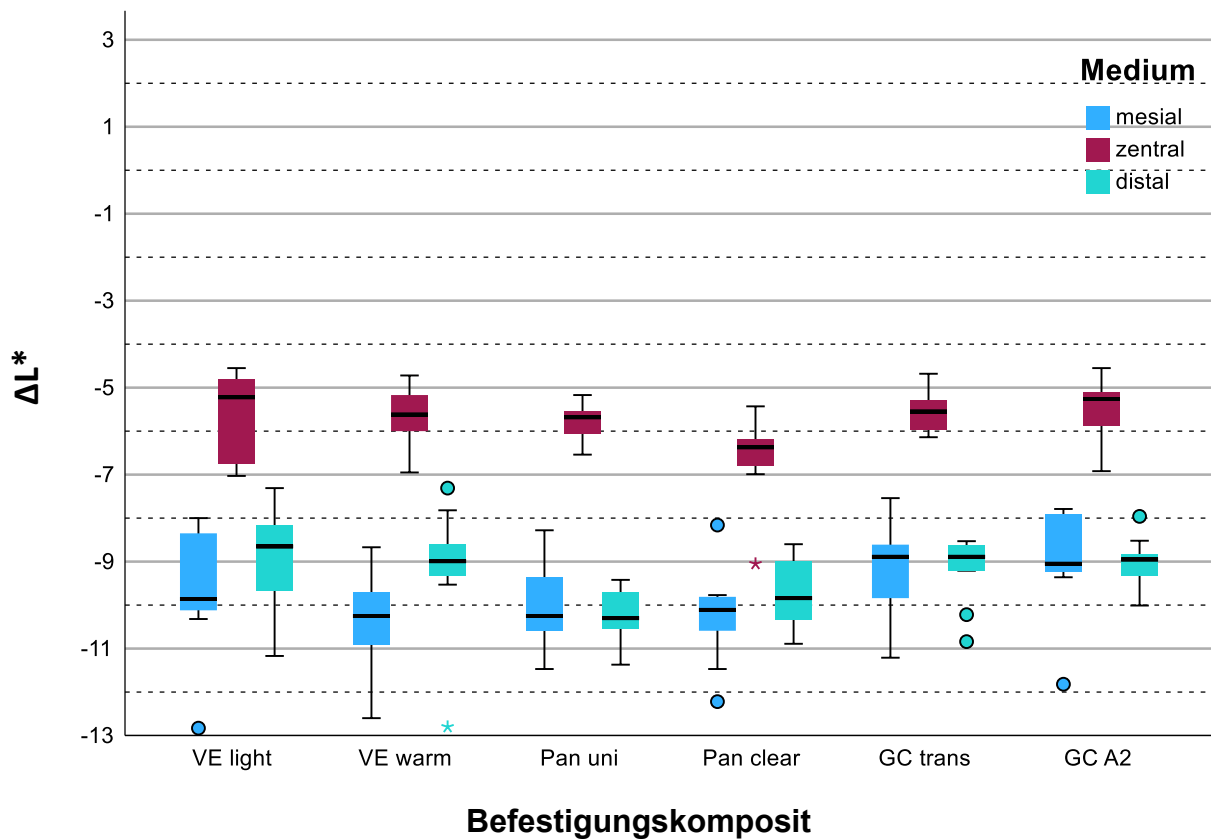


Abbildung 24 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔL^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Rotwein mit einer Spaltbreite von 50 μm

In den Abbildungen 25 und 26 sind die zugehörigen Δa^* -Werte dargestellt.

Die in schwarzem Tee gealterten Prüfkörper (Abbildung 25) zeigten positivere Werte im randständigen Bereich als im zentralen Bereich, was einer stärkeren Rotfärbung am Rand der Prüfkörper entsprach. Die Randbereiche wiesen durchschnittliche Δa^* -Werte von $M_{\Delta a^*} = -0,102 \pm 0,178$ (mesial) bzw. $M_{\Delta a^*} = -0,204 \pm 0,216$ (distal) auf. Zentral lag der durchschnittliche Δa^* -Wert bei $-0,631 \pm 0,159$. Die resultierende Differenz zwischen den randständigen Werten und dem zentralen $M_{\Delta a^*}$ -Wert betrug $0,478 \pm 0,212$ (Anhang Tabelle 10).

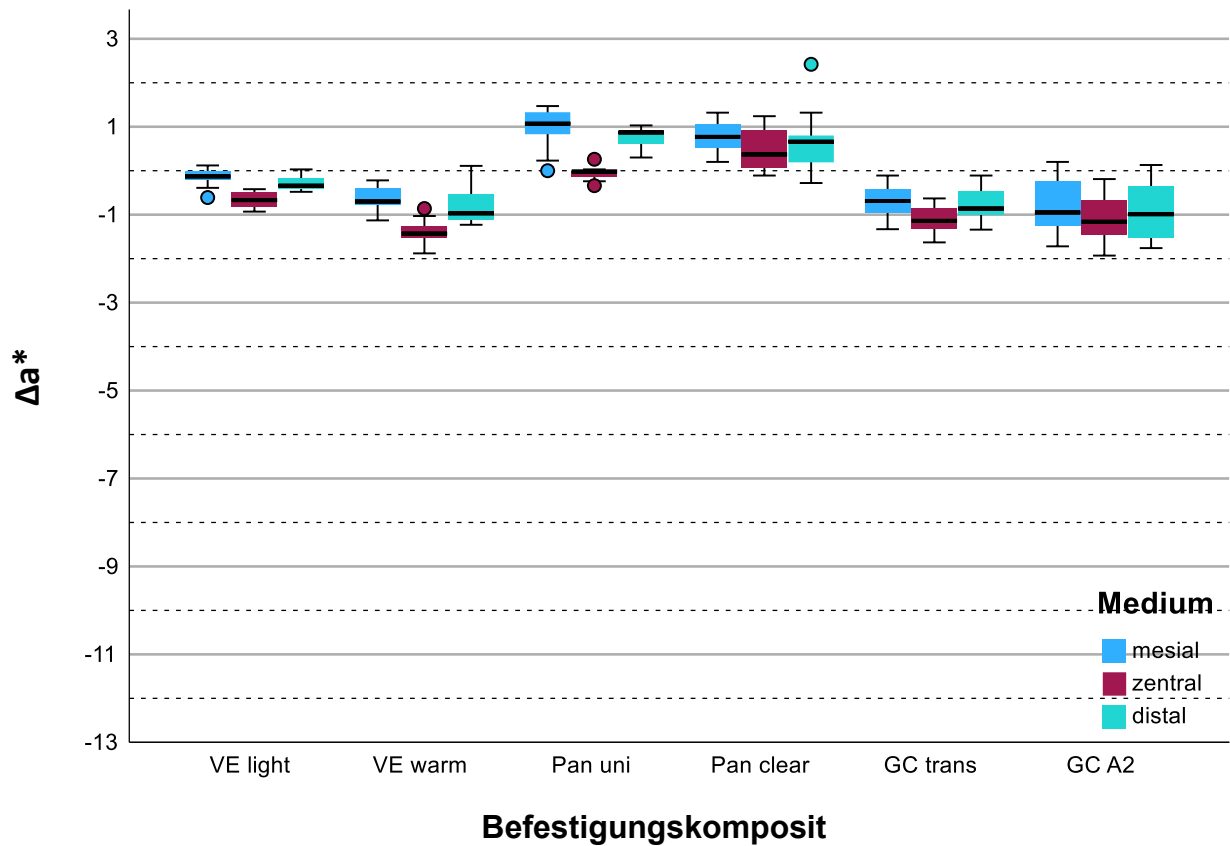


Abbildung 25 - Vergleich der Farbabweichungen (Δa^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Tee mit einer Spaltbreite von 50 μm

Auf der a^* -Achse im $L^*a^*b^*$ -Farbraum führte die Alterung der Prüfkörper in Rotwein (Abbildung 26) zu einer Verschiebung in den grüneren Bereich. Über alle untersuchten Befestigungskomposite hinweg wiesen die randständigen Bereiche eine geringere Grünfärbung auf als die zentralen Bereiche. Die resultierende Differenz zwischen den randständigen Werten und dem zentralen $M_{\Delta a^*}$ -Wert betrug $-1,303 \pm 0,298$ (Anhang Tabelle 10).

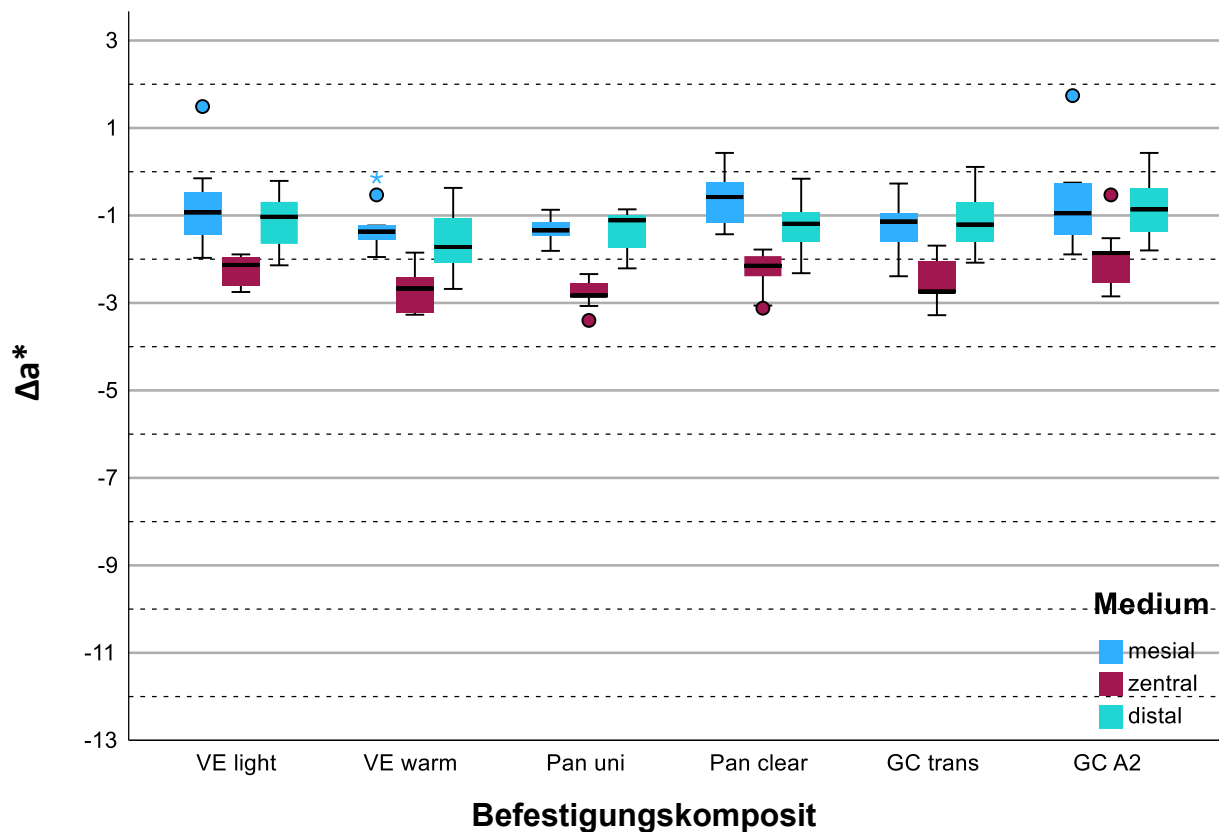


Abbildung 26 - Vergleich der Farbabweichungen (Δa^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Rotwein mit einer Spaltbreite von 50 μm

In den Abbildungen 27 und 28 sind die zugehörigen Δb^* -Werte dargestellt. Die Messposition war für Δb^* signifikant ($p < 0,05$). Anders als für ΔL^* und Δa^* wichen die Messpositionen 1 und 3 (mesial und distal) nicht signifikant voneinander ab ($p = 0,739$) (Tabelle 11).

Bei der Alterung in schwarzem Tee (Abbildung 27) zeigten sich hinsichtlich der Gelb-Blau-Achse b^* messpositionsabhängige Unterschiede. Zentral kam es mit einem durchschnittlichen $M_{\Delta b^*}$ -Wert von $M_{\Delta b^*} = -1,110 \pm 0,305$ zu einer Verschiebung des Farbwerts in den blauen Bereich, während die Prüfkörper randständig mit durchschnittlichen $M_{\Delta b^*}$ -Werten von $M_{\Delta b^*} = 0,077 \pm 0,398$ (mesial) bzw. $M_{\Delta b^*} = 0,203 \pm 0,423$ (distal) positive Werte aufwiesen, was einer Verschiebung des Farbwerts in den gelben Bereich entsprach. Die resultierende Differenz zwischen den durchschnittlichen randständigen Messpositionen und der zentralen Position betrug $1,250 \pm 0,421$ (Anhang Tabelle 10).

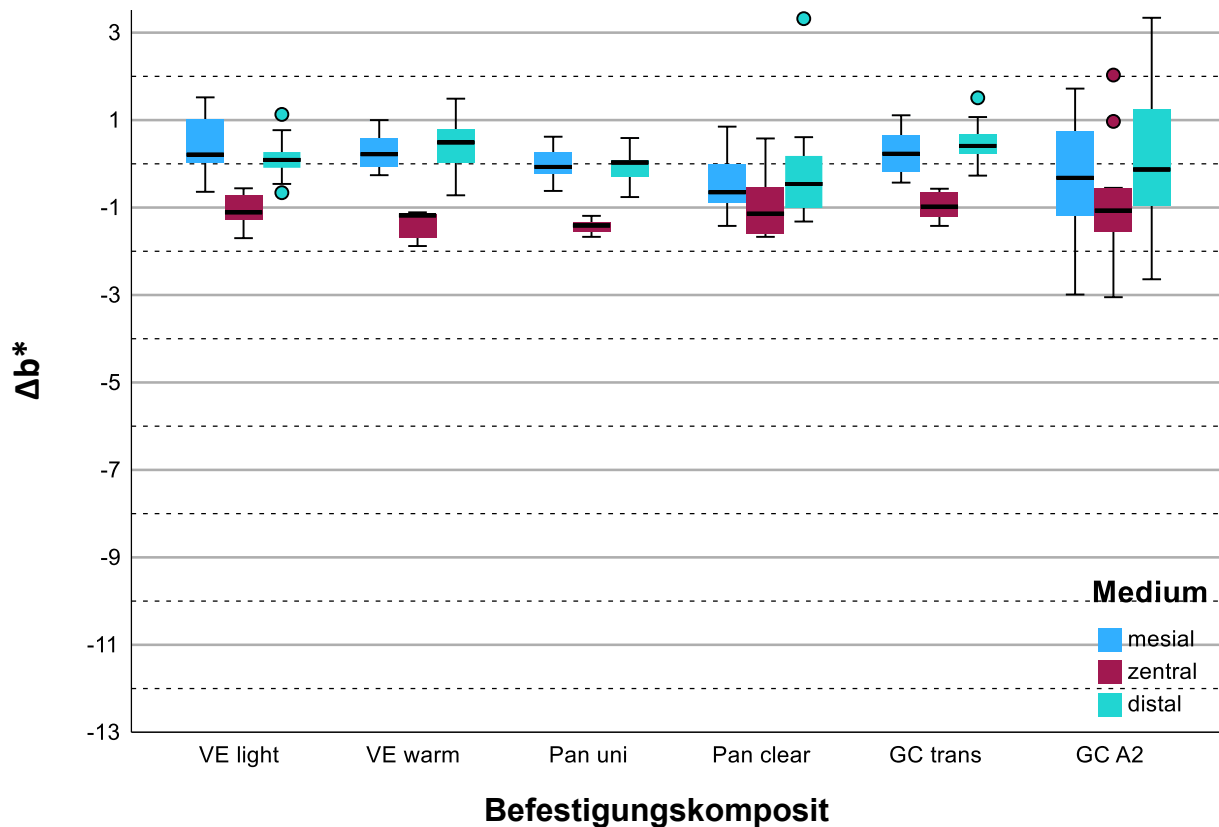


Abbildung 27 - Vergleich der Farbabweichungen (Δb^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Tee mit einer Spaltbreite von 50 μm

Die Alterung der Prüfkörper in Rotwein (Abbildung 28) führte zu einer über alle Messpositionen hinweg konstanten Abnahme der Gelbsättigung bzw. Verschiebung in den blauen Bereich. Die randständigen Messpositionen wiesen durchschnittliche Δb^* -Werte von $M_{\Delta b^*} = -6,446 \pm 0,325$ (mesial) bzw. $M_{\Delta b^*} = -6,435 \pm 0,401$ (distal) auf. Zentral betrug der durchschnittliche Δb^* -Wert $M_{\Delta b^*} = -6,050 \pm 0,264$. Die daraus resultierende Diskrepanz zwischen den randständigen Messpositionen und der zentralen Position war mit $-0,390 \pm 0,369$ für die in Rotwein gealterten Prüfkörper deutlich geringer als für die in Tee gealterten Prüfkörper (Anhang Tabelle 10).

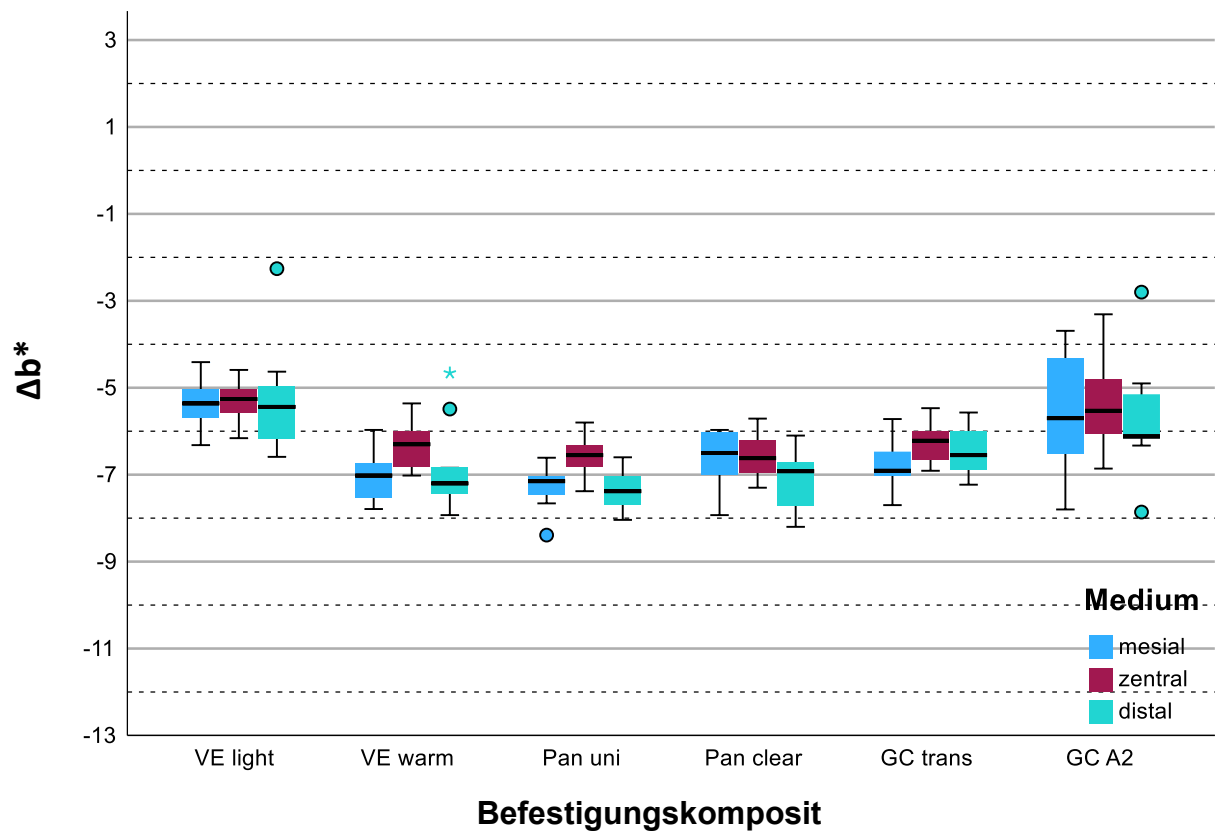


Abbildung 28 - Vergleich der Farbabweichungen (Δb^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Rotwein mit einer Spaltbreite von 50 μm

Auch die Querschnitte der Prüfkörper aus den Nachversuchen zeigten eine deutlich stärkere Verfärbung der Befestigungskomposite am Rand der Restauration (Abbildung 29-32).

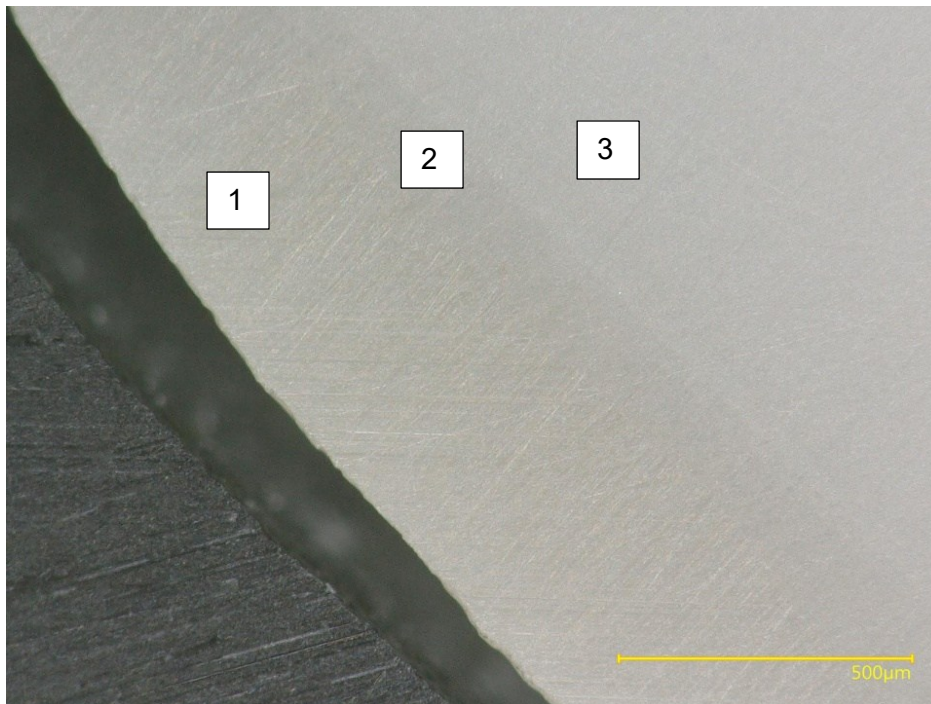


Abbildung 29 – Querschnitt eines in destilliertem Wasser gealterten Prüfkörpers (zentral), 1: Veneer, 2: Befestigungskomposit, 3: Kunststoffstumpf

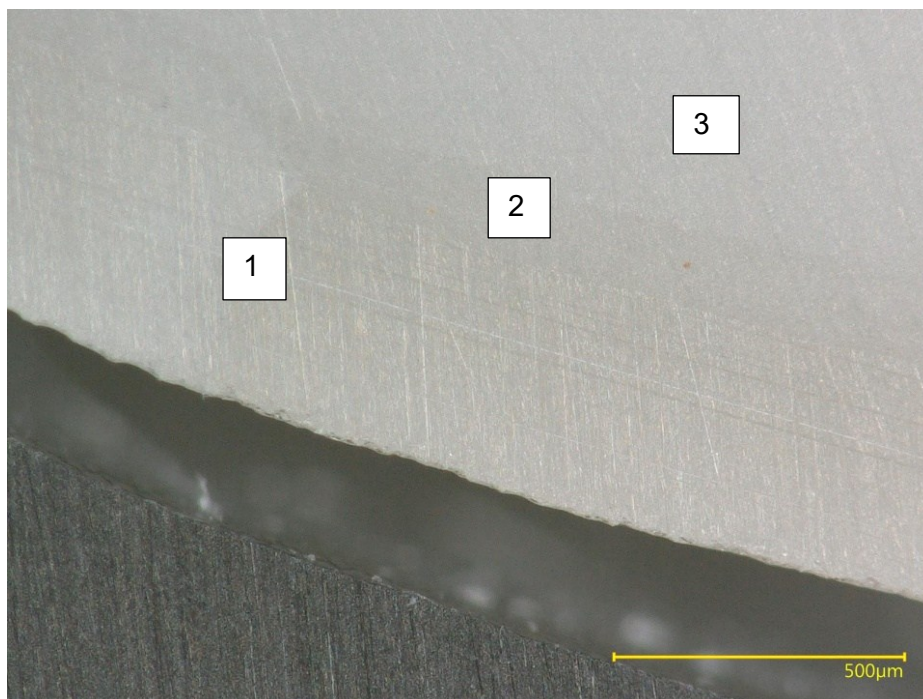


Abbildung 30 - Querschnitt eines in Tee gealterten Prüfkörpers (zentral), 1: Veneer, 2: Befestigungskomposit mit eingelagerten Teepartikeln, 3: Kunststoffstumpf

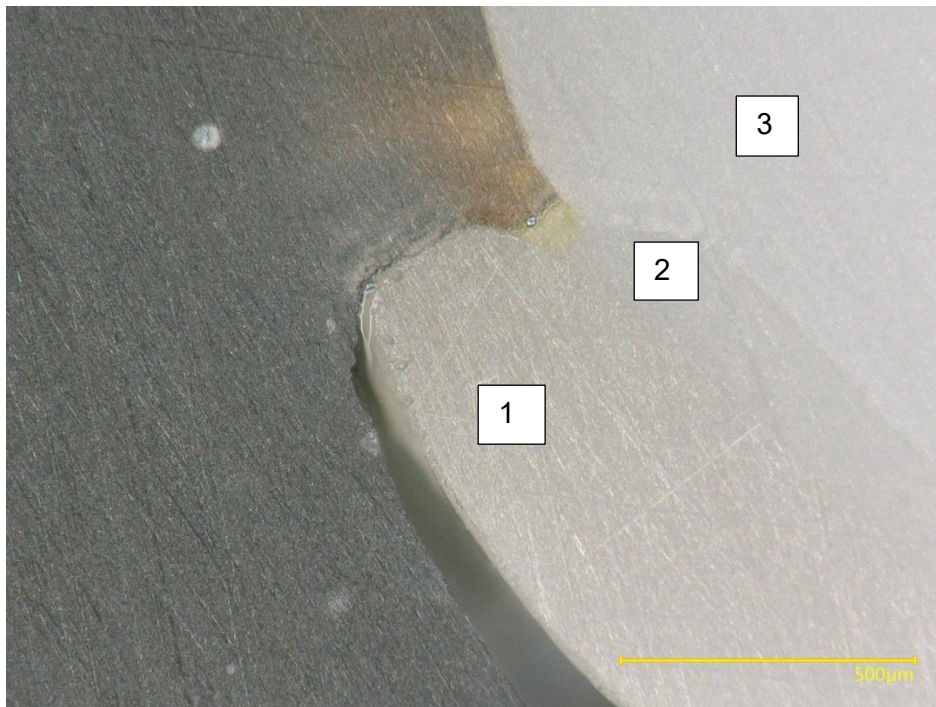


Abbildung 31 - Querschnitt eines in Tee gealterten Prüfkörpers (mesial), 1: Veneer, 2: Befestigungskomposit mit sichtbarer Verfärbung mesial, 3: Kunststoffstumpf

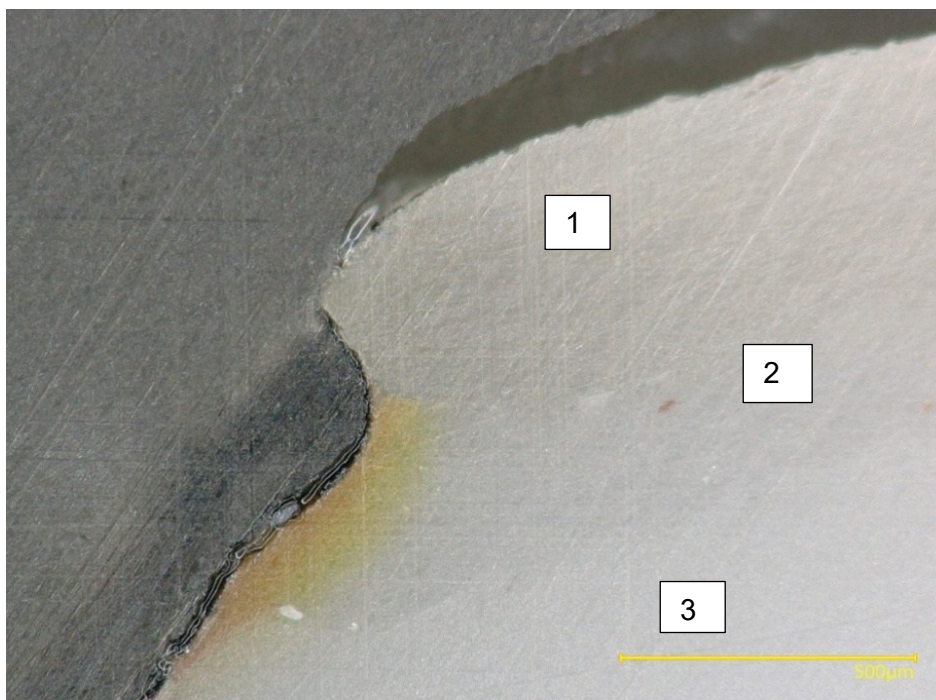


Abbildung 32 - Querschnitt eines in Rotwein gealterten Prüfkörpers (mesial), 1: Veneer, 2: Befestigungskomposit mit sichtbarer Verfärbung mesial und eingelagerten Rotweinpartikeln, 3: Kunststoffstumpf

4.5. Nachversuch

Um eine mögliche Verfärbung des Kunststoffstumpfes durch die Lagerungsmedien auszuschließen, wurden unverklebte Kunststoffstümpfe in Färbemedien (Tee und Rotwein) künstlich gealtert. Die Farbmessung mittels eLAB zeigte eine geringe Verdunklung der Zahnstümpfe im Vergleich zur Kontrollgruppe (Prüfkörper der Hauptuntersuchung). Die maximale Differenz für die Werte der Kontroll- und Nachversuchsgruppe betrug für $\Delta L^* = 0,304$, für $\Delta a^* = 0,131$ und für $\Delta b^* = 0,231$. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass die Kunststoffstümpfe im Versuch durch das adhäsiv befestigte Veneer abgedeckt waren und somit keinem direkten Kontakt mit den Färbemedien ausgesetzt waren. Daher ist der Einfluss der Kunststoffstümpfe auf die gemessene Farbveränderung als vernachlässigbar einzuschätzen.

5. Diskussion

Diese Untersuchung analysierte den Einfluss künstlicher Alterung durch verschiedene Lagerungsmedien auf die Farbstabilität von Befestigungskompositen für Lithiumdisilikatveneers. Die Ergebnisse zeigten, dass die 48-tägige Lagerung in färbenden Medien zu einer deutlichen Farbveränderung der untersuchten Befestigungskomposite führte, die über den klinisch akzeptablen Bereich ($\Delta E_{00} > 1,8$) hinausging. Dies weist darauf hin, dass Befestigungskomposite durch äußere Einflüsse in ihrer Farbkonzanz erheblich beeinträchtigt werden können und folglich die ästhetische Langlebigkeit der Restauration gefährdet sein könnte.

Es zeigte sich, dass mehrere Faktoren einen wesentlichen Einfluss auf die Farbstabilität hatten. Insbesondere die Farbe des Zahnstumpfes, das verwendete Befestigungskomposit, die Position der Farbmessung sowie das Alterungsmedium spielten eine signifikante Rolle. Die Breite der Befestigungsmaterialfuge scheint hingegen keinen nachweisbaren Einfluss auf das Farbverhalten der Befestigungskomposite zu haben.

Im Nachfolgenden werden die angewandte Methodik und die erzielten Ergebnisse dieser Untersuchung kritisch reflektiert und mit bestehenden Studien verglichen, um ihre klinische Bedeutung besser einordnen zu können.

5.1. Diskussion der Methodik

5.1.1. Kunststoffstümpfe

Bei der Interpretation der Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass die Veneers auf standardisierten Kunststoffstümpfen befestigt wurden, um eine hohe Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Trotz der Unterschiede in der Transluzenz gegenüber natürlicher Zahnhartsubstanz war die Verwendung dieser Stümpfe für die Durchführung der Farbmessung essenziell. In Vorversuchen zeigte sich, dass bereits geringfügige Verschiebungen des Messpunktes zu signifikanten Farbdifferenzen führen können. Da eine Stichprobe von 270 anatomisch und farblich identischen natürlichen Zähnen nicht zu akquirieren ist, boten die 3D-gedruckten Kunststoffstümpfe die einzige Möglichkeit, die externe Variabilität zu kontrollieren.

Die Oberflächen der 3D-gedruckten Prüfkörper zeigten eine Welligkeit von $\pm 15 \mu\text{m}$, was möglicherweise Auswirkungen auf die Breite der Befestigungsfuge haben kann. In Vorversuchen der Arbeitsgruppe wurde dieser Wert mit der Oberfläche eines natürlichen Zahns verglichen, der mithilfe eines Rotring-Diamanten präpariert wurde und eine Welligkeit von $\pm 10 \mu\text{m}$ auf-

wies. Da die Differenz gering ausfiel, ist anzunehmen, dass eine vergleichbare Vergrößerung der Spaltbreite auch unter klinischen Bedingungen nach Präparation auftritt.^{25,69}

5.1.2. Externe Farbeinflüsse

Bei der Beurteilung der Messergebnisse ist zu beachten, dass Lithiumdisilikatkeramik im Rahmen ihres Alterungsprozesses intrinsische Farbveränderungen zeigen kann, die sich möglicherweise auf die Messwerte auswirken.⁷² Die Literatur beschreibt diesen Effekt jedoch als deutlich geringer als die in dieser Untersuchung beobachteten Farbabweichungen. So berichten Palla et al. Abweichungen von maximal $\Delta E > 4$, die meisten untersuchten Prüfkörper zeigten lediglich Veränderungen unterhalb des klinisch wahrnehmbaren Niveaus ($\Delta E < 3,7$).⁷³ Die Farbabweichungen der in Rotwein gelagerten Prüfkörper waren in dieser Untersuchung mit durchschnittlich $M_{\Delta E00} = 7,785 \pm 0,594$ nach 48 Tagen deutlich höher. Dies deutet darauf hin, dass die gemessenen Farbveränderungen nicht primär auf die intrinsischen Materialeigenschaften der Keramik zurückzuführen sind. Dass ΔE -Werte bei gleicher visueller Wahrnehmung tendenziell höher ausfallen als die in dieser Untersuchung gemessenen, präziseren ΔE_{00} -Werte, unterstreicht die Relevanz der Ergebnisse zusätzlich.⁷⁰ Es ist davon auszugehen, dass die intrinsische Materialalterung der Keramik einen additiven Beitrag zur Farbmodifikation der Befestigungskomposite unter Alterung geleistet haben könnte, was die gemessenen Verfärbungen weit über den klinisch noch akzeptablen Bereich erklären kann.

Aufgrund der hohen Transluzenz der untersuchten Keramik kann zudem das Stumpfmateriale die Farbwirkung beeinflussen. Nachuntersuchungen belegten jedoch, dass sich Farbpartikel aus Tee und Rotwein verstärkt im Befestigungskomposit anlagerten (Abbildung 29-32), während am Kunststoffstumpf keine messbaren Veränderungen festgestellt wurden. Daraus folgt, dass der Kunststoffstumpf nur eine untergeordnete Rolle bei den beobachteten Verfärbungen spielt.

5.1.3. Einflussanalyse unter kontrollierten Bedingungen

Die durchgeführte Untersuchung fokussierte sich auf die Analyse des Farbverhaltens von Befestigungskompositen unter den kontrollierten Bedingungen einer künstlichen Alterung. Die Evaluation erfolgte auf Grundlage einer standardisierten Einlagerung der Prüfkörper in drei verschiedenen Färbemedien. Gleichzeitig wurden weitere potenzielle Einflussfaktoren ausgeklammert, um eine Verzerrung des Ergebnisses durch externe Variablen auszuschließen. Es handelt sich um eine In-vitro-Untersuchung. Weiterführende In-vivo-Studien sind erforderlich, um die klinische Übertragbarkeit dieser Ergebnisse zu validieren und die Vielzahl weiterer Fak-

toren der Mundhöhle zu untersuchen. Zusätzliche in der Literatur beschriebene relevante Einflussgrößen sind Schwankungen des pH-Werts im Speichel durch spezifische Ernährungsgewohnheiten oder pathologische gastroösophageale Einflüsse sowie thermische Veränderungen durch den Verzehr von heißen oder kalten Speisen.⁵⁸ Auch individuelle Unterschiede in der Frequenz und Effektivität der Mundhygiene sowie weitere Noxen wie beispielsweise Tabakkonsum sind zu berücksichtigen.

Dies kann eine mögliche weitere Erklärung für die gemessenen hohen Farbabweichungen weit über den klinisch akzeptablen Bereich hinaus sein. Faktoren wie die häusliche Mundhygiene, professionelle Zahnreinigungen und die neutralisierende Wirkung des Speichels unterbrechen die permanente Zufuhr von färbenden Partikeln aus der Nahrung und könnten farbneutralisierend wirken.

5.1.4. Gültigkeitsbereich der Ergebnisse

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Keramiken und Materialstärken ist zudem eingeschränkt. In dieser Untersuchung wurden 0,4 mm dicke, hochtransluzente Lithiumdisilikatveneers verwendet. Aufgrund ihrer hohen Lichtdurchlässigkeit könnten Farbveränderungen stärker sichtbar sein als bei opakeren Keramiken oder Keramiken mit größerer Schichtstärke, welche Verfärbungen durch eine reduzierte Lichtdurchlässigkeit möglicherweise abschwächen oder maskieren.^{8,9} Die Ergebnisse dieser Untersuchung gelten ausschließlich für die verwendeten Materialien und können daher nicht verallgemeinert werden.

5.2. Diskussion der Ergebnisse

5.2.1. Farbabweichungen nach Alterung

In der Untersuchung wurden deutliche Farbänderungen der Befestigungskomposite durch künstliche Alterung nachgewiesen. Die gemessenen Farbabweichungen überschritten den klinisch akzeptablen Bereich von $\Delta E_{00} < 1,8$ und gefährden damit die ästhetische Langzeitstabilität. Besonders ausgeprägt waren die Farbveränderungen bei den in Rotwein gelagerten Prüfkörpern, die am Ende des Versuchszeitraums mittlere ΔE_{00} -Werte von $M = 7,785 \pm 0,594$ aufwiesen. Diese Ergebnisse stimmen mit anderen Untersuchungen überein, die Farbabweichungen von bis zu $\Delta E = 10,4 \pm 0,9$ (Alterung im QUV Accelerated Weathering Tester (Q-Lab, USA), Messung mittels Spektralfotometer) dokumentierten.¹⁷ Zudem zeigte sich eine signifikante Reduktion der L^* -Werte nach der Alterung der Prüfkörper.⁷²

In dieser Untersuchung wies auch die Kontrollgruppe Farbabweichungen von durchschnittlich $M_{\Delta E_{00}} = 1,219 \pm 0,194$ auf, welche unterhalb der klinischen Akzeptanzschwelle von $\Delta E_{00} = 1,8$ lagen. Dabei korrespondieren die hier ermittelten Werte in hohem Maße mit den Erkenntnissen von Pissaia et al., welche für verschiedene lichthärtende und dualhärtende Komposite nach einer dreißigtägigen künstlichen Alterung in destilliertem Wasser bei konstanten 37 °C Farbabweichungen im Bereich von $\Delta E = 1,25-2,82$ nachwiesen. Damit belegten sie, dass rein wasserinduzierte künstliche Alterungsprozesse über längere Zeiträume hinweg zu messbaren Farbabweichungen führen, die aber deutlich unterhalb der klinischen Akzeptanzschwelle verbleiben.⁷⁴

Eine Erklärung für das Phänomen liefert eine Untersuchung von Luo et al., die im Rahmen einer Langzeitbeobachtung von 180 Tagen die Korrelation zwischen Wasseraufnahme, Löslichkeit und Farbstabilität bei zehn verschiedenen Befestigungskompositen evaluierten. Die Autoren konnten zeigen, dass die kontinuierliche Diffusion von Wassermolekülen in die Polymerstruktur des Befestigungskomposits zu einer reversiblen Quellung und zu einer Freisetzung von Restmonomeren führt. Mit der gesteigerten Löslichkeit der Matrixbestandteile geht eine hydrolytische Degradation des Werkstoffs einher.⁷⁵ Auch das medienabhängige Verfärbungsmuster Rotwein > Tee > destilliertes Wasser wird durch frühere Studien bestätigt.⁷⁵

5.2.2. Vergleich der Befestigungsmaterialien

Ein zentraler Aspekt dieser Untersuchung war der Einfluss der Befestigungskomposite auf die Farbveränderung. Die statistische Auswertung zeigte, dass die Nullhypothese, welche eine Unabhängigkeit der Farbveränderung vom verwendeten Produkt annahm, verworfen werden

konnte ($p < 0,001$). Dies entspricht früheren Studien, die einen signifikanten Einfluss des verwendeten Befestigungskomposits auf die Farbstabilität belegten.^{76,77}

In dieser In-vitro-Untersuchung wies GC A2 unter den untersuchten Produkten die geringsten Farbveränderungen bei Alterung in destilliertem Wasser und Rotwein auf. Bei künstlicher Alterung in schwarzem Tee schnitt GC A2 als zweitbestes Produkt nach GC trans ab. Insgesamt erzielten die Produkte der GC Corporation (GC trans, GC A2) im Rahmen der vorliegenden Untersuchung die besten Ergebnisse, gefolgt von Materialien der Ivoclar Vivadent AG (VE light+, VE warm+) und schließlich Kuraray Co., Ltd. (Pan uni, Pan clear) (Anhang Tabelle 2). Obwohl die statistische Auswertung signifikante Unterschiede zwischen den verwendeten Befestigungskompositen zeigte ($p < 0,001$), muss deren Bedeutung für die Praxis kritisch hinterfragt werden, denn alle gealterten Befestigungskomposite wiesen Farbabweichungen weit über die Akzeptanzschwelle ($\Delta E_{00} = 1,8$) hinaus auf. Für die Alterung in Rotwein wurden ΔE_{00} -Werte von $7,171 \pm 1,431$ (GC A2) bis $8,382 \pm 1,456$ (Pan uni) gemessen, die damit weit über dem lagen, was ästhetisch als tolerierbar gilt. Für die Alterung in schwarzem Tee wurden ΔE_{00} -Werte von $1,220 \pm 0,356$ (GC trans) bis $2,357 \pm 0,408$ (VE warm+) gemessen. Das waren Farbabweichungen, die noch unter oder bereits über der klinischen Akzeptanzschwelle liegen. Es ist daher fraglich, ob die statistisch quantifizierbaren Produktunterschiede für den Betrachter von klinischer Relevanz sind, wenn das ästhetische Ergebnis in jedem Fall beeinträchtigt ist.

5.2.3. Vergleich verschiedener Stumpffarben

Ein weiterer Untersuchungsgegenstand war der Einfluss der Stumpffarbe auf die Farbveränderung. Entgegen der Nullhypothese, dass die Farbabweichungen des Befestigungskomposits unabhängig von der darunterliegenden Stumpffarbe sind, zeigte sich ein signifikanter Zusammenhang ($p < 0,001$). Prüfkörper auf Stümpfen in der hellsten untersuchten Farbe A1 zeigten signifikant größere Farbabweichungen als Prüfkörper auf Stümpfen in den Farben A2 und A3. Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen von Batak et al., die bei der Untersuchung von Harzmatrixkeramiken ebenfalls die höchsten Farbabweichungen bei Prüfkörpern mit der Hintergrundfarbe A1 feststellten.⁷⁸ Auch Lee et al. konnten nachweisen, dass Farbabweichungen nach künstlicher Alterung auf einem weißen Hintergrund signifikant höher waren als auf dunklen oder schwarzen Hintergründen.^{79,80} Chaiyabutr et al. wiesen nach, dass die Farbe des Zahnstumpfs signifikant die Wahrnehmung der Restauration beeinflusst.⁸¹ Die Autoren begründen das Untersuchungsergebnis damit, dass ein dunkler Untergrund einfallendes Licht absorbiert, wodurch die im Befestigungskomposit eingelagerten Färbepartikel optisch maskiert werden. Bei einem helleren Hintergrund hingegen wird das einfallende Licht

aufgrund des höheren Reflexionsgrades des Hintergrunds stärker reflektiert, sodass die optische Wahrnehmung der im Befestigungskomposit eingelagerten Färbepartikel verstärkt wird.⁷⁸⁻⁸⁰

Für die Praxis bedeutet dies, dass Verfärbungen des Befestigungskomposits auf natürlich hellen oder gebleachten Pfeilerzähnen bei hochästhetischen, transluzenten Restaurationen schneller als störend wahrgenommen werden könnten als auf dunkleren Zahnstümpfen, da der helle Untergrund die optische Wahrnehmung der Alterungsprozesse forciert.

5.2.4. Vergleich verschiedener Spaltbreiten

Hinsichtlich des Einflusses der Spaltbreite konnte die Nullhypothese im Rahmen dieser Untersuchung nicht verworfen werden. Eine größere Befestigungsfuge führte zu keiner signifikanten Erhöhung der Farbabweichung. Dies erscheint zunächst überraschend, da mikroskopische Analysen nach Abschluss der Alterungsphase eine Ablagerung von Färbepartikeln in den Poren der Befestigungskomposite zeigten (Abbildung 29-32). Theoretisch wäre zu erwarten gewesen, dass eine größere Menge an Befestigungskomposit mehr Raum für die Einlagerung von Färbepartikeln bietet, was konsequenterweise zu verstärkten Verfärbungen führen müsste. Zudem ist bekannt, dass sich der Randspalt von Restaurationen mit der Zeit ausdehnt, wodurch sich die Anfälligkeit für Verfärbungen erhöhen könnte.⁸²

In der Literatur besteht Uneinigkeit darüber, ob die Größe des Randspalts und die damit verbundene Schichtstärke der Befestigungskomposite eine signifikante Rolle bei der Farbabweichung spielen. Yamali et al. konnten keine signifikanten Einflüsse der Schichtstärke der Befestigungskomposite direkt nach der adhäsiven Befestigung nachweisen. Sie dokumentierten lediglich nicht signifikant erhöhte Farbabweichungen nach künstlicher Alterung durch Thermocycling. Allerdings blieben diese innerhalb der Wahrnehmbarkeits- und Akzeptanzschwelle ($0,8 < \Delta E_{00} < 1,8$).⁸³ Im Gegensatz dazu belegten Niu et al. in ihrer Untersuchung an Lithium-Disilikat-Keramiken, dass sowohl die Farbe als auch die Schichtstärke des Befestigungskomposits signifikanten Einfluss auf die Farbveränderung haben ($p < 0,001$).⁸⁴ Dennoch ist die direkte Vergleichbarkeit der Studien aufgrund der Rahmenbedingungen nur eingeschränkt möglich. Während in der Studie von Yamali et al. 1,5 mm dicke Kronen untersucht wurden, analysierte die vorliegende Untersuchung Veneers mit geringer Schichtstärke (0,4 mm).⁸³ Andere Studien belegen, dass mit zunehmender Schichtstärke auch die Maskierungsfähigkeit keramischer Restaurationsmaterialien steigt.⁸⁵

Dass in der vorliegenden Untersuchung kein signifikanter Einfluss der Spaltbreite der Befestigungsfuge nachgewiesen wurde, könnte darauf hindeuten, dass diese wirklich nicht von klinischer Relevanz ist oder dass die untersuchten Spaltbreiten noch innerhalb eines Toleranzbereichs liegen und Effekte erst bei höheren Spaltbreiten auftreten. Weitere Studien sind erforderlich, um den Einfluss der Spaltbreite auf die Farbstabilität abschließend zu klären.

5.2.5. Farbstabilität zentral und im Randbereich

Der letzte Aspekt der Untersuchung betraf die Farbabweichungen des Befestigungskomposits in Abhängigkeit von der jeweiligen Messposition (zentral, mesial, distal). Die Nullhypothese konnte verworfen werden, da ein signifikanter Einfluss der Messposition nachgewiesen wurde ($p < 0,001$). Vergleichbare Untersuchungen, in denen Farbwerte über die gesamte Restaurationsoberfläche hinweg bestimmt wurden, sind bisher rar, sodass weiterführende Studien notwendig sind, um die klinische Relevanz dieser Erkenntnis zu bewerten.

Gut untersucht ist allerdings die Problematik von Verfärbungen am Randspalt im Laufe der Zeit. Während das Befestigungskomposit im zentralen Bereich durch die keramische Restauration weitestgehend geschützt ist, sind die Randbereiche dem oralen Milieu direkt ausgesetzt. Beier et al. identifizierten in ihrer klinischen Langzeitstudie über 20 Jahre die marginale Verfärbung als eine der Hauptursachen für technisches Versagen bei Veneers.⁸⁶ Ergänzt wird dies durch die Ergebnisse von Badami et al., die aufzeigten, dass eine unzureichende Passform von Veneers randständige Verfärbungen begünstigen kann, da Mikrorisse und Spalten entstehen, in denen sich Farbpartikel vermehrt ablagern.⁸⁷

5.2.6. Schlussfolgerung

Ein direkter Vergleich der Studienergebnisse ist aufgrund unterschiedlicher Messmethoden, Umgebungsbedingungen und verwendeter Befestigungskomposite nicht möglich. In einigen Studien wurde die Farbbestimmung mittels digitaler Fotografie durchgeführt, während andere die Spektralfotografie nutzten. Wie Lakhanpal et al. und Tango et al. darlegen, sind die Ergebnisse verschiedener Messsysteme sehr variabel und nicht direkt vergleichbar.^{88,89} Auch Unterschiede in der Berechnungsweise (z. B. CIEDE2000-Formel) erschweren die Vergleichbarkeit der Ergebnisse. Zudem wurden in den meisten Studien Keramikplättchen untersucht und nur wenige Untersuchungen mit Veneers durchgeführt.^{16-20,75,90}

Trotz dieser Limitationen lassen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen Rückschlüsse auf den aktuellen Stand der Forschung zu. Insbesondere stellt die Untersuchung eine Erweiterung der bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse dar, da sie mit einer Stichprobengröße von $N = 270$ eine deutlich höhere Fallzahl aufweist als vergleichbare Studien und zudem durch die Untersuchung an Veneers realitätsnähere Bedingungen schafft, als dies bei der Verwendung von Keramikplättchen der Fall ist.

Innerhalb der Grenzen dieser In-vitro-Untersuchung können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Befestigungskomposite zeigen nach künstlicher Alterung Farbabweichungen, die über den klinisch akzeptablen Bereich ($0,8 < \Delta E_{00} < 1,8$) hinausgehen. GC A2 erwies sich als das farbstabilste Befestigungskomposit. Es konnten statistisch signifikante Unterschiede zwischen den untersuchten Befestigungskompositen nachgewiesen werden ($p < 0,001$), die klinische Relevanz ist jedoch als gering einzuschätzen.
2. Die Stumpffarbe hat einen signifikanten Einfluss. Je heller der Stumpf, desto stärker die Farbabweichung der Befestigungskomposite ($p < 0,001$). Darauf sollte im Rahmen der klinischen Versorgung von natürlich hellen oder gebleachten Zähnen besonderes Augenmerk gelegt werden. Eine kritische Indikationsstellung sowie die ausführliche Aufklärung des Patienten sind zu empfehlen.
3. Die Spaltbreite hat keinen signifikanten Einfluss auf die Farbstabilität der Befestigungskomposite ($p = 0,116$).
4. Farbveränderungen treten in randständigen Bereichen stärker auf als in zentralen Bereichen ($p < 0,001$). Dies sollte klinisch bei der Planung der Präparationsgrenze berücksichtigt werden.

Weitere groß angelegte Untersuchungen und In-vivo-Studien sind erforderlich, um die klinische Übertragbarkeit der Ergebnisse zu untermauern. Auch sollte ein standardisiertes Alterungs- und Messprotokoll etabliert werden, um eine bessere Vergleichbarkeit zukünftiger Untersuchungen zu ermöglichen.

6. Literaturverzeichnis

1. Johal A, Amin M, Dean R. The impact of orthodontic treatment on a young person's quality of life, esthetics, and self-esteem in hypodontia: A longitudinal study. *Am J Orthod Dentofacial Orthop* 2023; **164**(6): 813-23.e1.
2. Ye Z, Jiang J, Yang L, Xu T, Lin Y, Luo F. Research Progress and Clinical Application of All-Ceramic Micro-Veneer. *Materials (Basel)* 2023; **16**(8).
3. Liebermann A, Erdelt K, Brix O, Edelhoff D. Clinical Performance of Anterior Full Veneer Restorations Made of Lithium Disilicate with a Mean Observation Time of 8 Years. *Int J Prosthodont* 2020; **33**(1): 14-21.
4. Edelhoff D, Prandtner O, Saeidi Pour R, Liebermann A, Stimmelmayer M, Güth J. Anterior restorations: The performance of ceramic veneers. *Quintessence Int* 2018; **49**(2): 89-101.
5. Imburgia M, Cortellini D, Valenti M. Minimally invasive vertical preparation design for ceramic veneers: a multicenter retrospective follow-up clinical study of 265 lithium disilicate veneers. *Int J Esthet Dent* 2019; **14**(3): 286-98.
6. Xu B, Chen X, Li R, Wang Y, Li Q. Agreement of try-in pastes and the corresponding luting composites on the final color of ceramic veneers. *J Prosthodont* 2014; **23**(4): 308-12.
7. Daneshpooy M, Pournaghi Azar F, Alizade Oskoei P, Bahari M, Asdaghi S, Khosravani SR. Color agreement between try-in paste and resin cement: Effect of thickness and regions of ultra-translucent multilayered zirconia veneers. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects* 2019; **13**(1): 61-7.
8. Ren DF, Zhan KR, Chen XD, Xing WZ. [Effect of ceramic thickness and resin cement shades on final color of heat-pressed ceramic veneers]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi* 2017; **52**(2): 109-13.
9. Perroni AP, Kaizer MR, Della Bona A, Moraes RR, Boscatto N. Influence of light-cured luting agents and associated factors on the color of ceramic laminate veneers: A systematic review of in vitro studies. *Dent Mater* 2018; **34**(11): 1610-24.
10. Vafaei F, Heidari B, Khoshhal M, et al. Effect of Resin Cement Color on the Final Color of Lithium Disilicate All-Ceramic Restorations. *J Dent (Tehran)* 2018; **15**(3): 143-50.
11. Ayata M, Kilic K, Al-Haj Husain N, Özcan M. Effect of Thickness and Translucency on Color Change and Masking Ability of Ceramic Materials used for Laminate Veneers. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2023.
12. Al Wadei MHD. Comparison of the Degree of Staining of Computer-Aided Design-Computer-Aided Manufacture (CAD-CAM) Ceramic Veneers by Green Tea, Coffee, and Coca-Cola Using a Digital Spectrophotometer. *Med Sci Monit* 2023; **29**: e939341.
13. Peumans M, Van Meerbeek B, Lambrechts P, Vanherle G. Porcelain veneers: a review of the literature. *J Dent* 2000; **28**(3): 163-77.
14. Alghazzawi TF. Clinical Survival Rate and Laboratory Failure of Dental Veneers: A Narrative Literature Review. *J Funct Biomater* 2024; **15**(5).
15. Liao ZX, Zhou W, Zhang L, et al. [Advances in color stability of resin cements and its influence on all-ceramics restorations]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi* 2021; **56**(2): 216-20.
16. Hernandez DK, Arrais CA, Lima E, Cesar PF, Rodrigues JA. Influence of resin cement shade on the color and translucency of ceramic veneers. *J Appl Oral Sci* 2016; **24**(4): 391-6.
17. Hoorizad M, Valizadeh S, Heshmat H, Tabatabaei SF, Shakeri T. Influence of resin cement on color stability of ceramic veneers: in vitro study. *Biomater Investig Dent* 2021; **8**(1): 11-7.
18. Chen XD, Hong G, Xing WZ, Wang YN. The influence of resin cements on the final color of ceramic veneers. *J Prosthodont Res* 2015; **59**(3): 172-7.
19. Kilinc E, Antonson SA, Hardigan PC, Kesercioglu A. Resin cement color stability and its influence on the final shade of all-ceramics. *J Dent* 2011; **39** Suppl 1: e30-6.

20. Dede D, Sahin O, Özdemir OS, Yilmaz B, Celik E, Köroğlu A. Influence of the color of composite resin foundation and luting cement on the final color of lithium disilicate ceramic systems. *J Prosthet Dent* 2017; **117**(1): 138-43.
21. Fairchild MD. Color appearance models and complex visual stimuli. *J Dent* 2010; **38 Suppl 2**: e25-33.
22. Richter M. Farbmeterik Lehrbuch der Experimentalphysik. Berlin: de Gruyter; 1987.
23. Chu SJ. Dentale Farbenlehre Farbbestimmung und Farbkommunikation in der ästhetischen Zahnmedizin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2005.
24. Kern M, Wolfart S, Heydecke G, Vitkowski C, Türp JC, Strub JR. Curriculum Prothetik. Band II. 5., überarbeitete und erweiterte Auflage ed. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2022.
25. Brackhagen LV. Einfluss von Try-In-Pasten und Befestigungskompositen auf die endgültige Farbe von Keramikveneers: Farbbestimmung mit digitaler Fotografie und Spektralfotometrie [Dissertation (eingereicht 2026)]. Cologne: University of Cologne; 2026.
26. Tabatabaian F, Beyabanaki E, Alirezaei P, Epakchi S. Visual and digital tooth shade selection methods, related effective factors and conditions, and their accuracy and precision: A literature review. *J Esthet Restor Dent* 2021; **33**(8): 1084-104.
27. Czigola A, Róth I, Vitai V, Fehér D, Hermann P, Borbély J. Comparing the effectiveness of shade measurement by intraoral scanner, digital spectrophotometer, and visual shade assessment. *J Esthet Restor Dent* 2021; **33**(8): 1166-74.
28. Akl MA, Mansour DE, Zheng F. The Role of Intraoral Scanners in the Shade Matching Process: A Systematic Review. *J Prosthodont* 2023; **32**(3): 196-203.
29. Chen H, Huang J, Dong X, et al. A systematic review of visual and instrumental measurements for tooth shade matching. *Quintessence Int* 2012; **43**(8): 649-59.
30. Igiel C, Lehmann KM, Ghinea R, et al. Reliability of visual and instrumental color matching. *J Esthet Restor Dent* 2017; **29**(5): 303-8.
31. Liberato WF, Barreto IC, Costa PP, de Almeida CC, Pimentel W, Tiossi R. A comparison between visual, intraoral scanner, and spectrophotometer shade matching: A clinical study. *J Prosthet Dent* 2019; **121**(2): 271-5.
32. Westland S. Review of the CIE system of colorimetry and its use in dentistry. *J Esthet Restor Dent* 2003; **15 Suppl 1**: S5-12.
33. Robertson AR. Historical development of CIE recommended color difference equations. *Color Research & Application* 1990; **15**(3): 167-70.
34. Schanda J. CIE colorimetry. *Colorimetry: Understanding the CIE system* 2007; **3**: 25-78.
35. Häßler U. CIE-LAB-Farbraum - Grundlagen und Erklärung. Cologne (NRW): Wisotop.de; 2017. <https://wisotop.de/lab-farbmodell.php> (Zuletzt abgerufen am 19.03.2026)
36. Vitai V, Németh A, Teutsch B, et al. Color Comparison Between Intraoral Scanner and Spectrophotometer Shade Matching: A Systematic Review and Meta-Analysis. *J Esthet Restor Dent* 2025; **37**(2): 361-77.
37. Hein S, Tapia J, Bazos P. eLABor_aid: a new approach to digital shade management. *Int J Esthet Dent* 2017; **12**(2): 186-202.
38. Luo MR, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Research & Application: Endorsed by Inter-Society Color Council, The Colour Group (Great Britain), Canadian Society for Color, Color Science Association of Japan, Dutch Society for the Study of Color, The Swedish Colour Centre Foundation, Colour Society of Australia, Centre Français de la Couleur* 2001; **26**(5): 340-50.
39. Standardization IOF. ISO/TR 28642:2016 - Dentistry - Guidance on colour measurement. Geneva, 2016.
40. Weber T. Memorix Zahnmedizin. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag; 2017.
41. Edelhoff D, Sorensen JA. Tooth structure removal associated with various preparation designs for anterior teeth. *J Prosthet Dent* 2002; **87**(5): 503-9.

42. Kern M, Ahlers MO. Controlling the depth of ceramic veneer preparations by using a color marker in the depth grooves. *J Prosthet Dent* 2015; **114**(6): 862-4.
43. Manhart J. Kermaikveneers - eine klinisch orientierte Übersicht. *ZWP Online* 2011; (28.02.2011).
44. Gresnigt MMM, Cune MS, Jansen K, van der Made SAM, Özcan M. Randomized clinical trial on indirect resin composite and ceramic laminate veneers: Up to 10-year findings. *J Dent* 2019; **86**: 102-9.
45. Alenezi A, Alsweed M, Alsidrani S, Chrcanovic BR. Long-Term Survival and Complication Rates of Porcelain Laminate Veneers in Clinical Studies: A Systematic Review. *J Clin Med* 2021; **10**(5).
46. Li RW, Chow TW, Matinlinna JP. Ceramic dental biomaterials and CAD/CAM technology: state of the art. *J Prosthodont Res* 2014; **58**(4): 208-16.
47. Fasbinder DJ. Materials for chairside CAD/CAM restorations. *Compend Contin Educ Dent* 2010; **31**(9): 702-4, 6, 8-9.
48. Fasbinder DJ. Restorative material options for CAD/CAM restorations. *Compend Contin Educ Dent* 2002; **23**(10): 911-6, 8, 20 passim; quiz 24.
49. Hajtő J, Gehringer U, Ozcan M. A multi-faceted treatment approach for anterior reconstructions using current ceramics, implants, and adhesive systems. *Eur J Esthet Dent* 2010; **5**(3): 242-59.
50. Liebermann A, Vehling D, Eichberger M, Stawarczyk B. Impact of storage media and temperature on color stability of tooth-colored CAD/CAM materials for final restorations. *J Appl Biomater Funct Mater* 2019; **17**(4): 2280800019836832.
51. Liebermann A, Stawarczyk B, Kieschnick A. Adhäsiv oder traditionell? 2018: 22-3.
52. Stawarczyk B, Kieschnick A, Liebermann A, Rosentritt M. Werkstoffkunde-Kompendium Dentale Befestigungsmaterialien.; 2019.
53. Krämer N, Lohbauer U, Frankenberger R. Adhesive luting of indirect restorations. *Am J Dent* 2000; **13**(Spec No): 60d-76d.
54. Perdigão J, Araujo E, Ramos RQ, Gomes G, Pizzolotto L. Adhesive dentistry: Current concepts and clinical considerations. *J Esthet Restor Dent* 2021; **33**(1): 51-68.
55. Society of Prosthodontics CSA. [Operational specifications for the cementation of porcelain laminate veneers]. *Zhonghua Kou Qiang Yi Xue Za Zhi* 2020; **55**(6): 373-7.
56. Frankenberger R, Lohbauer U, Roggendorf MJ, Naumann M, Taschner M. Selective enamel etching reconsidered: better than etch-and-rinse and self-etch? *J Adhes Dent* 2008; **10**(5): 339-44.
57. Alghazali N, Moaleem M, Alamri S, et al. The Effect of Try-In Paste and Resin Cement Shade on Colour Properties of Dental Veneers. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 2018; **26**(3): 144-51.
58. Liebermann A, Langwieder B, Brauneis M, Eichberger M, Stawarczyk B. Impact of thermocycling on mechanical properties and discoloration of veneering composite resins after storage in various staining media. *J Prosthet Dent* 2021; **125**(6): 940-5.
59. Reymus M, Liebermann A, Spintzyk S, Stawarczyk B. Food Solutions and Cigarette Smoke-Dependent Changes in Color and Surface Texture of CAD/CAM Composite Resins-An In Vitro Study. *Int J Prosthodont* 2023; **36**(2): 194-202.
60. Yu H, Cheng SL, Jiang NW, Cheng H. Effects of cyclic staining on the color, translucency, surface roughness, and substance loss of contemporary adhesive resin cements. *J Prosthet Dent* 2018; **120**(3): 462-9.
61. Haralur SB, Raje SAN, Alhassan Mujayri F. Effect of Hydrothermal Aging and Beverages on Color Stability of Lithium Disilicate and Zirconia Based Ceramics. *Medicina (Kaunas)* 2019; **55**(11).
62. Szczesio-Wlodarczyk A, Kopacz K, Ranoszek-Soliwoda K, Sokolowski J, Bociong K. Towards the Standardization of Artificial Aging Protocols for Dental Composites: Evaluation of Proposed Methods. *J Funct Biomater* 2025; **16**(2).
63. Morresi AL, D'Amario M, Capogreco M, et al. Thermal cycling for restorative materials: does a standardized protocol exist in laboratory testing? A literature review. *J Mech Behav Biomed Mater* 2014; **29**: 295-308.

64. Ernst CP, Canbek K, Euler T, Willershausen B. In vivo validation of the historical in vitro thermocycling temperature range for dental materials testing. *Clin Oral Investig* 2004; **8**(3): 130-8.
65. Zhou X, Wang S, Peng X, et al. Effects of water and microbial-based aging on the performance of three dental restorative materials. *J Mech Behav Biomed Mater* 2018; **80**: 42-50.
66. Amaral FL, Colucci V, Palma-Dibb RG, Corona SA. Assessment of in vitro methods used to promote adhesive interface degradation: a critical review. *J Esthet Restor Dent* 2007; **19**(6): 340-53; discussion 54.
67. DeLong R, Douglas WH. Development of an artificial oral environment for the testing of dental restoratives: bi-axial force and movement control. *J Dent Res* 1983; **62**(1): 32-6.
68. Ilie N, Hilton TJ, Heintze SD, et al. Academy of Dental Materials guidance-Resin composites: Part I-Mechanical properties. *Dent Mater* 2017; **33**(8): 880-94.
69. Binner P. Einfluss von Try-In-Paste und Befestigungskomposit auf die finale Farbe von Keramikveneers bei Verwendung verschiedener keramischer Werkstoffe und Schichtstärken [Dissertation (unveröffentlicht)]. Cologne: University of Cologne; 2026.
70. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, et al. Color difference thresholds in dentistry. *J Esthet Restor Dent* 2015; **27 Suppl 1**: S1-9.
71. Sharma G, Wu W, Dalal EN. The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research & Application* 2005; **30**(1): 21-30.
72. Lee SM, Choi YS. Effect of ceramic material and resin cement systems on the color stability of laminate veneers after accelerated aging. *J Prosthet Dent* 2018; **120**(1): 99-106.
73. Palla ES, Kontonasaki E, Kantiranis N, et al. Color stability of lithium disilicate ceramics after aging and immersion in common beverages. *J Prosthet Dent* 2018; **119**(4): 632-42.
74. Pissaia JF, Correr GM, Gonzaga CC, Fernandes da Cunha L. Einfluss von Farbton, Aushärtungsmodus und Alterung auf die Farbstabilität von Komposit-Zementen. *Braz J Oral Sci* 2015; **14**(4).
75. Luo W, Huang W, Xu M, et al. The color stability, water sorption, and solubility of ten composite resins. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi* 2023; **41**(1): 58-66.
76. Dede D, Ceylan G, Yilmaz B. Effect of brand and shade of resin cements on the final color of lithium disilicate ceramic. *J Prosthet Dent* 2017; **117**(4): 539-44.
77. Malallah AD, Hasan NH, Qasim MH. Influence of Ceramic Material Type and Cement Shade on the Translucency of Lithium Disilicate Ceramic Veneers. *Int J Dent* 2024; **2024**: 2540174.
78. Batak B, Öztürk C. Influence of background shade and resin cement on color change of resin matrix ceramics. *Journal of Stomatology* 2021; **74**: 160-5.
79. Lee YK, Powers JM. Influence of background color on the color changes of resin composites after accelerated aging. *Am J Dent* 2007; **20**(1): 27-30.
80. Lee YK, Lim BS, Kim CW. Difference in the colour and colour change of dental resin composites by the background. *J Oral Rehabil* 2005; **32**(3): 227-33.
81. Chaibabutr Y, Kois JC, Lebeau D, Nunokawa G. Effect of abutment tooth color, cement color, and ceramic thickness on the resulting optical color of a CAD/CAM glass-ceramic lithium disilicate-reinforced crown. *J Prosthet Dent* 2011; **105**(2): 83-90.
82. Fayad BR, Zohdy MM, Hussein GA, Farag EA. Color stability and marginal adaptation of ceramic veneers cemented using different composite resins. *Minerva Dent Oral Sci* 2023.
83. Yamalı Y, Bankoğlu Güngör M, Karakoca Nemli S, Turhan Bal B. The effects of cement thickness and cement shade on the final color of lithium disilicate crowns. *J Adv Prosthodont* 2023; **15**(2): 93-100.
84. Niu E, Agustin M, Douglas RD. Color match of machinable lithium disilicate ceramics: Effects of cement color and thickness. *J Prosthet Dent* 2014; **111**(1): 42-50.

85. Çakmak G, Donmez MB, Kashkari A, Johnston WM, Yilmaz B. Effect of thickness, cement shade, and coffee thermocycling on the optical properties of zirconia reinforced lithium silicate ceramic. *J Esthet Restor Dent* 2021; **33**(8): 1132-8.
86. Beier US, Kapferer I, Burtscher D, Dumfahrt H. Clinical performance of porcelain laminate veneers for up to 20 years. *Int J Prosthodont* 2012; **25**(1): 79-85.
87. Badami V, Satya Priya M, Vijay L, Kethineni H, Akarapu S, Agarwal S. Marginal Adaptation of Veneers: A Systematic Review. *Cureus* 2022; **14**(11): e31885.
88. Lakhanpal S, Neelima MS. Accuracy of Three Shade-matching Devices in Replicating the Shade of Metal Ceramic Restorations: An in vitro Study. *J Contemp Dent Pract* 2016; **17**(12): 1003-8.
89. Tango RN, Maziero Volpato C, Santos KF, Cesar PF, Paravina RD. Harmonizing color measurements in dentistry using translucent tooth-colored materials. *BMC Oral Health* 2024; **24**(1): 173.
90. Tabatabaei MH, Matinfard F, Ahmadi E, Ranjbar Omrani L, Sadeghi Mahounak F. Color Stability of Ceramic Veneers Cemented with Self-Adhesive Cements after Accelerated Aging. *Front Dent* 2019; **16**(5): 393-401.
91. Lindblom BJ. Delta E (CIE 2000). 2017. http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CIE2000.html (Zuletzt abgerufen am 19.03.2026)

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 - Interaktion des Lichts mit einem Zahn (aus Brackhagen ²⁵)	11
Abbildung 2 - CIE L*a*b*-Farbraum ³⁵	13
Abbildung 3 - Aufnahme mit Graukarte für eLAB-Prime.....	15
Abbildung 4 - Versuchsaufbau (aus Brackhagen ²⁵)	25
Abbildung 5 - Einheitliche Position der Farbmessung am Zahn durch eine auf dem Bildschirm angebrachte Folie.....	25
Abbildung 6 - Aufteilung der 270 Prüfkörper nach Schichtstärke des Befestigungskomposits, Stumpffarbe und Befestigungsmaterial.....	26
Abbildung 7 - Aufteilung der Prüfkörper auf die Lagerungsmedien bei 50 µm und 80 µm Schichtstärke des Befestigungskomposits am Beispiel von VE light+	27
Abbildung 8 - Aufteilung der Prüfkörper auf die Lagerungsmedien bei 50 µm Schichtstärke des Befestigungskomposits am Beispiel von GC A2	27
Abbildung 9 - Sortierung der 270 Prüfkörper in Kästen nach Befestigungskomposit, Lagerungsmedium, Stumpffarbe und Größe der Befestigungsfuge	28
Abbildung 10 - Künstliche Langzeitalterung der Prüfkörper im Brutschrank bei 37 °C	29
Abbildung 11 - Protokoll zum Ablauf der Messungen	30
Abbildung 12 - Farbbestimmung in eLAB mesial	31
Abbildung 13 - Farbbestimmung in eLAB zentral.....	32
Abbildung 14 - Farbbestimmung in eLAB distal	32
Abbildung 15 - Querschnitte der gealterten Prüfkörper (1: Rotwein, 2: dest. Wasser, 3: Tee)	34
Abbildung 16 - Politur der in Kunststoff eingebetteten Querschnitte der Prüfkörper.....	34
Abbildung 17 - Querschnitte der in Kunststoff eingebetteten gealterten Veneers für die Analyse der Materialverfärbung unter dem Mikroskop (1: Rotwein, 2: dest. Wasser, 3: Tee)	35
Abbildung 18 - Nachversuch zu einer möglichen Verfärbung der Kunststoffstümpfe nach Alterung in dest. Wasser, Tee und Rotwein.....	35
Abbildung 19 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit vom Medium nach 48 Tagen Lagerung bei einer Spaltbreite von 50 µm	38
Abbildung 20 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit der Stumpffarbe nach 48 Tagen Lagerung in Rotwein bei einer Spaltbreite von 50 µm	39

Abbildung 21 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von den Befestigungsfugenbreiten nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Tee	40
Abbildung 22 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔE_{00}) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von den Befestigungsfugenbreiten nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Rotwein	41
Abbildung 23 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔL^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Tee mit einer Spaltbreite von 50 μm	42
Abbildung 24 - Vergleich der Farbabweichungen (ΔL^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Rotwein mit einer Spaltbreite von 50 μm	43
Abbildung 25 - Vergleich der Farbabweichungen (Δa^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Tee mit einer Spaltbreite von 50 μm	44
Abbildung 26 - Vergleich der Farbabweichungen (Δa^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Rotwein mit einer Spaltbreite von 50 μm	45
Abbildung 27 - Vergleich der Farbabweichungen (Δb^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Tee mit einer Spaltbreite von 50 μm	46
Abbildung 28 - Vergleich der Farbabweichungen (Δb^*) der sechs untersuchten Befestigungskomposite in Abhängigkeit von der Messstelle nach einer Lagerzeit von 48 Tagen in Rotwein mit einer Spaltbreite von 50 μm	47
Abbildung 29 – Querschnitt eines in destilliertem Wasser gealterten Prüfkörpers (zentral), 1: Veneer, 2: Befestigungskomposit, 3: Kunststoffstumpf.....	48
Abbildung 30 - Querschnitt eines in Tee gealterten Prüfkörpers (zentral), 1: Veneer, 2: Befestigungskomposit mit eingelagerten Teepartikeln, 3: Kunststoffstumpf.....	48
Abbildung 31 - Querschnitt eines in Tee gealterten Prüfkörpers (mesial), 1: Veneer, 2: Befestigungskomposit mit sichtbarer Verfärbung mesial, 3: Kunststoffstumpf	49
Abbildung 32 - Querschnitt eines in Rotwein gealterten Prüfkörpers (mesial), 1: Veneer, 2: Befestigungskomposit mit sichtbarer Verfärbung mesial und eingelagerten Rotweinpartikeln, 3: Kunststoffstumpf.....	49
Abbildung 33 - Erklärung der CIEDE2000-Farbabstandsformel ⁹¹	76

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 - Befestigungskomposite.....	22
Tabelle 2 - Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss ΔE_{00} der Befestigungsmaterialien für Spaltbreite 1, Medium 1-3, Lagerung 3, Stumpffarbe gemittelt (4.1.).....	66
Tabelle 3 - Varianzanalyse ΔE_{00} für Spaltbreite 1, Medium 1, Lagerzeit 3 (4.1.).....	68
Tabelle 4 - Varianzanalyse ΔE_{00} für Spaltbreite 1, Medium 2, Lagerzeit 3 (4.1.).....	68
Tabelle 5 - Varianzanalyse ΔE_{00} Spaltbreite 1, Medium 3, Lagerzeit 3 (4.1. und 4.2.)	68
Tabelle 6 - Farbeinfluss ΔE_{00} der Stumpffarbe bei Spaltbreite 1, Medium 3, Lagerzeit 3, Messposition gemittelt (4.2.).....	69
Tabelle 7 - Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss der Stumpffarbe bei Spaltbreite 1, Medium 3, Lagerzeit 3, Messposition gemittelt (4.2.)	69
Tabelle 8 - ΔE_{00} - Vergleich der Spaltbreiten 1 und 2 für die Medien 2 und 3 bei Lagerungszeit 3, Stumpffarbe und Messposition gemittelt (4.3.).....	70
Tabelle 9 - Varianzanalyse ΔE_{00} Medium 2 und 3, Lagerzeit 3 (4.3.).....	70
Tabelle 10 - 4.4 Farbeinfluss ΔL^* , Δa^* , Δb^* für Medium 2 und 3, Lagerzeit 3, Messposition 1-3, Stumpffarbe gemittelt, Spaltbreite 1 (4.4)	70
Tabelle 11 - Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss ΔL^* , Δa^* , Δb^* der Messposition bei Spaltbreite 1, Medium 2 und 3 gemittelt, Lagerzeit 3 (4.4.).....	74
Tabelle 12 - Varianzanalyse ΔE_{00} Spaltbreite 1, Lagerzeit 3 (4.4.)	75
Tabelle 13 - Vergleich der ΔL^* , Δa^* und Δb^* Werte der Prüfkörper der Hauptuntersuchung und des Kontrollversuchs (4.5)	75

7.3. Messergebnisse

Sämtliche Messergebnisse sind gerundet auf drei Nachkommastellen angegeben. Sowohl die Standardabweichungen der übergeordneten Mittelwerte als auch die der resultierenden Positionsdifferenzen wurden konsequent mittels Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet.

Tabelle 2 - Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss ΔE_{00} der Befestigungsmaterialien für Spaltbreite 1, Medium 1-3, Lagerung 3, Stumpffarbe gemittelt (4.1.)

Medium	Produkt	Mittelwert $\pm$ SD	Produktvergleich	p-Wert	Signifikanz
Rotwein	VE light+	7,354 $\pm$ 1,395	VE warm+	0,306	Nein
			Pan uni	<0,001	Ja
			Pan clear	<0,001	Ja
			GC trans	>0,999	Nein
			GC A2	>0,999	Nein

	VE warm+	7,884 ± 1,755	Pan uni Pan clear GC trans GC A2	0,440 0,740 >0,999 0,030	Nein Nein Nein Ja
	Pan uni	8,382 ± 1,456	Pan clear GC trans GC A2	>0,999 0,009 <0,001	Nein Ja Ja
	Pan clear	8,332 ± 1,358	GC trans GC A2	0,019 <0,001	Ja Ja
	GC trans	7,588 ± 1,281	GC A2	>0,999	Nein
	GC A2	7,171 ± 1,431	-	-	-
	M_{ΔE00}	7,785 ± 0,594			
Tee	VE light+	1,694 ± 0,435	VE warm+ Pan uni Pan clear GC trans GC A2	<0,001 >0,999 0,495 0,010 >0,999	Ja Nein Nein Ja Nein
	VE warm+	2,357 ± 0,408	Pan uni Pan clear GC trans GC A2	<0,001 0,109 <0,001 <0,001	Ja Nein Ja Ja
	Pan uni	1,675 ± 0,621	Pan clear GC trans GC A2	0,348 0,016 >0,999	Nein Ja Nein
	Pan clear	1,986 ± 0,907	GC trans GC A2	<0,001 0,072	Ja Nein
	GC trans	1,220 ± 0,356	GC A2	0,096	Nein
	GC A2	1,597 ± 0,618	-	-	-
	M_{ΔE00}	1,755 ± 0,240			
Dest. Wasser	VE light+	0,970 ± 0,379	VE warm+ Pan uni Pan clear GC trans GC A2	<0,001 0,062 0,121 >0,999 >0,999	Ja Nein Nein Nein Nein
	VE warm+	1,687 ± 0,412	Pan uni Pan clear GC trans GC A2	0,116 0,059 <0,001 <0,001	Nein Nein Ja Ja
	Pan uni	1,343 ± 0,902	Pan clear GC trans GC A2	>0,999 0,316 0,042	Nein Nein Ja

	Pan clear	1,313 ± 0,227	GC trans GC A2	0,559 0,083	Nein Nein
	GC trans	1,046 ± 0,217	GC A2	>0,999	Nein
	GC A2	0,954 ± 0,354	-	-	-
	M_{ΔE00}	1,219 ± 0,194			

Tabelle 3 - Varianzanalyse ΔE_{00} für Spaltbreite 1, Medium 1, Lagerzeit 3 (4.1.)

Quelle	Typ III Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Stumpffarbe	1,904	2	0,952	4,381	0,015 = signifikant
Messposition	1,746	2	0,873	4,016	0,021 = signifikant
Produkt	10,940	5	2,188	10,067	<0,001 = signifikant

Tabelle 4 - Varianzanalyse ΔE_{00} für Spaltbreite 1, Medium 2, Lagerzeit 3 (4.1.)

Quelle	Typ III Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Stumpffarbe	2,458	2	1,229	4,970	0,009 = signifikant
Messposition	4,220	2	2,110	8,534	<0,001 = signifikant
Produkt	19,897	5	3,979	16,095	<0,001 = signifikant

Tabelle 5 - Varianzanalyse ΔE_{00} Spaltbreite 1, Medium 3, Lagerzeit 3 (4.1. und 4.2.)

Quelle	Typ III Quadrat- summe	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Stumpffarbe	13,099	2	6,550	9,555	<0,001 = signifikant
Messposition	217,882	2	108,941	158,932	<0,001 = signifikant
Produkt	34,216	5	6,843	9,983	<0,001 = signifikant

Tabelle 6 - Farbeinfluss ΔE_{00} der Stumpffarbe bei Spaltbreite 1, Medium 3, Lagerzeit 3, Messposition gemittelt (4.2.)

Produkt	Stumpffarbe	Mittelwert $\pm$ SD
VE light+	A1	7,755 $\pm$ 1,866
	A2	7,194 $\pm$ 1,232
	A3	7,113 $\pm$ 1,768
VE warm+	A1	8,624 $\pm$ 1,776
	A2	7,148 $\pm$ 1,580
	A3	7,880 $\pm$ 1,772
Pan uni	A1	8,854 $\pm$ 1,474
	A2	8,308 $\pm$ 1,527
	A3	7,984 $\pm$ 1,397
Pan clear	A1	8,480 $\pm$ 1,382
	A2	8,702 $\pm$ 1,390
	A3	7,815 $\pm$ 1,292
GC trans	A1	8,034 $\pm$ 1,512
	A2	7,125 $\pm$ 1,090
	A3	7,604 $\pm$ 1,181
GC A2	A1	7,375 $\pm$ 1,712
	A2	7,110 $\pm$ 1,420
	A3	7,028 $\pm$ 1,280
$M_{\Delta E00}$	A1	8,187 $\pm$ 0,665
$M_{\Delta E00}$	A2	7,598 $\pm$ 0,565
$M_{\Delta E00}$	A3	7,571 $\pm$ 0,599
$M_{\Delta E00}$	A1 - A2/A3	0,603 $\pm$ 0,782

Tabelle 7 - Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss der Stumpffarbe bei Spaltbreite 1, Medium 3, Lagerzeit 3, Messposition gemittelt (4.2.)

Stumpffarbe	Mittelwert	Paarweiser Vergleich	p-Wert	Signifikanz
A1	8,187 $\pm$ 0,665	A1 - A2 A1 - A3	0,001 0,001	Ja Ja
A2	7,598 $\pm$ 0,565	A2 - A3	>0,999	Nein
A3	7,571 $\pm$ 0,599	-		

Tabelle 8 - ΔE_{00} - Vergleich der Spaltbreiten 1 und 2 für die Medien 2 und 3 bei Lagerungszeit 3, Stumpffarbe und Messposition gemittelt (4.3.)

Medium	Produkt	Mittelwert $\pm$ SD bei 50 μ m	Mittelwert $\pm$ SD bei 80 μ m
Rotwein	VE light+	7,354 $\pm$ 1,395	7,296 $\pm$ 0,981
	VE warm+	7,884 $\pm$ 1,755	7,607 $\pm$ 1,340
	Pan uni	8,382 $\pm$ 1,456	7,526 $\pm$ 1,478
	Pan clear	8,332 $\pm$ 1,358	8,739 $\pm$ 1,505
	MΔE_{00}	7,988 $\pm$ 0,752	7,792 $\pm$ 0,671
Tee	VE light+	1,694 $\pm$ 0,435	1,625 $\pm$ 0,388
	VE warm+	2,357 $\pm$ 0,408	2,348 $\pm$ 0,493
	Pan uni	1,675 $\pm$ 0,621	1,394 $\pm$ 0,547
	Pan clear	1,986 $\pm$ 0,907	1,829 $\pm$ 0,815
	MΔE_{00}	1,928 $\pm$ 0,311	1,799 $\pm$ 0,291

Tabelle 9 - Varianzanalyse ΔE_{00} Medium 2 und 3, Lagerzeit 3 (4.3.)

Quelle	Typ III Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Stumpffarbe	3,858	2	1,929	7,274	0,001 = signifikant
Produkt	16,479	3	5,493	20,715	<0,001 = signifikant
Spaltbreite	0,664	1	0,664	2,505	0,116 = nicht signifikant

Tabelle 10 - 4.4 Farbeinfluss ΔL^* , Δa^* , Δb^* für Medium 2 und 3, Lagerzeit 3, Messposition 1-3, Stumpffarbe gemittelt, Spaltbreite 1 (4.4)

Medium	Wert	Produkt	Messposition	Mittelwert $\pm$ SD
Tee	ΔL^*	VE light+	mesial	-2,348 $\pm$ 0,570
			zentral	-1,363 $\pm$ 0,554
			distal	-2,363 $\pm$ 0,727
		VE warm+	mesial	-3,236 $\pm$ 0,493
			zentral	-1,803 $\pm$ 0,330
			distal	-2,944 $\pm$ 0,591
		Pan uni	mesial	-2,378 $\pm$ 0,753
			zentral	-0,919 $\pm$ 0,422
			distal	-1,967 $\pm$ 0,419

		Pan clear	mesial	-2,351 ± 0,867
			zentral	-1,951 ± 0,622
			distal	-2,204 ± 1,497
		GC trans	mesial	-0,583 ± 0,665
			zentral	0,173 ± 0,510
			distal	-0,521 ± 0,764
		GC A2	mesial	-0,321 ± 1,398
			zentral	0,361 ± 1,103
			distal	-0,237 ± 1,249
	M_{ΔL}*		mesial	-1,870 ± 0,345
	M_{ΔL}*		zentral	-0,917 ± 0,261
	M_{ΔL}*		distal	-1,706 ± 0,389
	Differenz		mesial/distal (randständig) - zentral	-0,871 ± 0,834
	Δa*	VE light+	mesial	-0,159 ± 0,229
			zentral	-0,663 ± 0,183
			distal	-0,280 ± 0,186
		VE warm+	mesial	-0,629 ± 0,307
			zentral	-1,367 ± 0,298
			distal	-0,750 ± 0,492
		Pan uni	mesial	0,933 ± 0,511
			zentral	-0,058 ± 0,171
			distal	0,761 ± 0,246
		Pan clear	mesial	0,778 ± 0,366
			zentral	0,524 ± 0,535
			distal	0,666 ± 0,828
		GC trans	mesial	-0,710 ± 0,397
			zentral	-1,120 ± 0,322
			distal	-0,769 ± 0,436
		GC A2	mesial	-0,823 ± 0,668
			zentral	-1,101 ± 0,606
			distal	-0,851 ± 0,678
	M_{Δa}*		mesial	-0,102 ± 0,178
	M_{Δa}*		zentral	-0,631 ± 0,159
	M_{Δa}*		distal	-0,204 ± 0,216

	Differenz		mesial/distal (randständig) - zentral	-0,478 ± 0,212
	Δb*	VE light+	mesial	0,372 ± 0,769
			zentral	-1,103 ± 0,423
			distal	0,132 ± 0,555
		VE warm+	mesial	0,289 ± 0,475
			zentral	-1,386 ± 0,299
			distal	0,491 ± 0,682
		Pan uni	mesial	0,008 ± 0,410
			zentral	-1,430 ± 0,157
			distal	-0,048 ± 0,446
		Pan clear	mesial	-0,392 ± 0,744
			zentral	-0,937 ± 0,782
			distal	-0,048 ± 1,414
		GC trans	mesial	0,264 ± 0,535
			zentral	-0,963 ± 0,337
			distal	0,497 ± 0,538
		GC A2	mesial	-0,077 ± 1,972
			zentral	-0,838 ± 1,528
			distal	0,193 ± 1,785
	M_{Δb}*		mesial	0,077 ± 0,398
	M_{Δb}*		zentral	-1,110 ± 0,305
	M_{Δb}*		distal	0,203 ± 0,423
	Differenz		mesial/distal (randständig) - zentral	1,250 ± 0,421
Rotwein	ΔL*	VE light+	mesial	-9,58 ± 1,524
			zentral	-5,584 ± 0,991
			distal	-8,994 ± 1,207
		VE warm+	mesial	-10,338 ± 1,309
			zentral	-5,654 ± 0,668
			distal	-9,129 ± 1,550
		Pan uni	mesial	-10,021 ± 0,953
			zentral	-5,786 ± 0,406
			distal	-10,284 ± 0,638
		Pan clear	mesial	-10,268 ± 1,136
			zentral	-6,578 ± 1,066

			distal	-9,727 ± 0,788
		GC trans	mesial	-9,144 ± 1,059
			zentral	-5,563 ± 0,461
			distal	-9,158 ± 0,822
		GC A2	mesial	-8,983 ± 1,235
			zentral	-5,481 ± 0,726
			distal	-9,037 ± 0,607
	M_{ΔL}*		mesial	-9,722 ± 0,497
	M_{ΔL}*		zentral	-5,774 ± 0,310
	M_{ΔL}*		distal	-9,388 ± 0,406
	Differenz		mesial/distal (randständig) - zentral	-3,781 ± 0,446
	Δa*	VE light+	mesial	-0,812 ± 1,050
			zentral	-2,262 ± 0,339
			distal	-1,0822 ± 0,673
		VE warm+	mesial	-1,276 ± 0,595
			zentral	-2,66 ± 0,562
			distal	-1,597 ± 0,825
		Pan uni	mesial	-1,343 ± 0,327
			zentral	-2,783 ± 0,324
			distal	-1,379 ± 0,498
		Pan clear	mesial	-0,629 ± 0,675
			zentral	-2,300 ± 0,494
			distal	-1,194 ± 0,693
		GC trans	mesial	-1,254 ± 0,640
			zentral	-2,482 ± 0,584
			distal	-1,14 ± 0,688
		GC A2	mesial	-0,748 ± 1,083
			zentral	-1,970 ± 0,691
			distal	-0,819 ± 0,673
	M_{Δa}*		mesial	-1,010 ± 0,316
	M_{Δa}*		zentral	-2,410 ± 0,211
	M_{Δa}*		distal	-1,202 ± 0,278
	Differenz		mesial/distal (randständig) - zentral	-1,303 ± 0,298
	Δb*	VE light+	mesial	-5,311 ± 0,576

			zentral	-5,327 ± 0,555
			distal	-5,236 ± 1,286
		VE warm+	mesial	-7,009 ± 0,613
			zentral	-6,294 ± 0,613
			distal	-6,797 ± 1,050
		Pan uni	mesial	-7,296 ± 0,517
			zentral	-6,551 ± 0,450
			distal	-7,354 ± 0,444
		Pan clear	mesial	-6,670 ± 0,676
			zentral	-6,562 ± 0,520
			distal	-7,161 ± 0,714
		GC trans	mesial	-6,747 ± 0,597
			zentral	-6,224 ± 0,491
			distal	-6,431 ± 0,646
		GC A2	mesial	-5,643 ± 1,419
			zentral	-5,342 ± 1,056
			distal	-5,628 ± 1,380
	M_{Δb}*		mesial	-6,446 ± 0,325
	M_{Δb}*		zentral	-6,050 ± 0,264
	M_{Δb}*		distal	-6,435 ± 0,401
	Differenz		mesial/distal (randständig) - zentral	-0,390 ± 0,369

Tabelle 11 - Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss ΔL^* , Δa^* , Δb^* der Messposition bei Spaltbreite 1, Medium 2 und 3 gemittelt, Lagerzeit 3 (4.4.)

Farbwert	Messposition	Paarweiser Vergleich	p-Wert	Signifikanz
ΔL^*	mesial	Mesial - Zentral	<0,05	Ja
		Mesial - Distal	<0,05	Ja
	zentral	Zentral - Distal	<0,05	Ja
	distal	-		
Δa^*	mesial	Mesial - Zentral	<0,05	Ja
		Mesial - Distal	<0,05	Ja
	zentral	Zentral - Distal	<0,05	Ja
	distal	-		
Δb^*	mesial	Mesial - Zentral	<0,05	Ja

		Mesial - Distal	>0,05	Nein
	zentral	Zentral - Distal	<0,05	Ja
	distal	-		

Tabelle 12 - Varianzanalyse ΔE_{00} Spaltbreite 1, Lagerzeit 3 (4.4.)

Quelle	Typ III Quadrat-summe	df	Mittel der Quadrate	F	Sig.
Produkt	151,807	5	30,361	52,307	<0,001
Stumpffarbe	23,362	2	11,681	20,124	<0,001
Medium	6949,324	2	3474,662	5986,148	<0,001
Messposition	275,663	2	137,832	237,456	<0,001 = signifikant

Tabelle 13 - Vergleich der ΔL^* , Δa^* und Δb^* Werte der Prüfkörper der Hauptuntersuchung und des Kontrollversuchs (4.5)

Medium	Wert	$M_{\Delta L^*}$ der Prüfkörper der Untersuchung (n = 270)	Wert	$M_{\Delta L^*}$ der Prüfkörper des Kontrollversuchs (n = 9)
Dest. Wasser	ΔL^*	0,553	ΔL^*	0,331
	Δa^*	-0,870	Δa^*	-0,92
	Δb^*	-0,731	Δb^*	-0,830
Tee	ΔL^*	-1,498	ΔL^*	-1,802
	Δa^*	-0,713	Δa^*	-0,745
	Δb^*	-0,145	Δb^*	-0,149
Rotwein	ΔL^*	-8,295	ΔL^*	-8,411
	Δa^*	-1,541	Δa^*	-1,672
	Δb^*	-6,310	Δb^*	-6,541

Delta E (CIE 2000)

The color difference, or ΔE , between a sample color (L_2, a_2, b_2) and a reference color (L_1, a_1, b_1) is:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)} \quad (1)$$

where

$$L' = (L_1 + L_2)/2 \quad (2)$$

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (3)$$

$$C_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2} \quad (4)$$

$$C = (C_1 + C_2)/2 \quad (5)$$

$$G = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{C^\tau}{C^\tau + 25^\tau}} \right) \quad (6)$$

$$a'_1 = a_1(1 + G) \quad (7)$$

$$a'_2 = a_2(1 + G) \quad (8)$$

$$C'_1 = \sqrt{a'^2_1 + b'^2_1} \quad (9)$$

$$C'_2 = \sqrt{a'^2_2 + b'^2_2} \quad (10)$$

$$C' = (C'_1 + C'_2)/2 \quad (11)$$

$$h'_1 = \begin{cases} \arctan(b_1/a'_1) & \text{if } \arctan(b_1/a'_1) \geq 0 \\ \arctan(b_1/a'_1) + 360^\circ & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

$$h'_2 = \begin{cases} \arctan(b_2/a'_2) & \text{if } \arctan(b_2/a'_2) \geq 0 \\ \arctan(b_2/a'_2) + 360^\circ & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$H' = \begin{cases} (h'_1 + h'_2 + 360^\circ)/2 & \text{if } |h'_1 - h'_2| > 180^\circ \\ (h'_1 + h'_2)/2 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(H' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2H') + 0.32 \cos(3H' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4H' - 63^\circ) \quad (15)$$

$$\Delta h' = \begin{cases} h'_2 - h'_1 & \text{if } |h'_2 - h'_1| \leq 180^\circ \\ h'_2 - h'_1 + 360^\circ & \text{else if } |h'_2 - h'_1| > 180^\circ \text{ and } h'_2 \leq h'_1 \\ h'_2 - h'_1 - 360^\circ & \text{otherwise} \end{cases} \quad (16)$$

$$\Delta L' = L_2 - L_1 \quad (17)$$

$$\Delta C' = C'_2 - C'_1 \quad (18)$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_1 C'_2} \sin(\Delta h'/2) \quad (19)$$

$$S_L = 1 + \frac{0.015(L' - 50)^2}{\sqrt{20 + (L' - 50)^2}} \quad (20)$$

$$S_C = 1 + 0.045C' \quad (21)$$

$$S_H = 1 + 0.015C'T \quad (22)$$

$$\Delta\theta = 30 \exp \left\{ - \left(\frac{H' - 275^\circ}{25} \right)^2 \right\} \quad (23)$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{C'^\tau}{C'^\tau + 25^\tau}} \quad (24)$$

$$R_T = -R_C \sin(2\Delta\theta) \quad (25)$$

$$K_L = 1 \text{ default} \quad (26)$$

$$K_C = 1 \text{ default} \quad (27)$$

$$K_H = 1 \text{ default} \quad (28)$$

Abbildung 33 - Erklärung der CIEDE2000-Farbabstandsformel⁹¹

8. Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen

- Teilnahme am Forschungspreis der AG Keramik 2025 (Bewerbungsbeitrag)
- Präsentation im Rahmen eines Gemeinschaftskongresses der zahnmedizinischen Fachgesellschaften (DGZMK), Oktober 2025, Berlin