

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

**Einfluss von Try-In-Pasten und Befestigungskom-
positen auf die endgültige Farbe von
Keramikveneers: Farbbestimmung mit digitaler
Fotografie und Spektralfotometrie**

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

vorgelegt von
Luca Valentin Brackhagen
aus Köln

promoviert am 13. Januar 2026

Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität zu Köln

2026

Dekan: Universitätsprofessor Dr. med. G. R. Fink
1. Gutachterin: Universitätsprofessorin Dr. med. dent. A. Liebermann
2. Gutachter: Privatdozent Dr. med. Dr. med. dent. M. Zinser

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 Prof. Dr. med. dent. A. Liebermann, M. Sc.
Frau Dr. med. dent. M. 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 konzipiert.

Aufgrund einer Überschneidung der Prüfkörpergruppen erfolgten sowohl die Versuchsdurchführungen als auch die Erfassung der Messwerte in Zusammenarbeit mit Herrn Binner, Doktorand des parallel bearbeiteten Projekts.

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

Die statistische Auswertung sowie die Aufarbeitung der Ergebnisse wurden eigenständig von mir vorgenommen. Unterstützt wurde ich durch die statistische und wissenschaftliche Beratung von 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 verpflichtete mich hiermit, die dort genannten Vorgaben bei allen wissenschaftlichen Tätigkeiten zu beachten und umzusetzen.

Köln, den 04.07.2025

Mein Dank gilt

Frau Prof. Dr. med. dent. A. Liebermann für die freundliche Überlassung des Themas dieser Arbeit. Besonders möchte ich mich bei ihr für ihre unermüdliche Unterstützung zu jedem ihr möglichen Zeitpunkt und ihre ansteckende Begeisterung für die Wissenschaft bedanken, die mich während der Arbeit stets motiviert hat.

Ebenso danke ich meinen Betreuerinnen, Frau Dr. med. dent. M. Di Gregorio-Schininà und Frau Dr. med. dent. B. Steeger, für ihre engagierte Unterstützung während der gesamten Projektphase. Mit ihrer fachlichen Kompetenz, ihrer wertvollen Hilfe bei der Versuchsplanung, ihrem lösungsorientierten Denken in schwierigen Situationen und ihrer Geduld bei der Korrektur meines anfangs noch spartanischen Schreibstils haben sie diese Arbeit in entscheidender Weise geprägt.

Meinen Kollegen und Freunden in der Werkstoffkunde, insbesondere Herrn Dr. rer. medic. F.-J. Faber danke ich für den stets offenen Austausch, den fachlichen Rat, praktische Anregungen und nicht zuletzt für den besten Kaffee der Klinik.

Besonders danken möchte ich meiner Freundin für ihr bemerkenswertes Durchhaltevermögen in einer Zeit, in der sie viel zu oft auf mich verzichten musste. Ihre unerschütterliche Unterstützung in allen Lebenslagen war für mich eine große Stütze und hat mir geholfen, diese intensive Phase zu meistern.

Abschließend danke ich meinen Eltern und meiner Schwester von Herzen für ihre liebevolle Unterstützung, die finanzielle Ermöglichung meines Studiums und ihre ideelle Förderung. Ohne sie wäre dieser Weg nicht möglich gewesen.

Meinen Eltern und meiner Freundin
für ihre Liebe und unermüdliche Unterstützung

Inhaltsverzeichnis

1. ZUSAMMENFASSUNG	9
2. EINLEITUNG	10
2.1. Farbe	10
2.1.1. Farbwahrnehmung	12
2.1.2. Störfaktoren bei der Farbwahrnehmung	12
2.1.3. Farbmessung	13
2.1.4. Farbabstandsformel CIEDE2000	13
2.1.5. Farbbestimmung in der Zahnmedizin	14
2.1.6. Spektralfotometrie	15
2.1.7. Kolorimetrie	15
2.1.8. Farbbestimmung mit digitaler Fotografie	15
2.2. Veneers	16
2.3. Keramiken	18
2.3.1. Einteilung von Keramiken	18
2.3.2. Keramiken zur Herstellung von Veneers	18
2.3.3. Herstellung von Veneers	19
2.4. Befestigungsmaterialien	20
2.4.1. Farbeinfluss von Befestigungsmaterialien auf keramische Restaurationen	21
2.4.2. Try-In-Pasten	21
2.5. Fragestellungen und Ziel der Arbeit	22
3. MATERIAL UND METHODEN	23
3.1. Materialien und Prüfkörperherstellung	23
3.1.1. Material Zahnstümpfe	23
3.1.2. Material Veneers	23
3.1.3. Befestigungsmaterialien	23
3.1.4. Herstellung der Zahnstümpfe	24
3.1.5. Herstellung der Veneers	26
3.1.6. Befestigungshilfe	29
3.2. Studiendesign	32
3.2.1. Gruppenaufteilung	33

3.3.	Prüfkörpervorbereitung für die Messdurchgänge	34
3.4.	Prüfkörpermessung	36
3.4.1.	Prüfkörpermessung (Vita Easyshade V)	36
3.4.2.	Versuchsaufbau (Vita Easyshade V)	36
3.4.3.	Prüfkörpermessung (eLAB)	37
3.4.4.	Versuchsaufbau (eLAB)	37
3.5.	Nachuntersuchung: Einfluss des Glanzbrandes auf die Farbmessung	39
3.6.	Datenverarbeitung und statistische Auswertung	40
3.6.1.	ΔE_{00} -Berechnung	40
3.6.2.	Statistik	40
4.	ERGEBNISSE	41
4.1.	Farbeeinfluss der Befestigungsmaterialien	41
4.2.	Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit	43
4.3.	Einfluss der Spaltbreite	45
4.4.	Einfluss der Farbe des Zahnstumpfs	47
4.5.	Einfluss der Dicke des Glanzbrandes auf die Farbwerte	51
5.	DISKUSSION	55
5.1.	Methodik	55
5.1.1.	Zahnstümpfe	55
5.1.2.	Veneers	55
5.1.3.	Messmethoden	56
5.2.	Einordnung der Ergebnisse	58
5.2.1.	Farbeeinfluss der Befestigungsmaterialien	58
5.2.2.	Farbabstand von Try-In und Komposit	58
5.2.3.	Einfluss der Spaltbreite	59
5.2.4.	Einfluss der Stumpffarbe	60
5.3.	Schlussfolgerung	61
6.	LITERATURVERZEICHNIS	62

7.	ANHANG	67
7.1.	Abbildungsverzeichnis	67
7.2.	Tabellenverzeichnis	69
7.3.	Messergebnisse	70
7.3.1.	Farbeeinfluss der Befestigungsmaterialien	70
7.3.2.	Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit	72
7.4.	Einfluss der Farbe des Zahnstumpfs	73
7.4.1.	Nachuntersuchung mit Deckgläschen	75
8.	VORABVERÖFFENTLICHUNGEN VON ERGEBNISSEN	80

Abkürzungsverzeichnis

CAD	Computer-Aided-Design
CAM	Computer-Aided-Manufacturing
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
ES	Vita Easyshade V
GC A2	G-CEM Veneer A2
GC trans	G-CEM Veneer Translucent
ISO	International Organization for Standardization
LC	lichthärtend
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

Die korrekte Farbwiedergabe ist besonders bei Frontzahnrestorationen ein entscheidendes Kriterium für den Behandlungserfolg. Der Farbeindruck wird bei transluzenten vollkeramischen Restaurationen neben der Farbe der Keramik von den Befestigungsmaterialien und der Stumpffarbe beeinflusst.

Befestigungssysteme mit Try-In-Pasten werden eingesetzt, um bereits bei der Anprobe die Restaurationsfarbe gemäß der korrespondierenden Befestigungskomposite zu beurteilen.

Ziel der vorliegenden In-vitro-Untersuchung war es, den Einfluss von adhäsiven Befestigungssystemen auf die Farbe von Keramikveneers zu prüfen und zu evaluieren, ob die Anwendung von Try-In-Pasten eine zuverlässige Farbabschätzung ermöglicht.

Als Prüfkörper wurden 300 Veneers aus IPS e.max CAD A2 HT in einer Materialschichtstärke von 0,4 mm hergestellt. Die fertiggestellten und mit Glanzbränden versehenen Veneers wurden auf 3D-gedruckten Zahnstümpfen in den Zahnfarben A1, A2 und A3 adhäsiv befestigt. Die fertigen Veneers wurden auf den gedruckten Stümpfen positioniert und zuerst einer Referenzmessung mit Aquagel unterzogen, anschließend mit Try-In-Pasten einprobiert und zuletzt mit den korrespondierenden Befestigungskompositen Variolink Esthetic warm+ und light+, Panavia Veneer Universal und Clear und G-CEM Veneer Translucent und A2 adhäsiv befestigt. In jedem Messdurchgang wurden mit einem Vita Easyshade V und dem eLAB-System jeweils 5 Farbmessungen pro Prüfkörper durchgeführt. Der Farbabstand „ ΔE_{00} “ wurde anschließend mit der CIEDE2000-Farbabstandsformel berechnet.

Beide Messgeräte zeigten deutliche Farbabstände ausgehend von den verschiedenen Befestigungsmaterialien, die zum Teil eine Farbveränderung über die klinische Akzeptanz hinaus verursachten ($\Delta E_{00} = 1,77$).

Die korrespondierenden Try-In-Pasten unterschieden sich in ihrem Farbeinfluss meist sichtbar von den Befestigungskompositen.

Innerhalb der Grenzen dieser Untersuchung lässt sich schlussfolgern, dass Try-In-Pasten eine näherungsweise Farbeinschätzung ermöglichen. Bei hohen Farbkontrasten zwischen Befestigungskomposit und Veneer erweisen sie sich jedoch als unzuverlässig hinsichtlich der Vorhersage des endgültigen Farbergebnisses.

2. Einleitung

Schönheitsideale haben in Zeiten von Social Media einen nie zuvor dagewesenen Stellenwert erreicht. Viele Menschen beschäftigen sich täglich mit ihrem Aussehen und versuchen sich gewissen Schönheitsidealen anzunähern. Dadurch wird auch der Ästhetik der Zähne eine größere Rolle zuteil.

Dieser Trend hat eine starke Entwicklung in der Zahnmedizin begünstigt. Zahnersatzmaterialien sollen zunehmend der Erscheinung von natürlichen Zähnen entsprechen und Versorgungen ein harmonisches Gesamtbild erzeugen.

Veneers erlangen aufgrund der zunehmenden ästhetischen Ansprüche an Bedeutung, indem sie schnelle und optisch hochwertige Veränderungen der Zähne ermöglichen. Dabei stellt das Angleichen an die natürliche Farbe der Nachbarzähne eine der größten Herausforderungen dar.¹⁻³

2.1. Farbe

Farbe entsteht der Farbtheorie nach durch Vorhandensein von Licht, einem Objekt und einem Betrachter. Bei der Interaktion von Licht mit einem Objekt verändert sich die Zusammensetzung des Lichts. Es entsteht eine objektspezifische Spektralkurve, eine Mischung aus Lichtwellen mit verschiedenen Wellenlängen und Intensitäten. Sie hängt von der Weiterleitung, der Absorption und der Reflexion des Lichts durch das Objekt ab.⁴

Lichtweiterleitung wird durch die Transluzenz oder Transparenz eines Objektes beschrieben. Beim Durchtritt des Lichts durch einen Körper treffen die Wellen auf Partikel, die sie abhängig von der Wellenlänge passieren oder von ihnen absorbiert werden.

Bei dem Phasenübergang des Lichts von einem Medium in ein anderes wird abhängig von der Dichte und Molekularstruktur eines Objekts, der Wellenlänge des Lichts und dem Einfallswinkel ein Teil des Farbspektrums absorbiert, ein Teil reflektiert und ein Teil gebeugt. Durch das Zusammenspiel dieser Effekte ergibt sich ein Gesamtfarbeindruck eines Objektes.

Im Falle eines Zahnes, der im Bereich der Zahnkrone aus Zahnschmelz, Dentin und Pulpa besteht, entsteht der Farbeindruck durch den sogenannten Double-Layer-Effekt, bei dem das Licht nicht nur mit dem Schmelz und seiner Oberfläche interagiert, sondern auch mit den tieferliegenden Schichten (siehe Abb. 1).⁴

Neben den optischen Eigenschaften des Objektes selbst spielt das Licht beziehungsweise das Farbspektrum der Lichtquelle eine entscheidende Rolle für die empfundene Farbe. Dieser Effekt heißt Metamerie. Durch ihn wird die vom Objekt reflektierte Spektralkurve maßgeblich beeinflusst, indem bestimmte Wellenlängen vermehrt und einige Wellenlängen weniger oder gar nicht im einfallenden Licht vorhanden sind. Das kann dazu führen, dass zwei Objekte je nach Lichtquelle gleichfarbig oder unterschiedlich wirken. In der Zahnmedizin kann dies besonders dann die Versorgung erschweren, wenn sich die natürliche Zahnfarbe und die Restaurationsfarbe je nach Lichtquelle mehr oder weniger gleichen.⁴

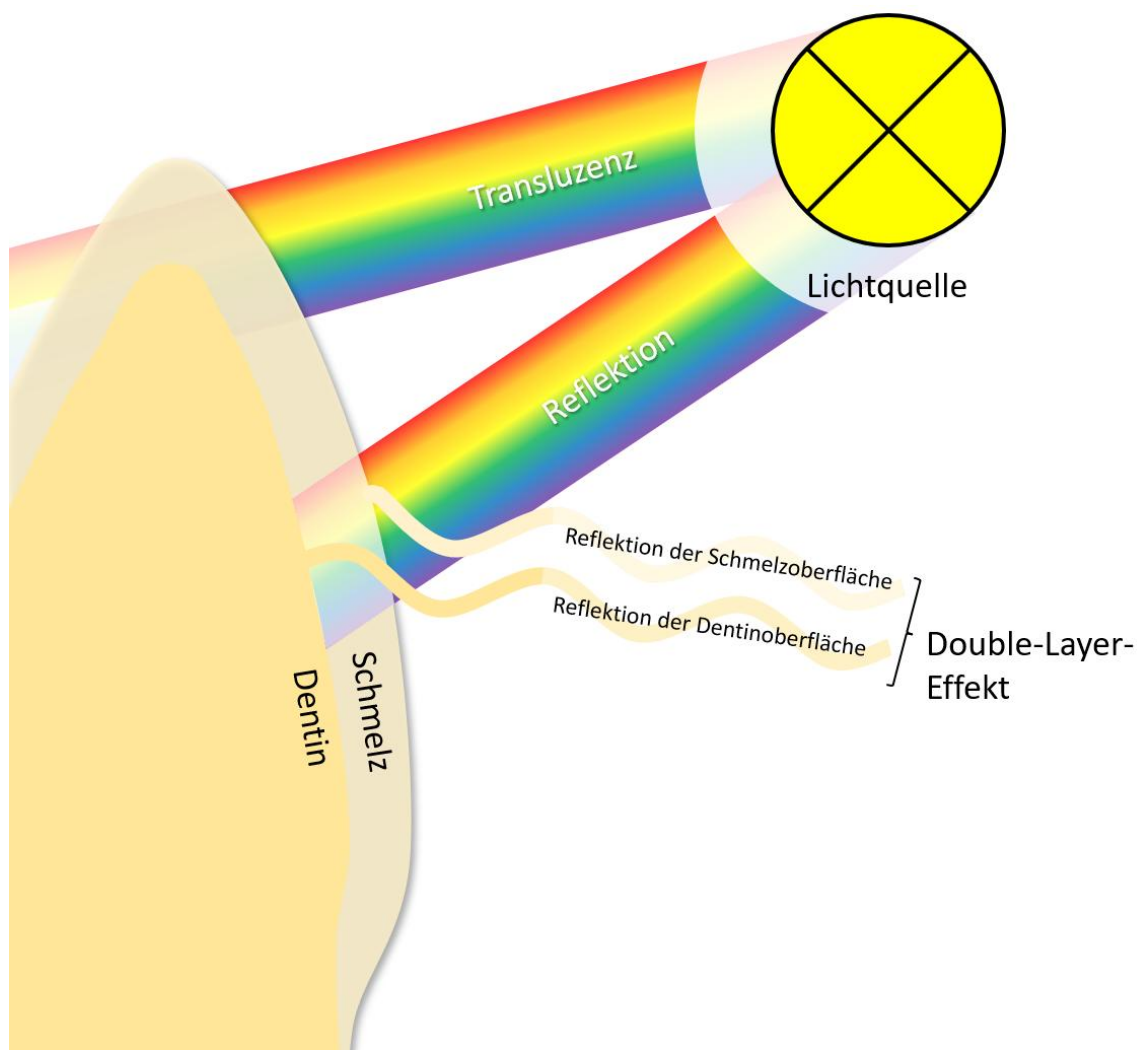


Abb. 1 Schemazeichnung – Interaktion des Lichts mit einem Zahn

2.1.1. Farbwahrnehmung

Licht wird im Auge an den zwei verschiedenen Fotorezeptoren der Netzhaut absorbiert. Dadurch werden diese abhängig von der Lichtintensität stimuliert. Die entstehenden Reize werden als Nervenimpulse über die Sehbahn an den visuellen Cortex weitergeleitet.

Dort werden die verschiedenen Informationen zu einem Bild zusammengefügt und Farbe wird wahrgenommen. Die Interpretation des Gesehenen erfolgt rein psychologisch.

Die Stäbchen sind für die Wahrnehmung von Helligkeit verantwortlich und ermöglichen das Sehen bei schwachen Lichtverhältnissen. Sie sind vor allem in der Peripherie der Retina in hoher Dichte vorhanden. Das Scharfsehen hingegen erfolgt durch die Zapfen, die in der Fovea centralis konzentriert sind. Diese liegen in drei unterschiedlichen Typen vor, die sich in ihren Absorptionsmaxima unterscheiden, welche im kurzwelligen (Blau), mittelwelligen (Grün) und langwelligen (Rotorange) Bereich des sichtbaren Lichts liegen.

Von diesen werden die Normfarbwerte X (Rotorange), Y (Grün) und Z (Blau) abgeleitet, die die Grundlage für die quantitative Bestimmung von Farbe sind.^{4,5}

2.1.2. Störfaktoren bei der Farbwahrnehmung

Der Prozess der Farbwahrnehmung ermöglicht viele inter- und intraindividuelle Farbwahrnehmungsunterschiede.

Die Farbwahrnehmung variiert interindividuell – also zwischen verschiedenen Beobachtern – in Abhängigkeit von der individuellen Sinneswahrnehmung und äußeren Faktoren.

Intraindividuelle Farbwahrnehmungsunterschiede lösen bei wiederholter Betrachtung eine abweichende Farbwahrnehmung bei dem gleichen Beobachter aus. Sie können neben veränderten äußeren Umständen durch den Einfluss von Ernährung, Emotionen und Ermüdung entstehen.⁴

2.1.3. Farbmessung

Die technische Farbmessung verfolgt das Ziel, einem Farbton mithilfe von Messgeräten einen definierten Messwert zuzuordnen und die Farbbestimmung dadurch objektivierbar und reproduzierbar zu gestalten. Dafür wurden auf Basis der Normfarbwerte diverse Farbskalen und Farbräume entwickelt. In der Industrie wird besonders der CIE-Lab-Farbraum der Commission Internationale de l'Éclairage (CIE) angewandt. Dieser ordnet einen Farbton in ein dreidimensionales Koordinatensystem mit den Parametern L (Helligkeit), a (Rot-Grün-Achse) und b (Gelb-Blau-Achse) ein (siehe Abb. 2).⁶

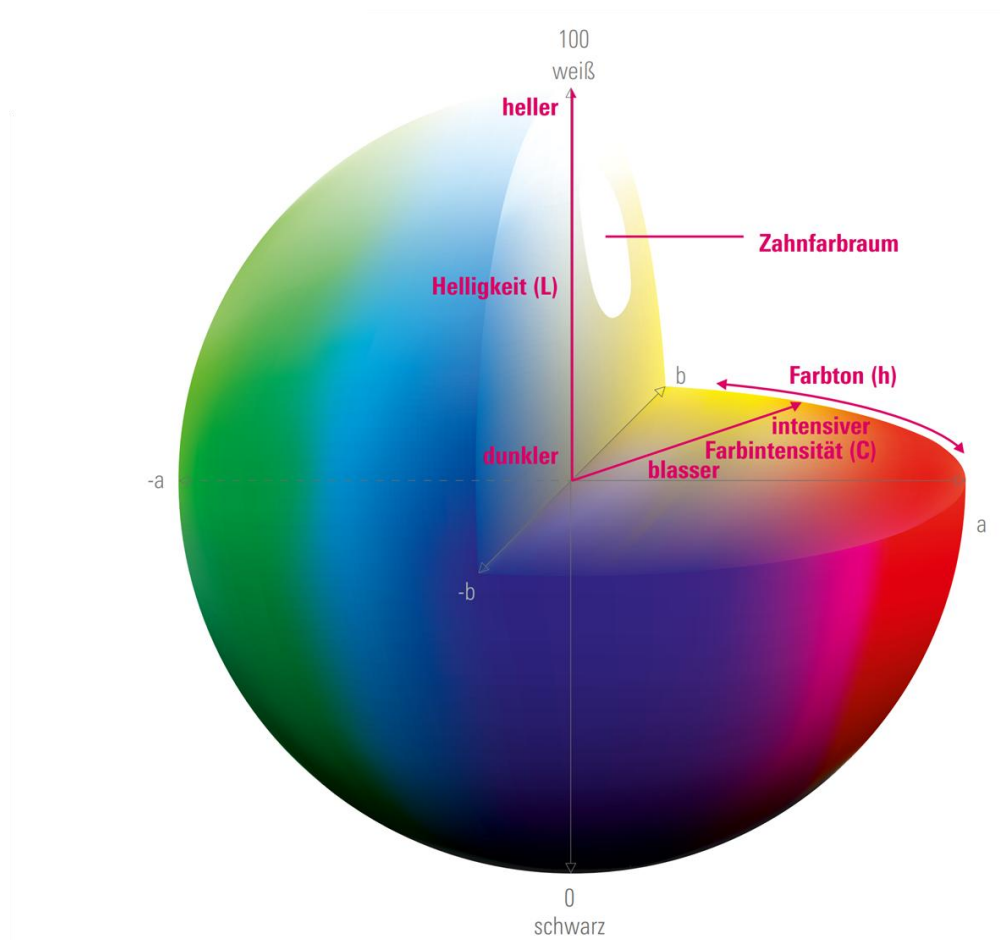


Abb. 2 CIE-Farbraum mit Darstellung des Zahnfarbraums ⁷

2.1.4. Farbabstandsformel CIEDE2000

Zwischen zwei Farbtonen im Lab-Farbraum lässt sich ein Farbabstand berechnen. Dieser wird als ΔE bezeichnet.

Es hat sich gezeigt, dass die Farbwahrnehmung nicht in allen Bereichen des Farbraums gleichmäßig ist, weshalb die Formel für die Berechnung des ΔE stetig weiterentwickelt wurde. Die aktuellste Formel ist die CIEDE2000-Farbabstandsformel für die Berechnung von ΔE_{00}

(Erläuterung siehe Anhang). Sie verbessert den Zusammenhang zwischen den gemessenen Farbabständen und den vom Beobachter wahrgenommenen Farbunterschieden.⁸

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

In der Literatur herrschte lange Uneinigkeit darüber, ab welchem Farbunterschied eine zahnmedizinische Versorgung als klinisch nicht akzeptabel gewertet werden sollte. Ohne diese Referenz waren Aussagen in diesem Bereich schwer vergleichbar und in einen klinischen Kontext zu setzen.⁹⁻¹⁸

Die International Organization for Standardization (ISO) hat in der Zahnmedizin zwei Grenzwerte für die Farbwahrnehmung definiert. Die sogenannte Wahrnehmungsgrenze liegt bei $\Delta E_{00} = 0,81$. Ab diesem Wert erkennen 50 % der Beobachter einen Farbunterschied zwischen zwei Farbtönen. Die Akzeptanzgrenze, wo der Farbunterschied von 50 % der Beobachter als nicht akzeptabel beurteilt wird, liegt bei $\Delta E_{00} = 1,77$.¹⁹

2.1.5. Farbbestimmung in der Zahnmedizin

Die Farbbestimmung in der Zahnmedizin ist in die visuelle und die instrumentelle Farbbestimmung einteilbar.²⁰

Die klassische visuelle Farbbestimmung funktioniert über einen optischen Farbabgleich mit einer Zahnfarbtafel, wobei der am nächsten an der gewünschten Farbe liegende Farbton gewählt wird.

Die instrumentelle Farbbestimmung beschreibt sämtliche Arbeitsabläufe, bei denen die Farbe mithilfe eines Messgerätes ermittelt wird. Dies sind zum Beispiel Spektrofotometer, Intraoralscanner oder Digitalkameras. Insbesondere die instrumentellen Methoden haben sich stark weiterentwickelt und ermöglichen reproduzierbarere Ergebnisse als die visuelle Farbbestimmung.²¹⁻²⁴

Es existieren Uneinigheiten darüber, welche Methode und welches Gerät die zuverlässigsten sind.^{20,22} Der Konsens ist, dass Spektrofotometrie, Kolorimetrie und digitale Fotografie mit Weißabgleich die genauesten Ergebnisse liefern.^{2,25}

Durch die Verwendung von Messgeräten werden die Farbwahrnehmungsunterschiede zwischen verschiedenen Beobachtern umgangen. Allerdings sind die Geräte zum Teil sehr techniksensibel und in ihren Ergebnissen häufig schwer miteinander vergleichbar.²⁶

Außerdem ist die Anschaffung der Messgeräte zum Teil sehr kostenintensiv.

2.1.6. Spektralfotometrie

Spektralfotometer messen mit dem Spektralverfahren. Sie belichten das Versuchsobjekt und ermitteln im Bereich des sichtbaren Lichts (meist 400-700 nm) eine Remissionskurve. Aus dieser werden unter Berücksichtigung der Lichtart die Normfarbwerte errechnet.⁵

Einige intraoral anwendbare Spektralfotometer wie das Vita Easyshade sind sogenannte Punktmessgeräte, die keinen Gesamtfarbeindruck des Zahnes, sondern einen kleinen Bereich messen (vgl. Abb. 3).

2.1.7. Kolorimetrie

Kolorimeter funktionieren ähnlich wie Spektralfotometer über die Beleuchtung des Versuchsobjekts mit einer Weißlichtquelle. Anders als bei einem Spektralfotometer wird das reflektierte Licht durch einen Tristimulus-Filter geleitet, bevor es auf den Sensor trifft. Dadurch wird die Farbe ähnlich wie bei dem menschlichen Auge anhand der Normfarbwerte bestimmt.^{5,27}

2.1.8. Farbbestimmung mit digitaler Fotografie

Für die Farbbestimmung werden mit einer Digitalkamera Messfotos aufgenommen und in einer Fotosoftware ausgewertet.

Das eLAB-System nutzt dafür zusätzlich die Kreuzpol-Blitztechnik. Diese filtert direkte Lichtreflexionen heraus, wodurch nur diffus gestreutes Licht am Sensor der Kamera ankommt und die Farbbestimmung nicht durch direkte Lichtreflexion gestört wird. Außerdem wird eine spezielle Grauwertkarte verwendet, anhand derer ein automatischer Weißabgleich in der eLAB-Prime-Software stattfindet (vgl. Abb. 3).¹

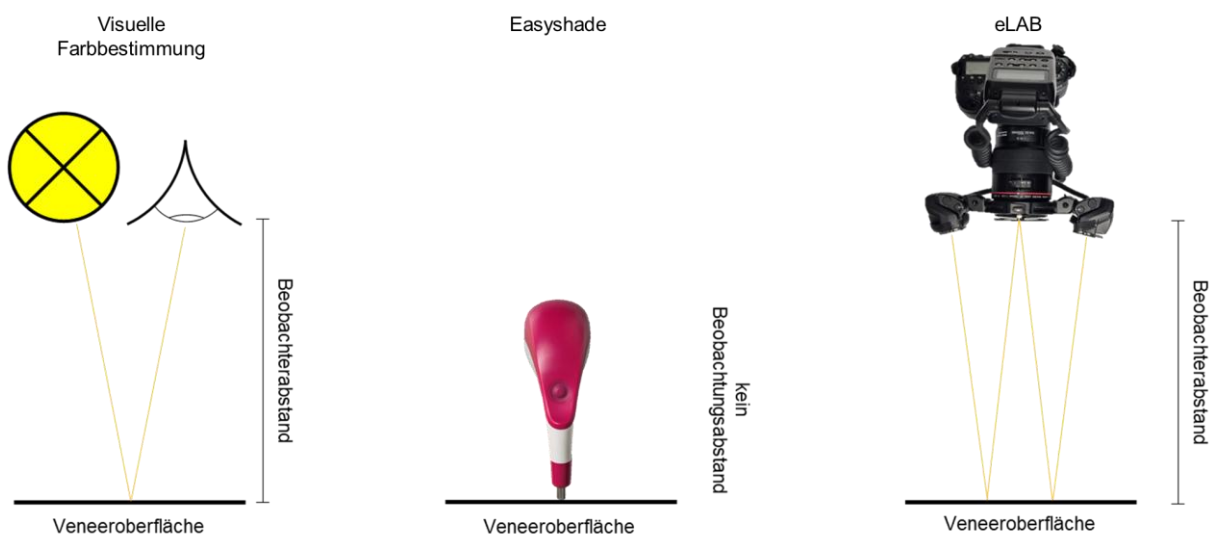


Abb. 3 Schemazeichnung Farbmessung und Farbwahrnehmung des Versuchsaufbaus

2.2. Veneers

Veneers sind schalenförmige Restaurationen, die je nach Indikation auf unterschiedliche Flächen der Zahnkrone ausgedehnt werden. Sie werden meist im ästhetischen Bereich eingesetzt, um die Zahnform zu korrigieren, die Zahnfarbe zu verändern und Zahnstellungsveränderungen durchzuführen. In abgewandelter Form werden sie auch als Führungsveneers an Eckzähnen für die Anpassung der dynamischen Okklusion und als Okklusionsonlays in den Stützzonen eingesetzt.²⁸

Bei der Präparation gilt es nach Möglichkeit eine reine Schmelzpräparation durchzuführen, um für den adhäsiven Verbund zwischen Zahn und Restauration optimale Haftwerte zu erreichen. Dementsprechend wird ein Zahnhartsubstanzabtrag von 0,3 bis 0,5 mm empfohlen, um dem Zahntechniker ausreichend Platz für das Schichten der Veneers einzuräumen und dabei die Mindestschichtstärken der Keramiken einzuhalten.²⁹⁻³²

Je nach Indikation für das Frontzahnveneer und der zu erwartenden Kaubelastung werden verschiedene Präparationsformen angewandt. Dabei wird zum einen die Ausdehnung nach inzisal beschrieben und zum anderen nach approximal.

Die Inzisalkante wird bei einer Fensterpräparation nicht eingekürzt und die Präparation findet rein vestibulär statt. Bei der Präparation mit Federrand wird die Zahnlänge ebenfalls nicht verändert, allerdings reicht die Präparationsgrenze bis an die Inzisalkante heran. Beide Formen werden auch als Non-Overlap-Veneer bezeichnet.

Wenn die Zahnlänge oder der Inzisalkantenverlauf verändert werden soll, wird diese vollständig eingekürzt. Dabei wird entweder eine palatinale Stufe angelegt oder die Inzisalkante mit einer Hohlkehlenpräparation gefasst. Dann spricht man von einem Overlap-Veneer.³⁰

Die Präparationsformen lassen sich je nach Ausdehnung nach approximal wie folgt einteilen. Beim Short-Wrap-Design erfolgt die Präparation ausschließlich labial. Wird die Präparation unter Erhalt des Kontakts zu den Nachbarzähnen in den Approximalraum ausgedehnt, spricht man vom Medium-Wrap-Design.

Soll die Zahnmorphologie umfassender verändert werden oder der Übergang zwischen Zahn und Veneer nicht im einsehbaren Bereich liegen, kommt das Long-Wrap-Design zum Einsatz, bei dem der Approximalkontakt aufgelöst wird.³⁰

Wird die Präparation zirkulär durchgeführt, spricht man von einem 360°-Veneer beziehungsweise einem Full-Wrap-Veneer.²⁸

Veneers stellen eine minimalinvasive Behandlungsoption in der zahnärztlichen Prothetik dar und liegen hinsichtlich ihrer Invasivität zwischen direkten Kompositrestaurationen und Vollkronen.³³

Die Herstellung im Labor ermöglicht hochästhetische Restaurationen mit Individualisierung durch den Zahntechniker. Vollkeramische Veneers weisen im Vergleich zu Kompositveneers eine höhere Überlebensrate von 89 % nach 9 Jahren auf.^{34,35}

Die Misserfolge lassen sich in verschiedene Kategorien einteilen: mechanisches Versagen des Veneers (31 %), Versagen des adhäsiven Verbundes (12,5 %) und ästhetische Probleme (31 %), die sowohl die Keramik als auch das Befestigungskomposit betreffen. Die übrigen Verluste sind auf parodontale Erkrankungen, Karies und Zahnfrakturen zurückzuführen.^{36,37}

2.3. Keramiken

2.3.1. Einteilung von Keramiken

Keramiken sind anorganische Werkstoffe, die auf Basis ihrer Zusammensetzung in Silikatkeramiken und Oxidkeramiken eingeteilt werden. Silikatkeramiken bestehen zu mindestens 15 Vol.-% aus Silikatkristallen, die in einer Glasmatrix eingebettet sind. Sie haben im Vergleich zu Oxidkeramiken überlegene optische Eigenschaften. Letztere haben einen Oxidanteil von mehr als 85 Vol.-%, was ihnen bessere mechanische Eigenschaften verleiht.²⁸

2.3.2. Keramiken zur Herstellung von Veneers

Aufgrund der ästhetischen Anforderungen werden bei vollkeramischen Veneers bevorzugt Silikatkeramiken eingesetzt. Ihre hohe Transluzenz und die Möglichkeit, sie durch die Schichttechnik zu individualisieren, ermöglichen eine naturgetreue Reproduktion der Zahnästhetik. Zu den Silikatkeramiken zählen die Leuzitkeramiken, Lithium(di-)silikatkeramiken und Lithiumalumosilikatkeramiken.²⁸

Lithiumdisilikatkeramiken wie IPS e.max CAD zeichnen sich durch ihre Ästhetik bei guter Festigkeit aus. Diese erreicht das Material durch einen hohen Anteil von Lithium-Disilikat-Kristallen ($65 \pm 5 \%$) in der Glasmatrix. Die Kristalle liegen in länglicher Form vor, wodurch sie sich während der Phase der Keimbildung verzahnen und so Bruchfestigkeiten von 530 MPa erreichen.^{28,38}

Auch Zirkonoxid-verstärkte Lithiumsilikatkeramiken sowie transluzente Zirkonoxidkeramiken werden als mögliche Restaurationsmaterialien für diese Art der Versorgung beschrieben.³⁹ Diese Materialgruppen werden im Rahmen der vorliegenden Untersuchung jedoch nicht berücksichtigt.

2.3.3. Herstellung von Veneers

Dentalkeramiken lassen sich ebenfalls nach ihren Verarbeitungsprozessen unterscheiden.

Bei der Schichttechnik oder auch Schlickertechnik genannt, wird Schicht für Schicht eine keramische Suspension aufgetragen und gebrannt.

Die plastische Umformung beschreibt das Pressen von vorgefertigten Keramikpellets in die gewünschte Form. Dafür werden diese erhitzt, bis sie eine teigige Konsistenz erreichen oder schmelzen und dann in eine hitzebeständige Form verpresst.

Der dritte Herstellungsprozess ist die CAD-CAM-Technik. Dabei wird die gewünschte Form subtraktiv durch maschinelles Schleifen oder additiv durch 3D-Druck erreicht.³¹

Bei der minimalinvasiven Versorgung mit Veneers kommen teils Keramikschichtstärken von nur 0,3 bis 0,5 mm zum Einsatz. Besonders anspruchsvoll ist dabei die Herstellung der dünn auslaufenden Restaurationsränder. Hier hat sich vor allem die klassische Schichttechnik durch den Zahntechniker bewährt. Die schichtweise Herstellung mit verschiedenen Farbtönen liefert außerdem die bestmögliche Ästhetik und eine voll individualisierte Farbwiedergabe.³¹

Monolithische Veneers werden im CAD/CAM-Verfahren hergestellt oder gepresst.

Computer-Aided-Design (CAD) beschreibt das Designen einer Versorgung in einer dafür vorgesehenen Software. Diese kann anschließend im Computer-Aided-Manufacturing (CAM) voll automatisiert aus einem industriell gefertigten Rohling gefräst werden.³¹

Anschließend wird das gefräste Werkstück von der Halterung abgetrennt, nachbearbeitet und individualisiert.

Im Falle von IPS e.max CAD werden Keramikrohlinge im teilkristallisierten Zustand geschliffen. Im Anschluss erfolgt ein Kristallisationsbrand, durch den die Keramik die finalen mechanischen und optischen Eigenschaften erhält. Mit diesem Verfahren sollen die Schleifkörper langsamer verschleifen.^{31,40}

Die fertiggestellten Restaurationen werden am Patienten einprobiert, angepasst und schließlich adhäsiv befestigt. Dies führt zu einem Verbund, in dem die auf die Keramik wirkenden Kräfte über das Befestigungskomposit an den Zahn weitergegeben werden. Das reduziert das Risiko für eine Rissausbildung an der Innenseite der Restauration.²⁸

2.4. Befestigungsmaterialien

Für die Befestigung von Veneers sind Zemente ungeeignet, da aufgrund der Präparationsform keine ausreichende Retention erreicht wird. Außerdem sind die dünnwandigen Veneers ohne einen kraftschlüssigen Verbund zum Zahnschmelz deutlich fraktur anfälliger. Auch die Farbwirkung der Versorgung würde durch die konventionellen Zemente gestört.

Aus diesem Grund sind Befestigungskomposite für das Einsetzen von Veneers der Goldstandard. Sie bestehen aus einer Monomermatrix, die meist unterschiedliche modifizierte Methacrylatgruppen beinhaltet. Diese Basismonomere werden mit Füllstoffen zu einem Gewichtsanteil von bis zu 50 % angereichert. Zum Einsatz kommen unter anderem feinkörnige Gläser, Oxide und Silikate, die aufgrund ihrer geringen Partikelgröße dünne Materialschichten in der Befestigungsfuge von etwa 50 µm erlauben.^{41,42}

Für die adhäsive Befestigung mit konventionellen Befestigungskompositen bedarf es einer Vorbehandlung der Zahnoberfläche und der Restauration. Durch die Konditionierung der Oberflächen wird ein chemischer Verbund erreicht und die Benetzbarkeit der Oberfläche erhöht. Die Anwendung dieser Konditionierung ist oft aufwendig und techniksensibel. Darum wurden Befestigungskomposite entwickelt, die keiner oder nur einer reduzierten Vorbehandlung des Zahnes und der Restauration bedürfen. Diese selbstadhäsiven Befestigungskomposite beinhalten modifizierte Monomere mit sauren Gruppen, die die Zahnhartsubstanz demineralisieren und eine Bindung mit ihr eingehen.

Wegen des besseren Haftverbundes und optisch hochwertigeren Ergebnissen haben sich die konventionellen Befestigungskomposite als das Befestigungsmaterial der Wahl für Veneers durchgesetzt.^{41,42}

Befestigungskomposite stehen sowohl in lichthärtender (LC) als auch in dualhärtender (DC) Variante zur Verfügung. Bei lichthärtenden Systemen wird die Polymerisation fotochemisch initiiert. Dabei werden die Initiatoren durch Licht bestimmter Wellenlänge und Lichtintensität angeregt. Dualhärtende Komposite polymerisieren zusätzlich chemisch und somit auch unabhängig von der Lichtexposition. Es empfiehlt sich für die Befestigung von Veneers lichthärtendes Komposit zu verwenden. So besteht mehr Zeit für die Positionierung der Veneers.^{41,42}

Da sich die Studie an der klinischen Praxis zur Befestigung von Frontzahnveneers orientiert, wurden ausschließlich lichthärtende konventionelle Befestigungskomposite untersucht. Andere Befestigungsmaterialien fanden keine Berücksichtigung.

2.4.1. Farbeinfluss von Befestigungsmaterialien auf keramische Restaurationen

Der Zahnersatz und seine optischen Eigenschaften sind nicht allein für das endgültige Farbergebnis der Restauration verantwortlich. Aufgrund der minimalinvasiven Präparation und der oft geringen Schichtstärke sind Veneers besonders anfällig für Farbveränderungen, die durch das verwendete Befestigungskomposit und die Zahnstumpffarbe hervorgerufen werden.⁴³⁻⁴⁶

Die Farbe, Opazität und Schichtdicke des Befestigungskomposits üben einen signifikanten Einfluss auf das endgültige Farbergebnis der Veneers aus und können zu Farbabweichungen führen, die über die klinische Akzeptanzgrenze hinausgehen.^{10,47-49}

Um den finalen Farbeindruck keramischer Restaurationen gezielt zu beeinflussen, bieten zahlreiche Hersteller Befestigungskomposite in variierenden Farbtönen und Transluzenzstufen an.⁵⁰⁻⁵²

2.4.2. Try-In-Pasten

Um die Farbe des Befestigungskomposits auszuwählen und die finale Farbe der transluzenten Restaurationen abschätzen zu können, werden zu den verschiedenfarbigen Befestigungskompositen passende Try-In-Pasten angeboten. Sie werden für die Einprobe der Restauration vor der definitiven Befestigung verwendet und sollen den Farbeinfluss des Befestigungskomposits möglichst genau simulieren, um so eine Einschätzung der finalen Ästhetik und Farbe zu ermöglichen.³⁸

Aktuelle In-vitro-Untersuchungen (vgl. Tabelle 7 im Anhang) deuten darauf hin, dass Try-In-Pasten einen geringeren Einfluss auf die endgültige Farbe haben als die entsprechenden Befestigungskomposite. Auch in der klinischen Anwendung tritt dieses Problem auf und erschwert es, optimale Farbergebnisse zu erreichen.⁴³⁻⁴⁶

2.5. Fragestellungen und Ziel der Arbeit

Die experimentelle Untersuchung soll den Effekt von Try-In-Pasten und Befestigungskompositen auf die finale Farbe von Veneers evaluieren. Weiterhin soll die Untersuchung klären, ob diese Farbeffekte bei korrespondierenden Try-In-Pasten und Befestigungskompositen übereinstimmen. Es gilt zusätzlich zu dem Vergleich der verschiedenen Befestigungsmaterialien, den Einfluss der Schichtstärke des Befestigungskomposits und den Einfluss der verschiedenen Zahnstumpffarben zu vergleichen.

Es wurden folgende Fragestellungen formuliert:

1. *Lässt sich der Farbeinfluss von Try-In-Pasten und Befestigungskompositen auf Veneers messtechnisch nachweisen?*
2. *Weisen Try-In-Pasten und korrespondierende Befestigungskomposite unter gleichen Bedingungen messtechnisch signifikante Farbabstände auf?*
3. *Hat die Schichtstärke des Befestigungsmaterials einen Einfluss auf den Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit?*
4. *Beeinflusst die Stumpffarbe den Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit?*

3. Material und Methoden

3.1. Materialien und Prüfkörperherstellung

3.1.1. Material Zahnstümpfe

Die Zahnstümpfe wurden aus FREEPRINT temp 385 (Detax GmbH), einem 3D-druckfähigen Kunststoff für die Herstellung von Provisorien, hergestellt. Es wurden je 100 Zahnstümpfe in den VITA Zahnfarben A1, A2 und A3 gedruckt.

3.1.2. Material Veneers

Es wurden 300 Veneers aus IPS e.max CAD (Ivoclar Vivadent GmbH) in A2 HT mit einer Materialschichtstärke von 0,4 mm hergestellt.

3.1.3. Befestigungsmaterialien

Die Befestigungsmaterialien umfassen die Try-In-Pasten und Befestigungskomposite Variolink Esthetic LC Light+ (VE light+) und Variolink Esthetic LC Warm+ (VE warm+) (Ivoclar Vivadent GmbH), Panavia Veneer LC Universal (Pan uni) und Panavia Veneer LC Clear (Pan clear) (Kuraray Co., Ltd.) sowie G-CEM Veneer Translucent (GC trans) und G-CEM Veneer A2 (GC A2) (GC Corporation) (siehe Tabelle 1).

Die Prüfkörper wurden mit Try-In-Pasten und den korrespondierenden Kompositen der in Tabelle 1 dargestellten Produktreihen befestigt. Im weiteren Verlauf werden die Try-In-Pasten und Befestigungskomposite zusammengefasst als Befestigungsmaterialien bezeichnet.

Tabelle 1 Übersicht der verwendeten Befestigungsmaterialien

Produktreihe (Try-In & Komposit)	Abkürzung	Hersteller
Variolink Esthetic LC Light+	VE light+	Ivoclar Vivadent GmbH
Variolink Esthetic LC Warm+	VE warm+	Ivoclar Vivadent GmbH
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

3.1.4. Herstellung der Zahnstümpfe

Für die Zahnstümpfe wurde die STL-Datei einer Masterpräparation des Frasacozahns 21 verwendet.

Als Präparationsdesign wurde ein Medium-Wrap-Design mit palatinaler Stufe verwendet. Es wurde im Sinne einer minimalinvasiven Präparation ein Abtrag von 0,3 mm gewählt.

In einem Vorversuch wurde der Datensatz von der Oberfläche eines natürlichen Zahnes nach der Präparation mit einem Rotringdiamanten untersucht. Die Oberfläche wurde mit einem digitalen Mikroskop (VHX 5000, Keyence Deutschland GmbH) vermessen. Der Zahn wies an den beschliffenen Flächen eine Welligkeit von $\pm 7 \mu\text{m}$ auf (siehe Abb. 4).

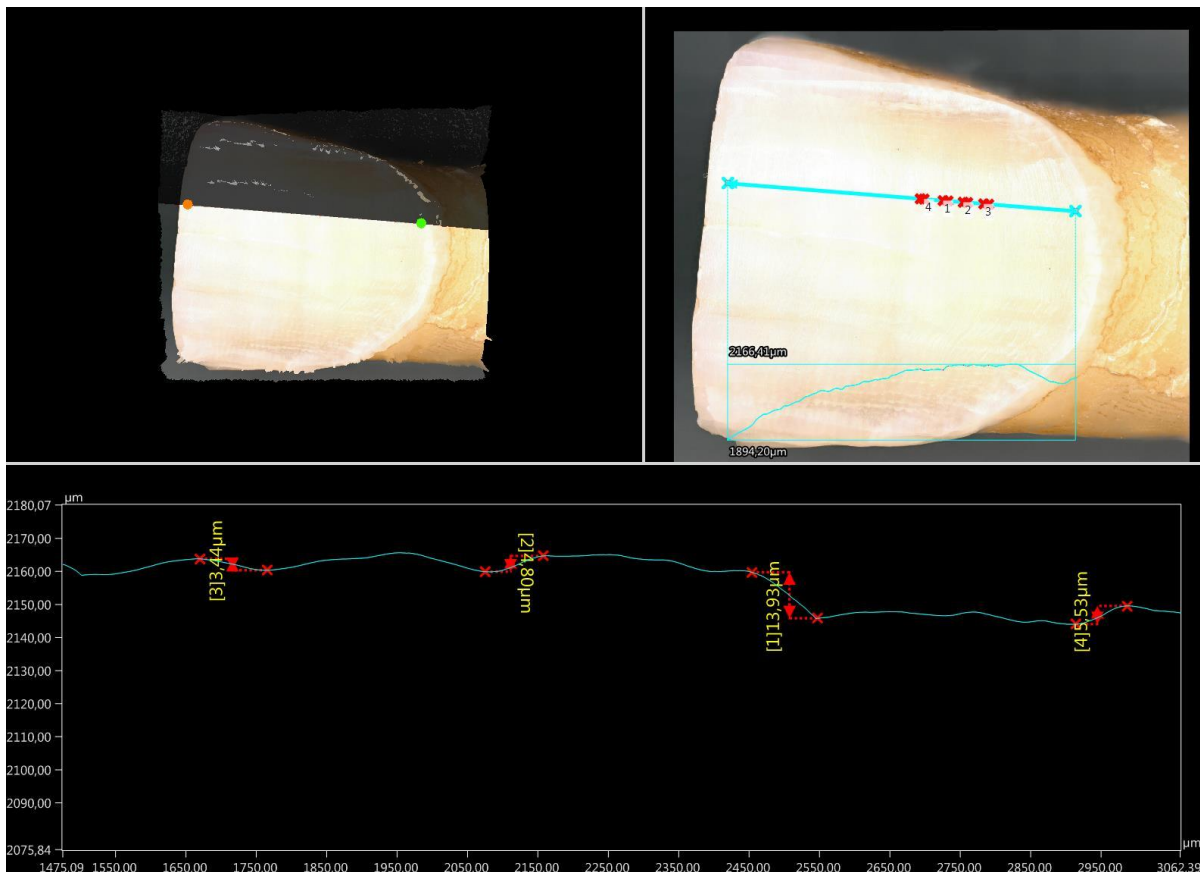


Abb. 4 Oberflächenprofilmessung eines natürlichen Zahnes nach Rotring-Präparation

Für die Herstellung der Kunststoffstümpfe wurde ein 3D-Drucker (SolFlex 350, VOCO GmbH) verwendet. Bei der maximalen Z-Auflösung von 25 µm wiesen die gedruckten Stümpfe eine Oberflächenrauigkeit von $\pm 15 \mu\text{m}$ auf.

Die Zahnstümpfe wurden in zwölf Druckvorgängen gedruckt. Anschließend wurden die Kunststoffstümpfe mit Isopropanol gereinigt. Dafür erfolgte eine grobe Vorreinigung und Entfernung der Supportstrukturen (ohne Ultraschall), eine Zwischenreinigung (2 Minuten Ultraschall) und eine Endreinigung (2 Minuten Ultraschall) in drei verschiedenen Becken.

Nachdem die Stümpfe getrocknet waren, wurden sie in zwei Durchgängen mit je 2000 Lichtblitzen endgehärtet (Otoflash G171, Voco GmbH).

Die fertigen Stümpfe wurden auf Defekte oder Verschmutzungen überprüft, dann 3 Minuten in einem Ultraschallbad mit destilliertem Wasser gereinigt und nach dem Trocknen randomisiert auf die Prüfkörpergruppen verteilt.

3.1.5. Herstellung der Veneers

Für die Herstellung der Veneers wurde einer der gedruckten Zahnstümpfe in ein Oberkiefermodell (Frasaco GmbH) eingeschraubt und mit einem Intraoralscanner (3Shape TRIOS® MOVE+, Straumann Group) gescannt (siehe Abb. 5).



Abb. 5 3D-gedruckter Zahn 21 in Oberkiefermodell eingesteckt

Das digitalisierte Modell wurde mithilfe des Ceramill CAD/CAM-Equipments (Amann Girrbach AG) weiterverarbeitet.

Zuerst wurde in der Software Ceramill Mind das Veneer auf dem Zahn 21 sowohl mit einer Spaltbreite von 50 μm als auch mit einer Spaltbreite von 80 μm für das Befestigungsmaterial designt. Dabei wurde eine gleichmäßige Keramikschichtstärke von 0,4 mm angelegt. Die Veneers wurden in der Ceramill Match genestet und anschließend mit der Ceramill Motion 2 geschliffen (siehe Abb. 6).

Die Veneers wurden unter Wasserkühlung von dem Rohling abgetrennt und auf eine Schichtstärke von 0,4 mm (\pm 0,05 mm an neun Messstellen im Bereich der späteren Farbmessung) poliert (DCB-Schleifer, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG). In einem Kristallisationsbrand mit IPS e.max CAD Crystall./Glaze Spray (Ivoclar Vivadent GmbH) wurden die Veneers in dem Sinterofen (Vacumat 6000 M, Vita Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG) fertiggestellt (siehe Abb. 7).

Abschließend wurden die Passung auf den Zahnstümpfen, die Materialschichtstärke der Veneers und der Glanzbrand kontrolliert. Vorbereitend für die Versuche wurden alle Veneers mit einem Dampfstrahler (Steamer X3, Amann Girrbach AG) von Schleifrückständen befreit und anschließend 3 Minuten in einem Ultraschallbad mit Isopropanol gereinigt. Nach dem Trocknen wurden sie randomisiert auf die Prüfkörpergruppen verteilt.

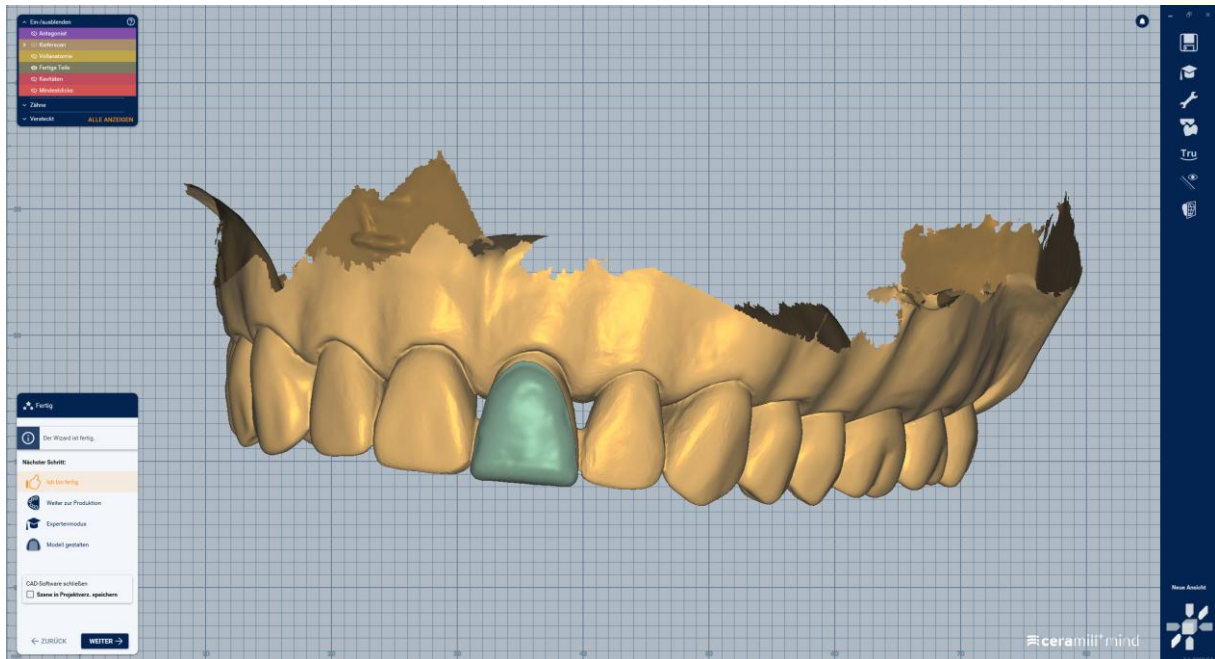


Abb. 6 Entwurfansicht in der Ceramill Mind

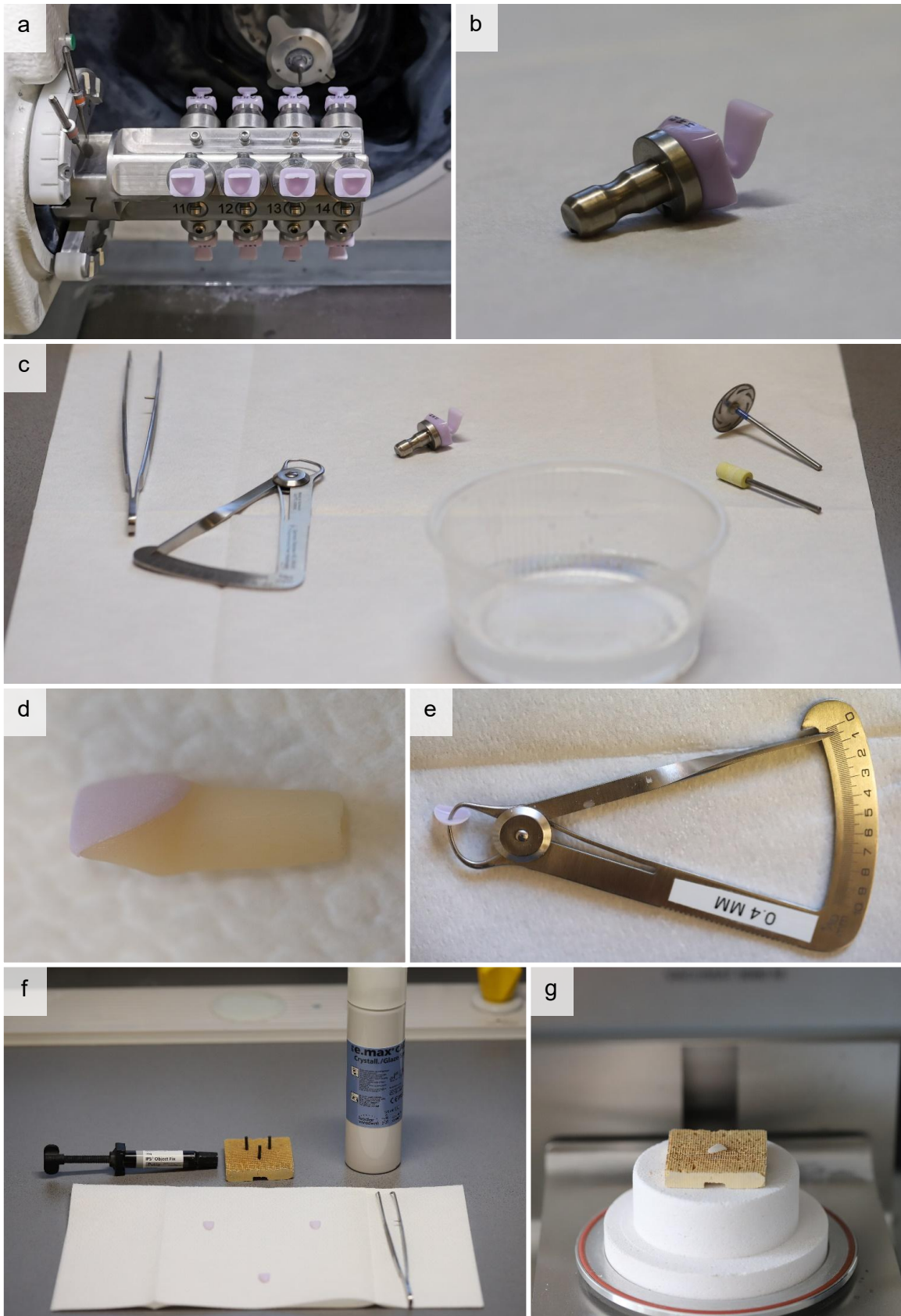


Abb. 7 Fertigstellung der 300 Veneers nach dem Schleifvorgang

(a) abgeschlossener Fräsvorgang (b) Veneers aus Rohlinghalterung entnommen (c) Abtrennen des Verbinders (d) Kontrolle der Passung (e) Kontrolle der Keramikschichtstärke an neun Messpunkten (f) Auftragen des Glanzsprays (g) Glanz- und Kristallisationsbrand

3.1.6. Befestigungshilfe

In Vorversuchen wurde festgestellt, dass durch wiederholtes Befestigen des gleichen Prüfkörpers merkliche Unterschiede in der Farbe entstehen können.

Als Ursache sollte eine unterschiedliche Positionierung des Veneers ausgeschlossen werden. Dafür wurde ein Prüfkörper mit Befestigungskomposit verklebt. Daraufhin wurde er in Palavit G (Kulzer GmbH) eingebettet und zweimal längs geschnitten (IsoMet 1000, Buehler, ITW Test & Measurement GmbH European Headquarters).

Die dadurch sichtbare Materialschichtstärke des Befestigungskomposits wurde unter einem digitalen Mikroskop (VHX 5000, Keyence Deutschland GmbH) vermessen (siehe Abb. 8).



Abb. 8 Spaltbreite zwischen Veneer und Stumpf nach manueller Befestigung

Dabei wurde deutlich, dass die Materialschichtstärke zwischen 30 und 300 μm variierte und somit ursächlich für die verschiedenen Messergebnisse war.

Infolgedessen wurde eine Befestigungshilfe entworfen (Fusion 360, Autodesk, Inc.), mit der die Position des Veneers aus der Planungssoftware auf das Modell übertragen werden konnte (siehe Abb. 10).

Der Vorversuch wurde mit der Befestigungshilfe wiederholt. Dabei zeigte sich eine gleichmäßigere Schichtstärke des Befestigungskomposits, die sich nahe an den angestrebten 50 μm und 80 μm befand (siehe Abb. 9).

Sämtliche Veneers wurden in allen Messdurchgängen unter Verwendung der Befestigungshilfe befestigt (siehe Abb. 11).



Abb. 9 Spaltbreite zwischen Veneer und Stumpf mit Befestigungshilfe

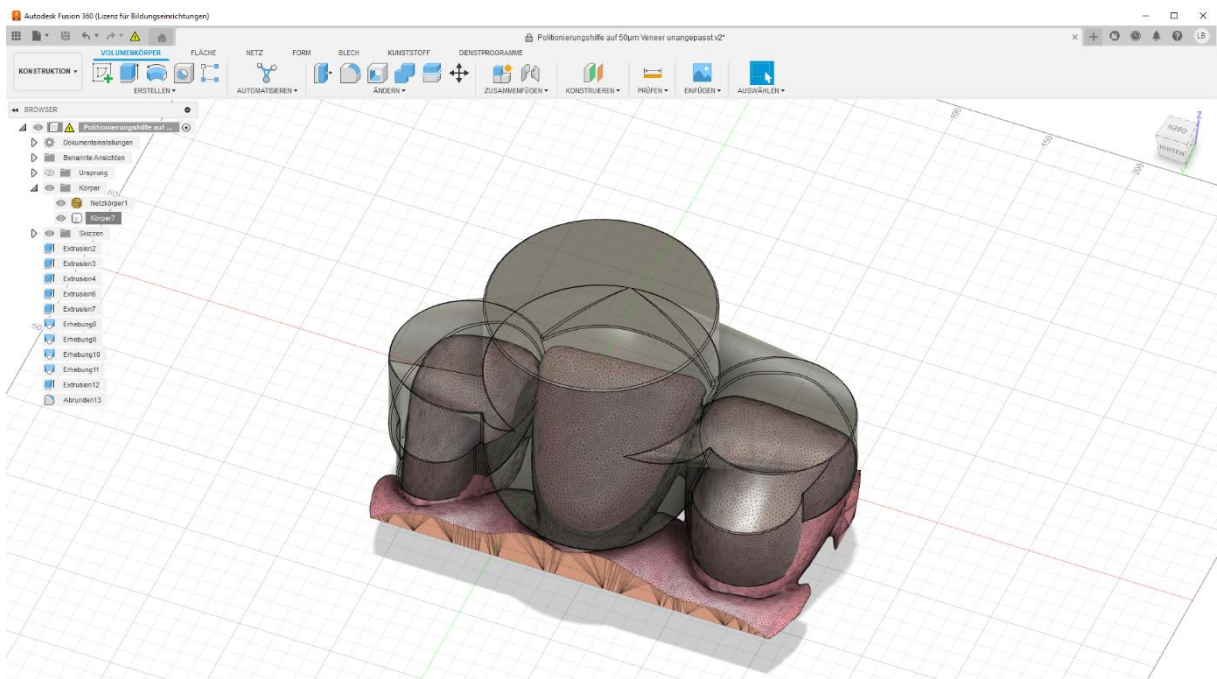


Abb. 10 Befestigungshilfe in der CAD-Software



Abb. 11 Befestigung eines Veneers mit Befestigungshilfe

3.2. Studiendesign

Die Untersuchung sah vor, dass im ersten Schritt eine randomisiert ausgewählte Kontrollgruppe von 10 Prüfkörpern pro Zahnfarbe und Befestigungsspalt untersucht wurde ($n=60$). Hierbei wurde anstelle der Befestigungsmaterialien ein Ultraschallgel (Gecom Gelprodukte) verwendet, um in den Befestigungsspalt ein Medium mit möglichst geringem Farbeinfluss einzubringen. Der ermittelte Farbmittelwert wurde als Referenzfarbwert verwendet, um später die Farbabstände zu bestimmen.

Den zweiten und dritten Messdurchgang durchliefen alle Prüfkörper (vgl. Abb. 12).

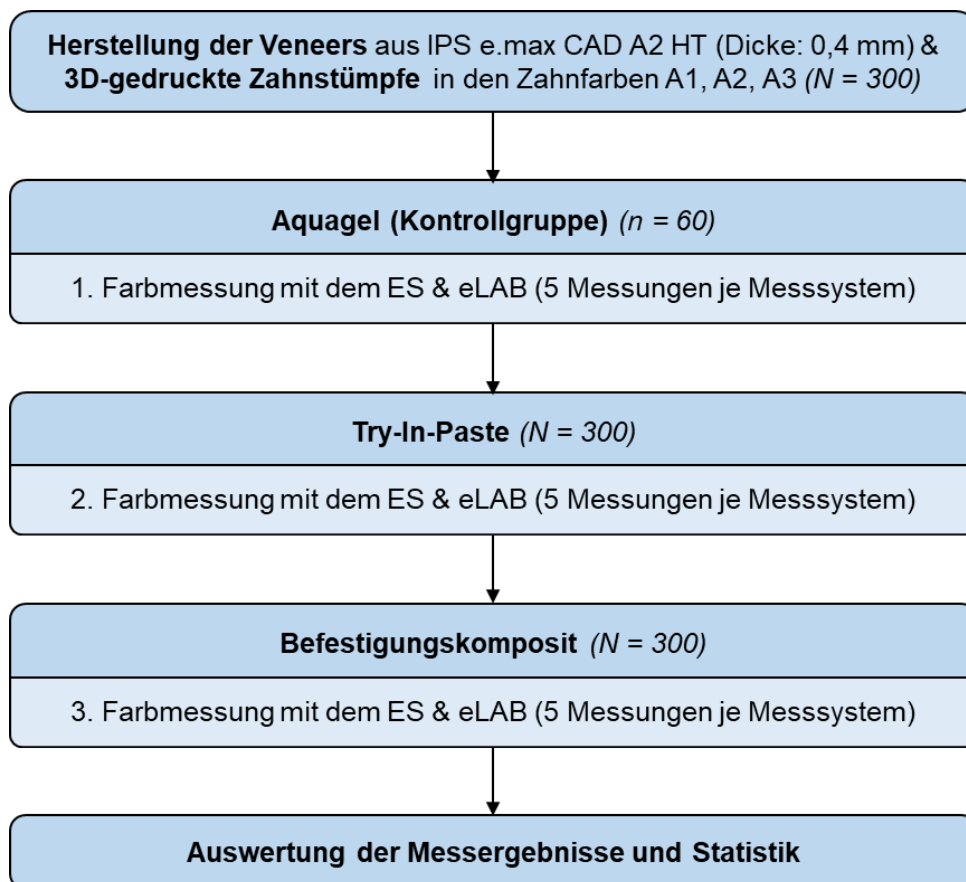


Abb. 12 Studiendesign

3.2.1. Gruppenaufteilung

Die insgesamt 300 Prüfkörper bestehend aus je einem Veneer und einem Zahnstumpf unterschieden sich in der am Veneer eingestellten Spaltbreite für das Befestigungskomposit. Die 180 Prüfkörper mit eingestellten Spaltbreiten von 50 µm wurden auf die verschiedenen Stumpffarben in den Zahnfarben A1, A2, A3 aufgeteilt. Somit ergaben sich für jede Stumpffarbe 60 Prüfkörper je Spaltbreite. Diese 60 Prüfkörper mit Spaltbreiten von 50 µm und gleicher Stumpffarbe wurden entsprechend den 6 Produktreihen aufgeteilt.

Die 120 Prüfkörper mit Spaltbreiten von 80 µm wurden ebenfalls nach den verschiedenen Stumpffarben unterteilt und mit 4 Produktreihen getestet.

Dadurch ergaben sich 30 Gruppen mit je 10 Prüfkörpern in den Messungen mit Try-In-Paste und Befestigungskomposit (siehe Abb. 13).

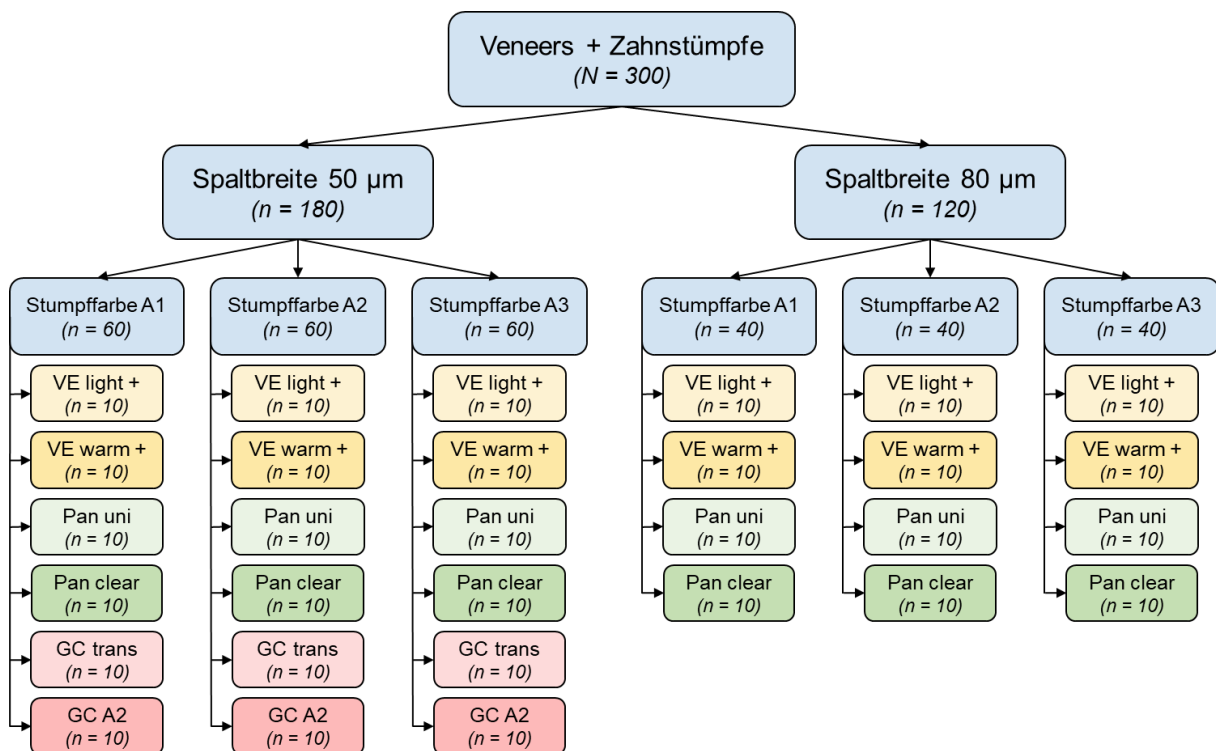


Abb. 13 Gruppenaufteilung

3.3. Prüfkörpervorbereitung für die Messdurchgänge

Die vorbereiteten Zahnstümpfe wurden für die Messungen in das Frasacomodell eingebracht. Daraufhin wurden die Veneers mit der Befestigungshilfe und Ultraschallgel befestigt. Zuerst wurden die Fotos für die Messungen mit dem eLAB aufgenommen. Anschließend wurde die Positionierungshilfe für das Vita Easyshade (ES) aufgesetzt und die Messungen mit dem Spektralfotometer durchgeführt. Der Prüfkörper wurde mitsamt der Positionierungshilfe aus dem Modell entnommen und sämtliche groben Verschmutzungen wurden entfernt.

Anschließend wurden die Prüfkörper für 3 Minuten in einem Ultraschallbad gereinigt, wobei die Veneers mit den Befestigungshilfen in Isopropanol und die Zahnstümpfe mit den Positionierungshilfen in destilliertem Wasser eingelegt wurden. Nachdem sie getrocknet waren, wurden die Prüfkörper zurücksortiert.

Um der Verschmutzung des ES entgegenzuwirken, wurde die Messspitze nach jeder Messung mit einem lintfreien Tuch gesäubert. Nach jeweils 6 Prüfkörpern wurde der Kalibrierungsblock mit einem Dampfstrahler gereinigt und getrocknet.

Die Messungen mit den Try-In-Pasten wurden identisch vor- und nachbereitet.

Für den dritten Messdurchgang wurden die Veneers den Herstellerangaben entsprechend verklebt (siehe Abb. 14).

Dafür wurden die zuvor für 3 Minuten im Ultraschallbad gereinigten Veneers für 20 Sekunden mit 4,5 %-iger Flusssäure (IPS Ceramic Ätzgel, Ivoclar Vivadent GmbH) geätzt.

Anschließend wurde die Säure unter fließendem Wasser abgespült und die Veneers erneut für 3 Minuten im Ultraschallbad gereinigt. Danach wurden die Zahnstümpfe und die Veneers jeweils für 30 Sekunden mit 35 %-iger Phosphorsäure (K-ETCHANT Syringe, Kuraray Co., Ltd.) geätzt, mit Wasser abgespült und für 3 Minuten im Ultraschallbad gereinigt.

Nach dem Trocknen wurden die verschiedenen Prüfkörpergruppen den Herstellerangaben entsprechend mit den herstellereigenen Adhäsiven unter Verwendung der Befestigungshilfe verklebt (vgl. Abb. 14).

Dabei wurde auf den Veneers der Variolink Esthetic-Prüfkörpergruppen Monobond Plus appliziert, für 60 Sekunden ruhen gelassen und mit Druckluft getrocknet. Die Zahnstümpfe der Variolink Esthetic Prüfkörpergruppen wurden mit Adhese Universal für 20 Sekunden benetzt. Anschließend wurde der Haftvermittler verblasen und für 10 Sekunden lichtgehärtet.

Die Veneers der Panavia Veneer-Prüfkörpergruppen wurden mit Ceramic Primer Plus benetzt und mit Druckluft getrocknet. Auf den zugehörigen Zahnstümpfen wurde Tooth Primer appliziert und nach 20 Sekunden Einwirkzeit mit Druckluft getrocknet.

Die Veneers der G-CEM Veneer-Prüfkörpergruppen wurden mit G-Multi Primer silanisiert. Auf den Zahnstümpfen wurde G-Bond für 10 Sekunden aufgetragen, 5 Sekunden mit Druckluft verblasen und anschließend 10 Sekunden lichtgehärtet.

Bei dem Befestigen wurden die Überschüsse nach dem Anblitzen mit einem Skalpell entfernt und das Komposit endgehärtet.

Die Prüfkörper wurden im Anschluss ein drittes Mal mit beiden Messgeräten gemessen.

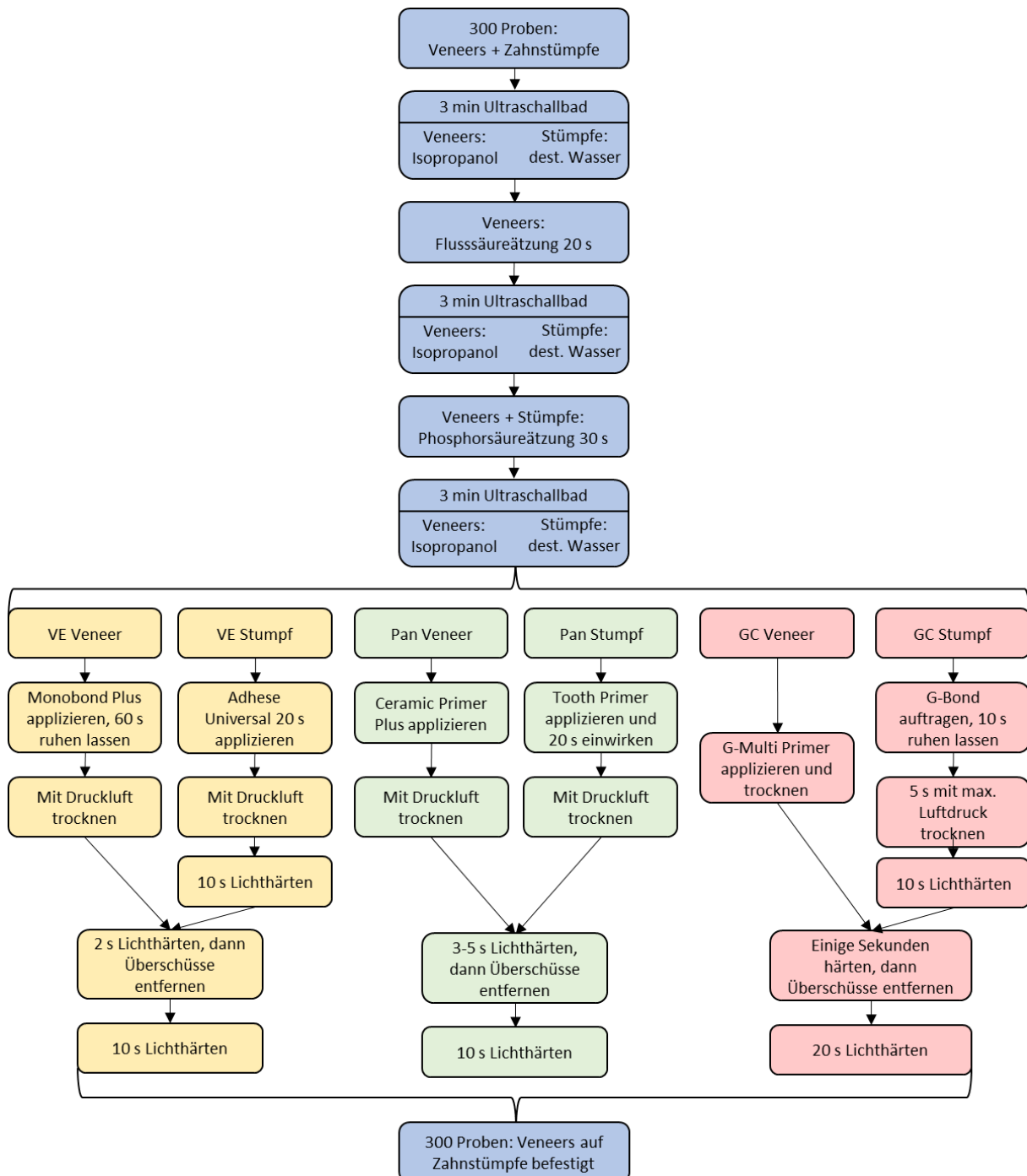


Abb. 14 Befestigungsprotokoll

3.4. Prüfkörpermessung

Jeder Prüfkörper wurde in einem Messdurchgang jeweils fünfmal mit dem eLAB-System und fünfmal mit dem Easyshade gemessen.

3.4.1. Prüfkörpermessung (Vita Easyshade V)

Die Messungen mit dem ES wurden im Modus „Grundfarbbestimmung“ durchgeführt. Dafür wurde das Gerät vor jeder Messung kalibriert. Anschließend wurde der Messkopf mithilfe der Positionierungsschiene an den Zahn adaptiert und die Farbmessung durchgeführt.

Die Farbkoordinaten (Lab-Werte) konnten am Gerät abgelesen werden und wurden dann in die Datenbank übertragen.

3.4.2. Versuchsaufbau (Vita Easyshade V)

Für die Messungen wurde eine Tiefziehfolie (Erkodur 0,6 mm, Erkodent Erich Kopp GmbH) hergestellt, um zu gewährleisten, dass die Messungen reproduzierbar an der gleichen Stelle am Zahn stattfanden.

Dafür wurde ein Kunststoffmodell (Palavit G, Kulzer GmbH) hergestellt. Auf diesem konnten mehrere gleiche Folien tiefgezogen werden, um der Verschmutzung und Abnutzung während der Versuche entgegenzuwirken (siehe Abb. 15).



Abb. 15 Positionierungshilfe für das Vita Easyshade V

3.4.3. Prüfkörpermessung (eLAB)

Als Kamera wurde eine Spiegelreflexkamera (EOS 6D Mark 2, Canon) mit einem Lateralblitz (Macro Twin Lite MT-24EX, Canon) und einem dazugehörigen 100 mm Macroobjektiv verwendet. Die Kameraeinstellungen wurden gemäß dem Fotoprotokoll des eLAB vorgenommen (1/125 s, F22, ISO 100-300). Der Blitz wurde ebenfalls wie vorgegeben manuell auf die maximale Blitzintensität eingestellt. Die Aufnahmen wurden über den Kreuzpolfilter (polar_eyes, eLAB) entspiegelt. In der eLAB_prime-Software erfolgte ein automatisierter Weißabgleich anhand der Grauwertkarte.

In der Software wurden anschließend die Lab-Farbwerte im mittleren Kronendrittel bestimmt (siehe Abb. 16).

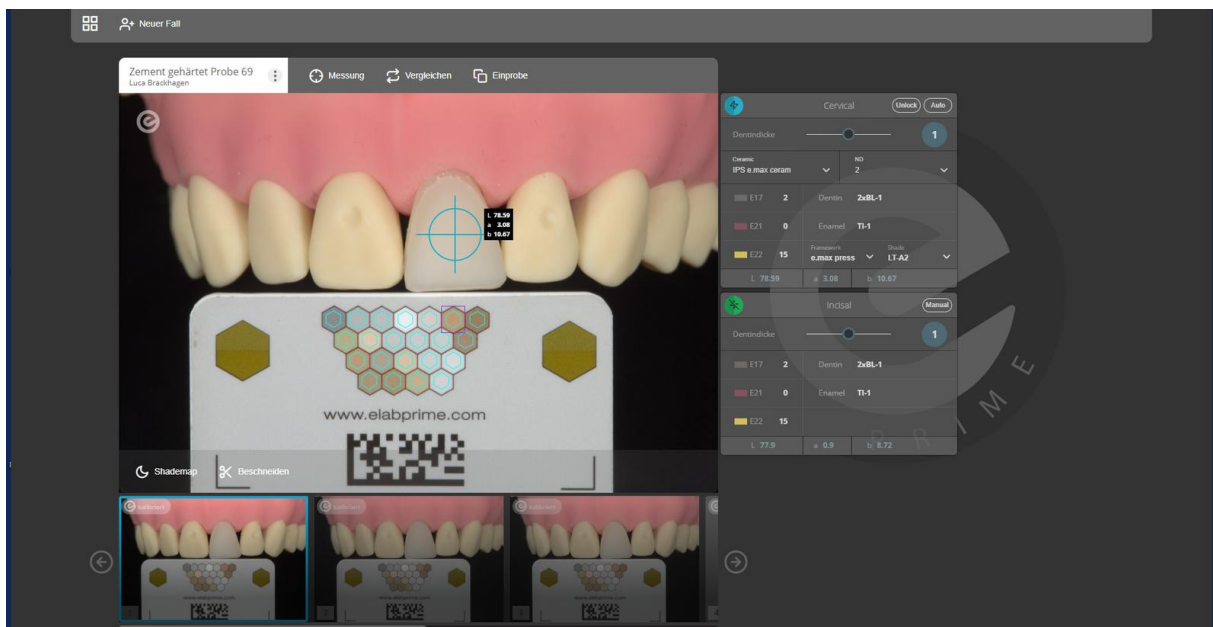


Abb. 16 Farbbestimmung in der eLAB-Software

3.4.4. Versuchsaufbau (eLAB)

Für die Erarbeitung des Versuchsaufbaus wurde der Einfluss von Hintergründen und der Umgebung auf die Messergebnisse getestet.

Als Umgebung ist ein Raum ohne direkten Lichteinfall gewählt worden. Bei der Auswahl des Hintergrunds zeigten die Messungen mit einem matten, schwarzen Stoff die Ergebnisse mit der geringsten Standardabweichung im Gegensatz zu Messungen mit weißem oder grauem Stoff, einer Phantommaske oder keinem speziellen Hintergrund. Somit wurde als Hintergrund der schwarze, matte Stoff ausgewählt.

Weiterhin konnten hohe Abweichungen der Ergebnisse abhängig von der Positionierung der Grauwertkarte und der Kamera festgestellt werden.

Dieses Problem wurde durch eine Halterung der Grauwertkarte und das Verschrauben der Kamera auf einer Schiene mit einer festgelegten Aufnahmeposition eliminiert (siehe Abb. 17).



Abb. 17 Versuchsaufbau eLAB

3.5. Nachuntersuchung: Einfluss des Glanzbrandes auf die Farbmessung

Die Veneers wurden mit einem Glanzbrand, der im Sprühverfahren aufgetragen wurde, fertiggestellt. Ein Glanzbrand wird als Glasurmasse, bei der es sich meist um ein Glas handelt, aufgetragen und anschließend im Keramikbrennofen gebrannt. Ziel ist es, die Oberfläche der Keramik zu versiegeln und so das Frakturrisiko, die Plaqueanhaftung und die Abrasion der Antagonisten zu reduzieren.⁴¹ Dabei sind je nach Sprühabstand, Sprühdauer und Füllung der Sprühflasche variierende Dicken des Glanzbrandes zu erwarten gewesen.

Um festzustellen, ob die unterschiedlichen Schichtstärken einen Einfluss auf die Ergebnisse der Messgeräte hatten, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Nachuntersuchung durchgeführt.

In der Nachuntersuchung wurden die beiden Messgeräte auf Empfindlichkeit gegenüber einer gläsernen Schicht mit unterschiedlicher Dicke getestet.

Hierfür wurden jeweils drei Plättchen aus den Befestigungskompositen VE light+ und VE warm+ (0,7 mm ± 0,05 mm) hergestellt. Diese wurden mit beiden Messgeräten fünfmal gemessen. Anschließend wurde ein Deckgläschen (24 x 50 mm, Borsilikat, 0,159 ± 0,025 mm, Bresser GmbH) aufgelegt und die Messungen wiederholt. Dies wurde mit 2 und 3 Deckgläschen ebenfalls durchgeführt, wobei zwischen den Deckgläschen ein Tropfen destilliertes Wasser eingebracht wurde, um die Lichtbrechung beim Phasenübergang des Lichts zu reduzieren.^{15,53}

Anschließend wurden die Lab-Werte auf Veränderungen in Abhängigkeit von der Glasschichtstärke gemessen und die Messgeräte miteinander verglichen.

3.6. Datenverarbeitung und statistische Auswertung

3.6.1. ΔE_{00} -Berechnung

Die ermittelten Lab-Werte wurden in eine Access-Datenbank (2016) eingepflegt. Dort wurde der Median der fünf wiederholten Messungen bestimmt.

Die so ausgewählten Messungen wurden in eine Excel-Tabelle (2016) exportiert. Dort wurde das ΔE_{00} zwischen den verschiedenen Prüfkörpern mit der CIEDE2000-Farbabstandsformel berechnet. Dabei wurden zum einen die Try-In-Pasten und die Befestigungskomposite mit den Referenzwerten aus der Kontrollmessung und zum anderen wurden die Befestigungsmaterialien direkt miteinander verglichen.

3.6.2. Statistik

Die Statistik erfolgte im IBM SPSS Statistics 28.0 (International Business Machines Corporation). Zunächst wurde positiv auf Normalverteilung geprüft (Kolmogorov-Smirnov-Test). Anschließend wurden für die Beantwortung der Fragestellungen folgende Nullhypothesen getestet.

5. *Das verwendete Befestigungsmaterial hat keinen signifikanten Einfluss auf die Farbe der Veneers.*
(Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben)
6. *Die mit Try-In-Paste bestimmte Farbe eines Veneers entspricht der Farbe nach adhäsiver Befestigung.*
(Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben)
7. *Die Schichtstärke des Befestigungsmaterials beeinflusst nicht den Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit.*
(Mann-Whitney-U-Test bei unabhängigen Stichproben)
8. *Die Stumpffarbe hat keinen Einfluss auf den Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit.*
(Kruskal-Wallis-Test bei unabhängigen Stichproben)
9. *Die Schichtstärke des Glanzbrandes hat keinen Einfluss auf die gemessenen Farbwerte.*
(Univariate Varianzanalyse mit Post-Hoc-Test nach Bonferroni)

4. Ergebnisse

Die Ergebnisse der beiden Farbmessgeräte werden getrennt voneinander dargestellt.

In den Grafiken sind die Bereiche, in denen ein geringer Farbabstand (grün, $\Delta E_{00} < 0,8$), ein akzeptabler Farbabstand (gelb, $0,8 < \Delta E_{00} < 1,8$) und ein nicht akzeptabler Farbabstand (rot, $\Delta E_{00} > 1,8$) vorliegt, farblich hinterlegt. Die vollständigen Signifikanztabellen sind im Anhang zu finden.

4.1. Farbeinfluss der Befestigungsmaterialien

Die Abbildungen 18 und 19 zeigen die Farbabstände der mit Try-In-Pasten und Kompositen befestigten Veneers im Vergleich zu den Kontrollmessungen. Die Ergebnisse sind gruppiert nach unterschiedlichen Spaltbreiten und Stumpffarben dargestellt.

Mit dem eLAB konnte ein mittleres $\Delta E_{00, \text{Try-In}}$ von 1,60 ($\pm 1,02$) bei den Try-In-Pasten und ein mittleres $\Delta E_{00, \text{Komposit}}$ der Komposite von 2,25 ($\pm 1,54$) gemessen werden.

Die verschiedenen Produktreihen unterschieden sich signifikant ($p < 0,001$). Dabei fiel der Farbeinfluss des VE light+ und VE warm+ besonders groß aus.

Bis auf die Produktreihe Pan uni zeigte sich der Farbeinfluss der Komposite stärker als der der zugehörigen Try-In-Pasten (siehe Abb. 18, Tabelle 2 im Anhang).

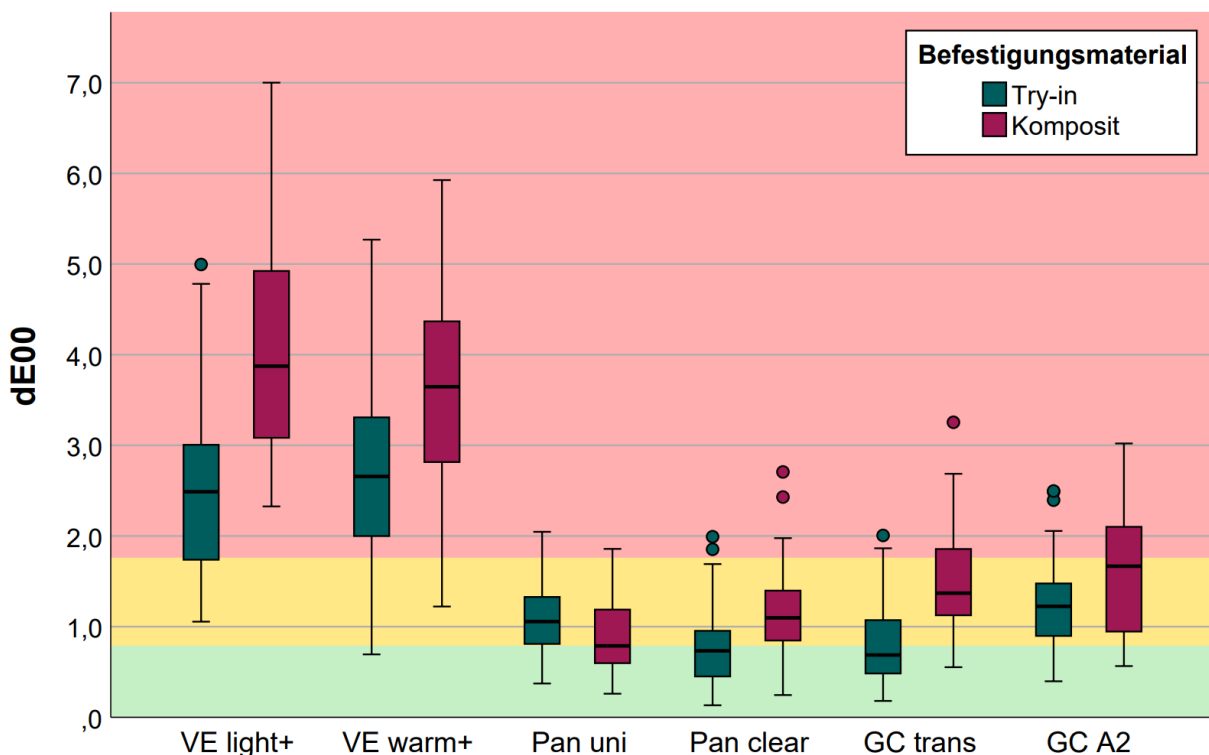


Abb. 18 eLAB – Farbveränderung durch das Einsetzen mit Befestigungsmaterialien

Mit dem ES konnte ein mittleres $\Delta E_{00, \text{Try-In}}$ von $1,66 (\pm 1,23)$ und ein mittleres $\Delta E_{00, \text{Komposit}}$ von $2,43 (\pm 1,94)$ gemessen werden. Die verschiedenen Produktreihen unterschieden sich ebenfalls signifikant ($p < 0,001$). In den Messungen mit dem ES war der Farbeinfluss des VE warm+ mit einem mittleren $\Delta E_{00, \text{Try-In}} = 3,46 (\pm 1,09)$ und $\Delta E_{00, \text{Komposit}} = 5,76 (\pm 1,35)$ besonders groß (siehe Abb. 19, Tabelle 3 im Anhang).

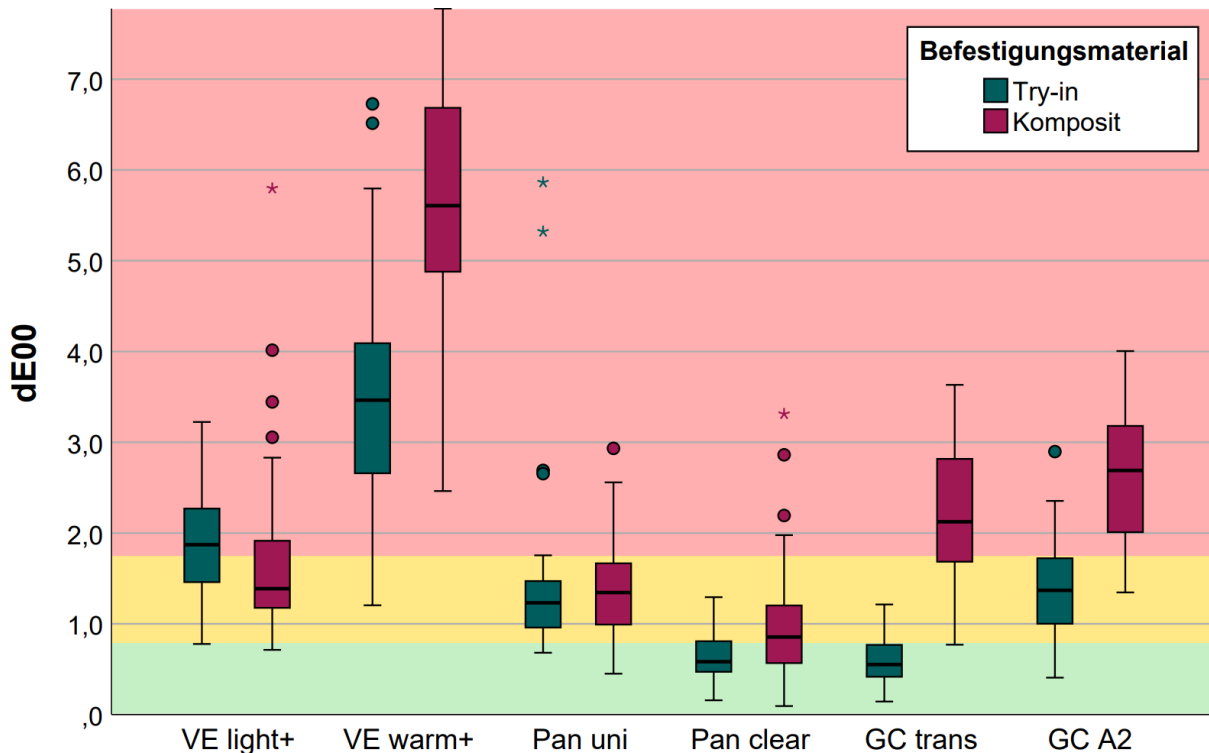


Abb. 19 Easyshade – Farbveränderung durch das Einsetzen mit Befestigungsmaterialien

Bei 20,08 % der Messungen war ein nicht wahrnehmbarer Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Komposit festzustellen. 39,75 % der Prüfkörperpaare zeigten einen wahrnehmbaren Farbabstand und bei 40,17 % kam es zu einer Farbveränderung über die Akzeptanzgrenze hinaus.

4.2. Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit

Abbildung 20 zeigt den Farbabstand der verschiedenen Try-In-Pasten zu den korrespondierenden Kompositen. Dabei sind die beiden Messgeräte nebeneinander abgebildet und die Gruppen mit unterschiedlichen Spaltbreiten und Stumpffarben zusammengefasst dargestellt. Die Ergebnisse der beiden Messgeräte unterschieden sich signifikant voneinander ($p < 0,001$).

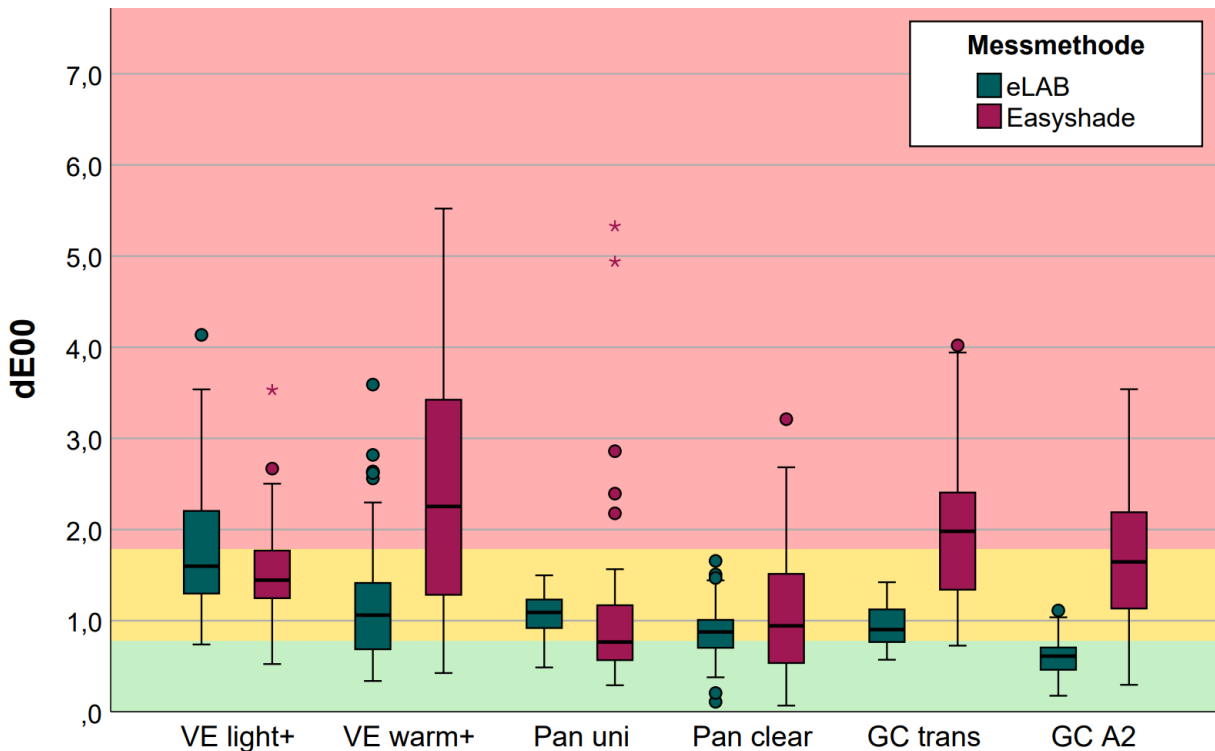


Abb. 20 eLAB & Easyshade – Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit

Die Farbmessungen mit dem eLAB ergaben einen mittleren Farbabstand zwischen den mit Try-In-Pasten einprobierten und adhäsiv befestigten Veneers von $\Delta E_{00} = 1,14 (\pm 0,61)$.

Besonders der größere Farbabstand bei der Verwendung von VE light+ und der geringere Farbabstand bei GC A2 unterschied sich in einem paarweisen Vergleich signifikant von den anderen Produktreihen (vgl. Abb. 21, Tabelle 4 im Anhang).

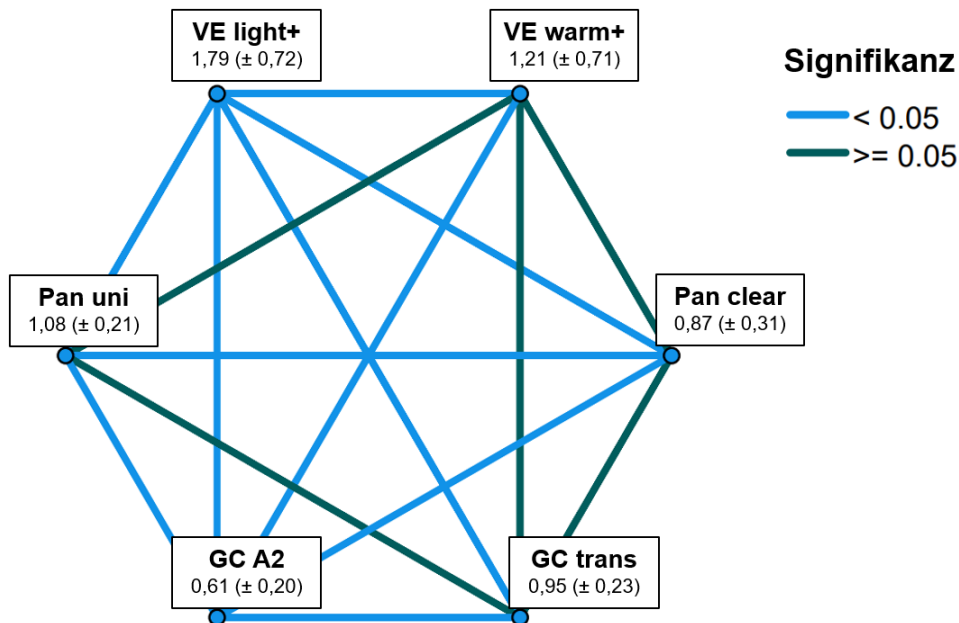


Abb. 21 eLAB – Paarweiser Vergleich der Farbdiskrepanzen zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit der jeweiligen Produktreihen

Die Messergebnisse mit dem ES ergaben ein mittleres $\Delta E_{00} = 1,59 (\pm 1,04)$.

Bei diesem Messgerät hoben sich die Messergebnisse von der Produktreihe VE warm+ durch einen besonders hohen Farbabstand und die Produktreihen von Pan uni und Pan clear mit einem niedrigeren Farbabstand signifikant ab (vgl. Abb. 22, Tabelle 4 im Anhang).

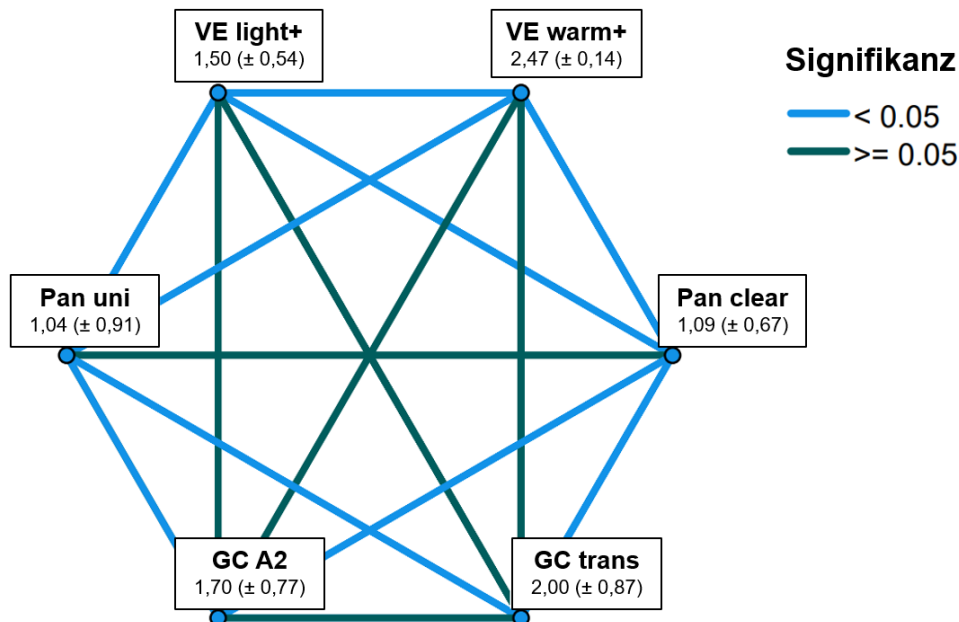


Abb. 22 Easyshade – Paarweiser Vergleich der Farbdiskrepanzen zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit der jeweiligen Produktreihen

4.3. Einfluss der Spaltbreite

Die Abbildungen 23 und 24 stellen den Farbabweichungsindex zwischen den mit Try-In-Paste und mit Befestigungskomposit befestigten Veneers in Abhängigkeit von den Spaltbreiten dar.

Dieser wird bei beiden Messgeräten nicht signifikant durch die voreingestellte Spaltbreite beeinflusst ($p_{\text{eLAB}} = 0,979$; $p_{\text{ES}} = 0,323$).

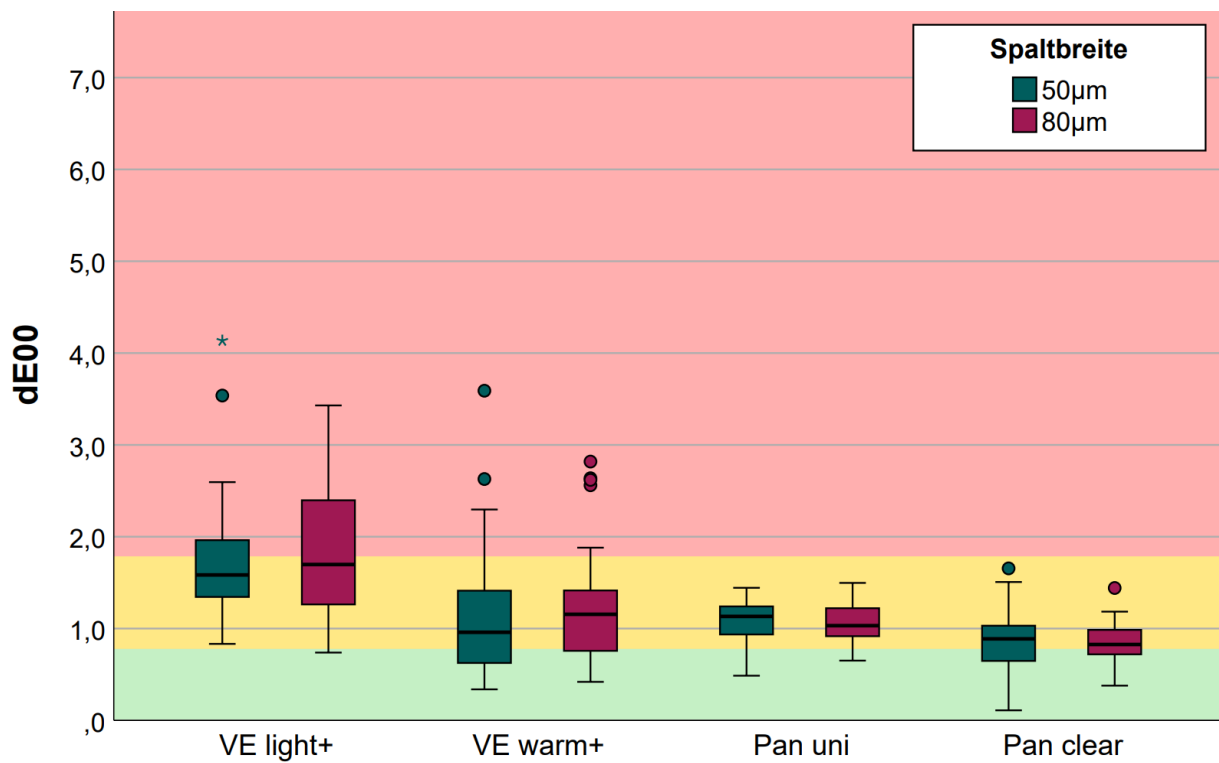


Abb. 23 eLAB – Einfluss der Spaltbreite auf die Farbdiskrepanz zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit

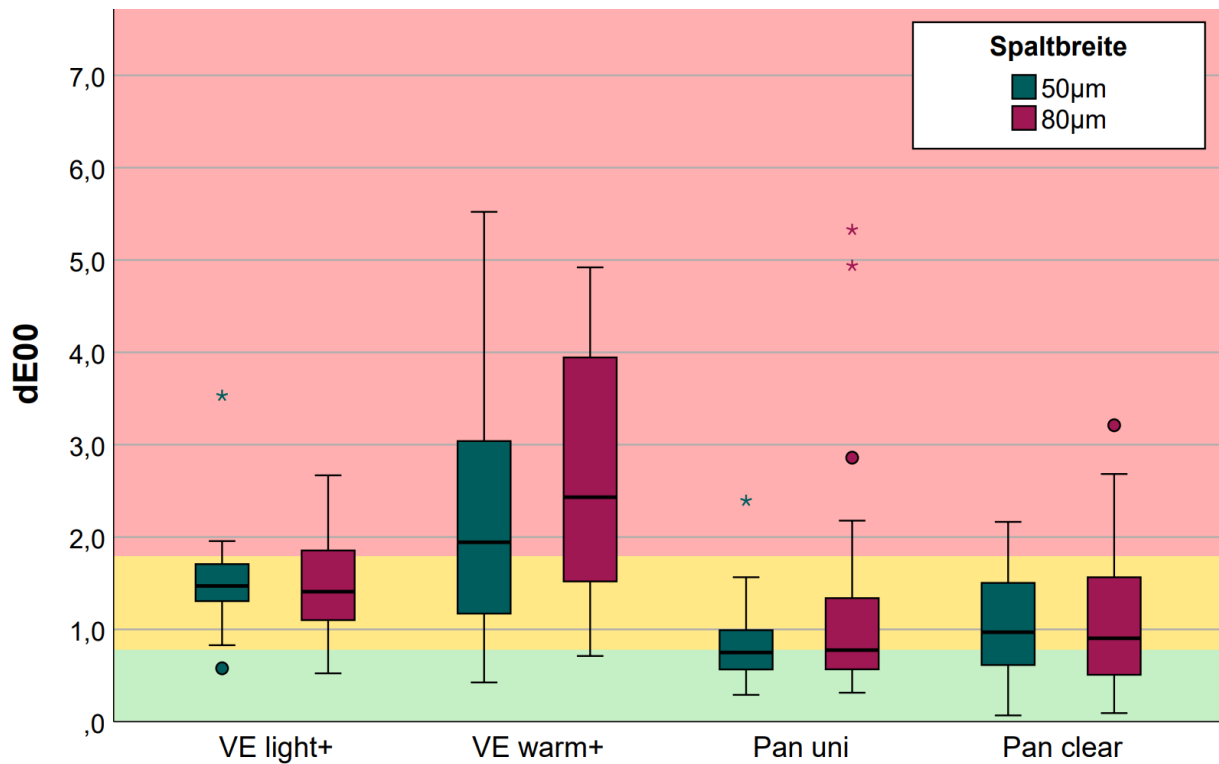


Abb. 24 Easyshade – Einfluss der Spaltbreite auf die Farbdiskrepanz zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit

Auch die Auswertung der gemessenen Lab-Farbwerte im Vergleich zu den Referenzmessungen ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den verschiedenen eingestellten Spaltbreiten ($p_L = 0,103$; $p_a = 0,102$; $p_b = 0,159$).

4.4. Einfluss der Farbe des Zahnstumpfs

Bei der Betrachtung der mit den Befestigungsmaterialien getesteten Prüfkörper im Vergleich zur Kontrollmessung zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Stumpffarbe auf die L-, a- und b-Werte ($p < 0,001$) (siehe Abb. 25, Abb. 26 & Abb. 27). Für die Übersichtlichkeit werden hier nur die Messungen mit dem eLab-System dargestellt (für ES-Messungen siehe Abb. 36, Abb. 37 & Abb. 38 im Anhang).

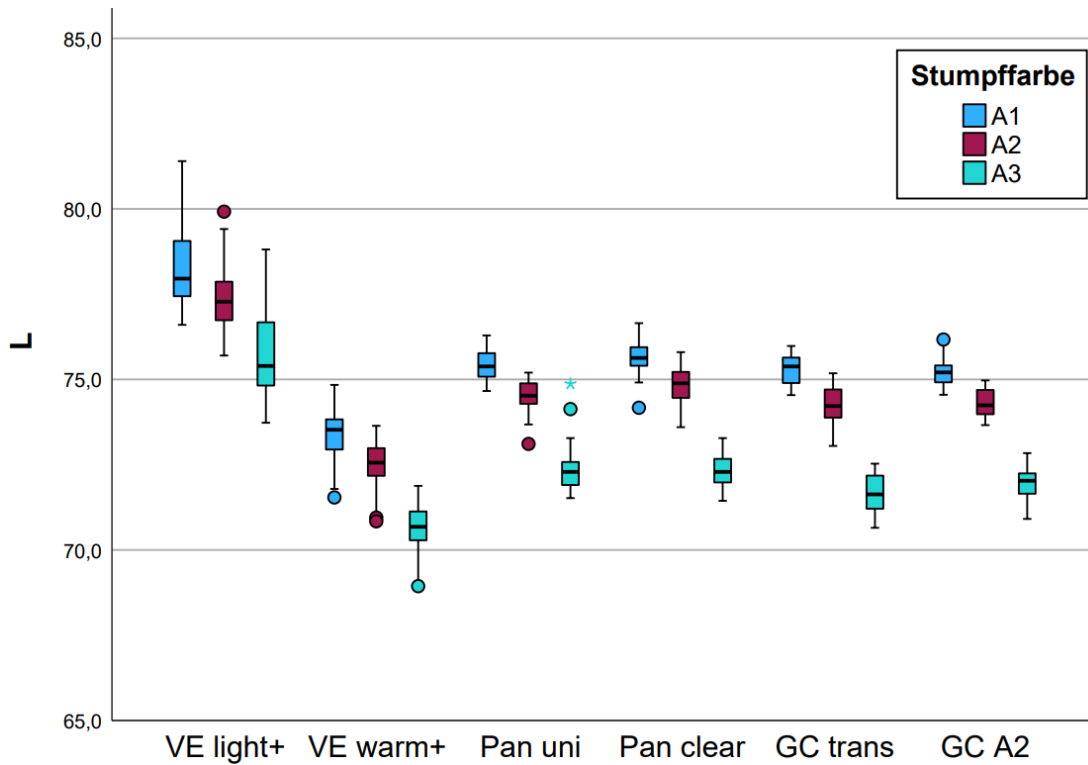


Abb. 25 eLAB – L-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung

Der L-Wert sank mit zunehmender Dunkelheit der Zahnfarbe, was bedeutet, dass der Farbwert der Veneers ebenfalls dunkler wurde (vgl. Abb. 25).

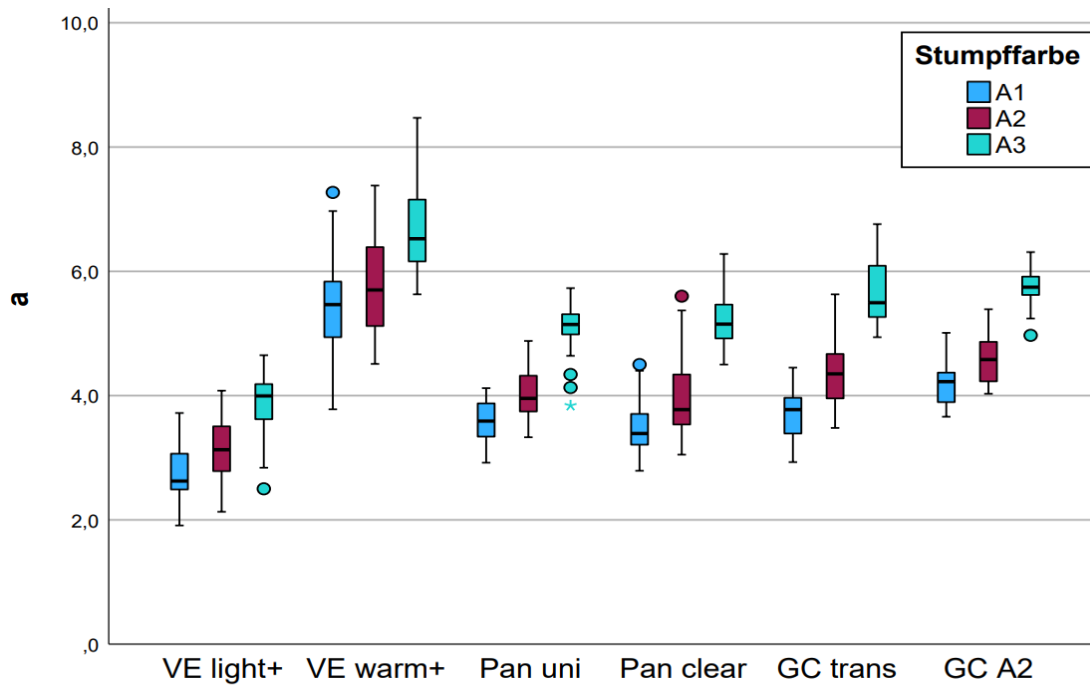


Abb. 26 eLAB – a-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung

Je dunkler die Zahnfarbe war, desto größer war der gemessene Rotanteil bzw. der a-Wert (vgl. Abb. 26).

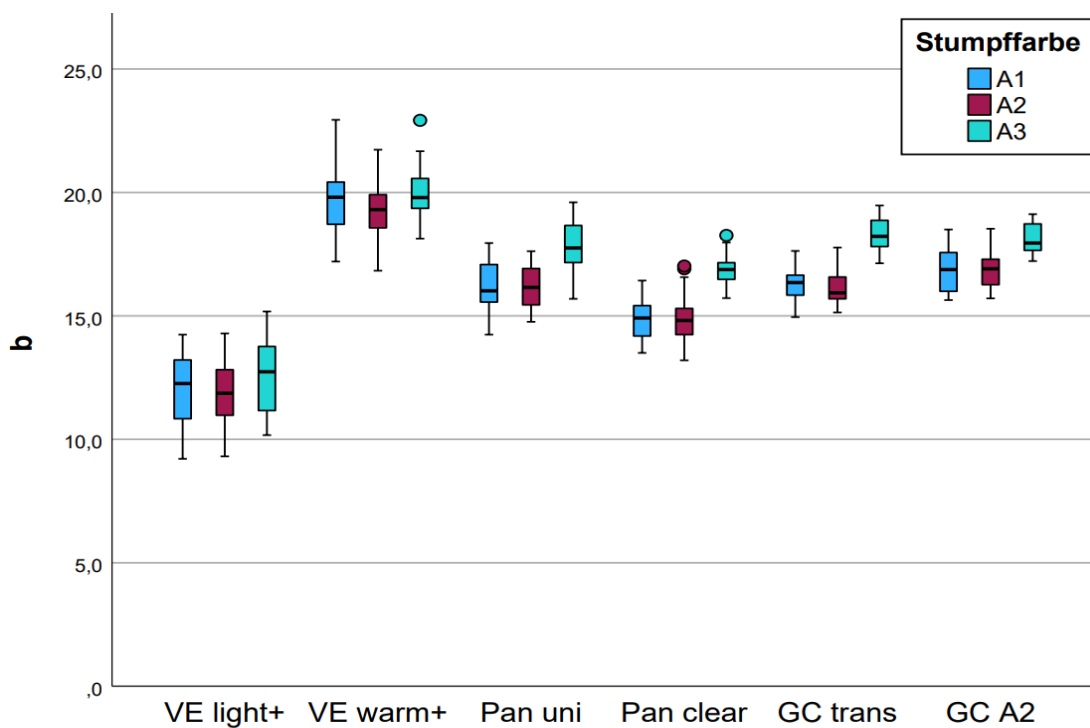


Abb. 27 eLAB – b-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung

Der b-Wert stieg bei der Zahnfarbe A3 im Vergleich zu den Zahnfarben A1 und A2 an. Dies war gleichbedeutend mit einem erhöhten Gelbanteil (vgl. Abb. 27).

Die Abbildungen 28 und 29 stellen den Farbabweichungsindex zwischen den mit Try-In-Paste einprobierten und den mit Befestigungskomposit verklebten Veneers in Abhängigkeit von der Stumpffarbe dar.

Dieser wird bei beiden Messgeräten nicht signifikant durch die drei verschiedenen Stumpffarben beeinflusst ($p_{\text{eLAB}} = 0,892$; $p_{\text{ES}} = 0,305$).

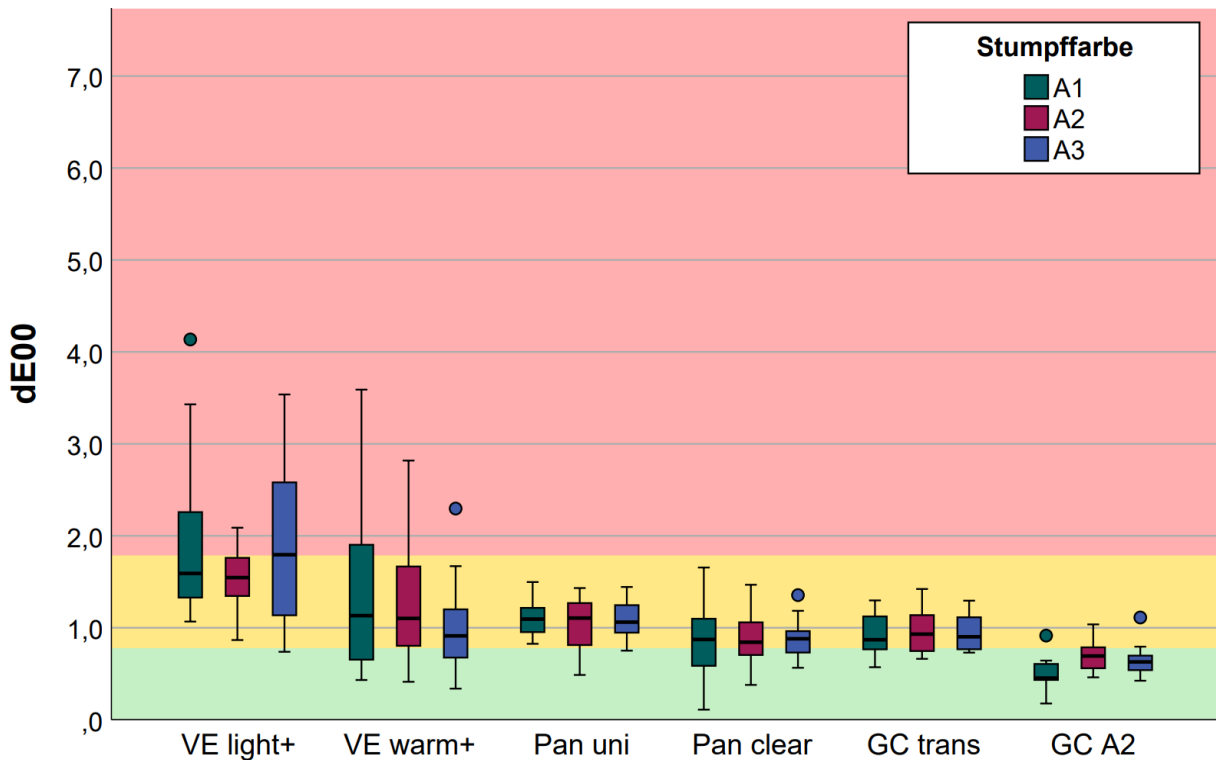


Abb. 28 eLAB – Einfluss der Stumpffarbe auf die Farbdiskrepanz zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit

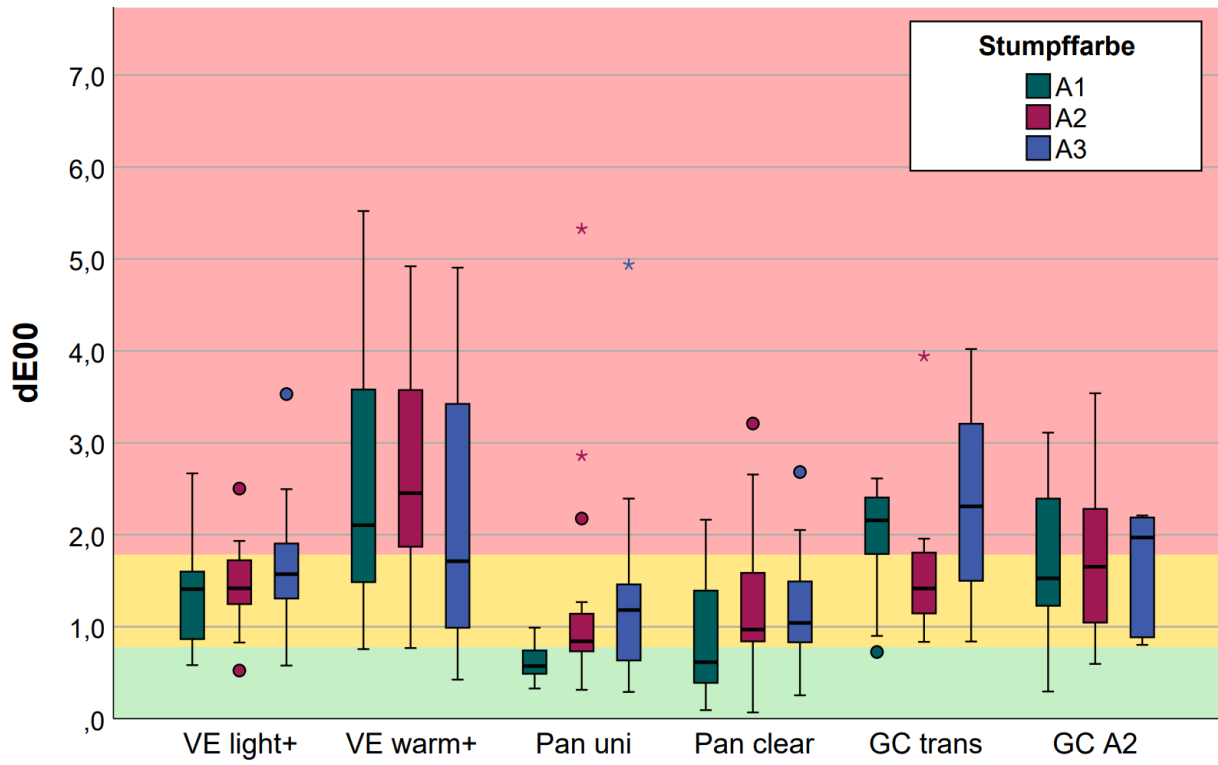


Abb. 29 Easyshade – Einfluss der Stumpffarbe auf die Farbdiskrepanz zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit

4.5. Einfluss der Dicke des Glanzbrandes auf die Farbwerte

Die Abbildungen 30 bis 35 vergleichen die gemessenen Farbwerte der beiden Messmethoden in den Messreihen mit den Produktreihen VE light+ und VE warm+.

In dem Versuch mit den Deckgläschen zeigt sich bei dem eLAB eine konstante Abnahme des L-Werts mit Zunahme der Glasdicke. Das entspricht einem Abdunkeln des gemessenen Farbwerts. Bei der Messung mit dem ES verhält es sich bei VE warm+ ebenfalls proportional zur Anzahl der Deckgläschen. Jedoch ist bei VE light+ eine sprunghaft hellere Messung bei einem Deckgläschen im Vergleich zu der Messreihe sichtbar (vgl. Abb. 30 & Abb. 31).

Diese Abweichung mit dem ES ist bei den gemessenen a-Werten mit beiden Kompositen erkennbar, wobei sie sich bei VE light+ deutlicher darstellt. Die Abweichung entspricht einer Abschwächung des Rotanteils (vgl. Abb. 32 & Abb. 33).

Auch der b-Wert weicht bei den Messungen mit dem ES im Bereich von einem Deckgläschen deutlich ab, wohingegen die Messungen mit dem eLAB nahezu konstante b-Werte zeigen (vgl. Abb. 34 & Abb. 35).

Die vollständigen Signifikanztabellen befinden sich im Anhang (Tabelle 5 & Tabelle 6).

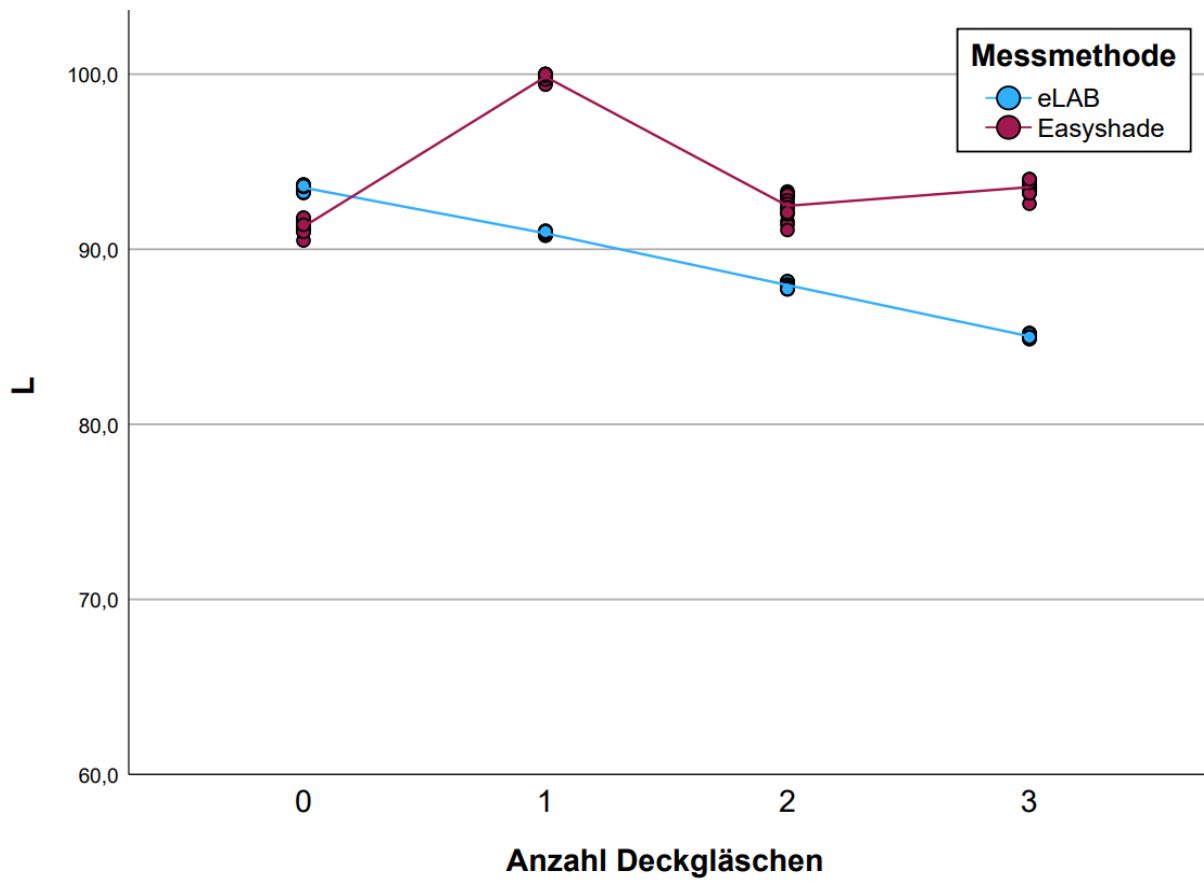


Abb. 30 VE light+ – Einfluss von Deckgläschen auf den L-Wert

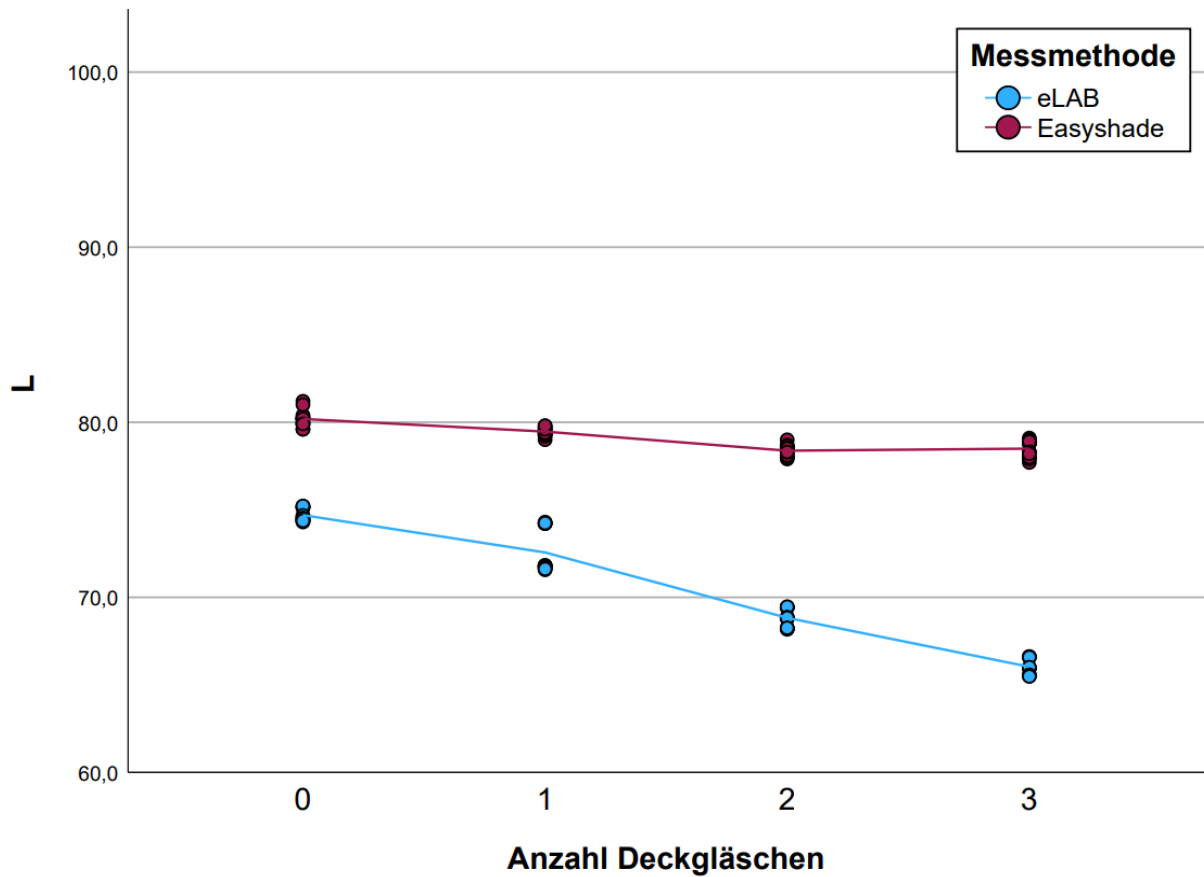


Abb. 31 VE warm+ – Einfluss von Deckgläschen auf den L-Wert

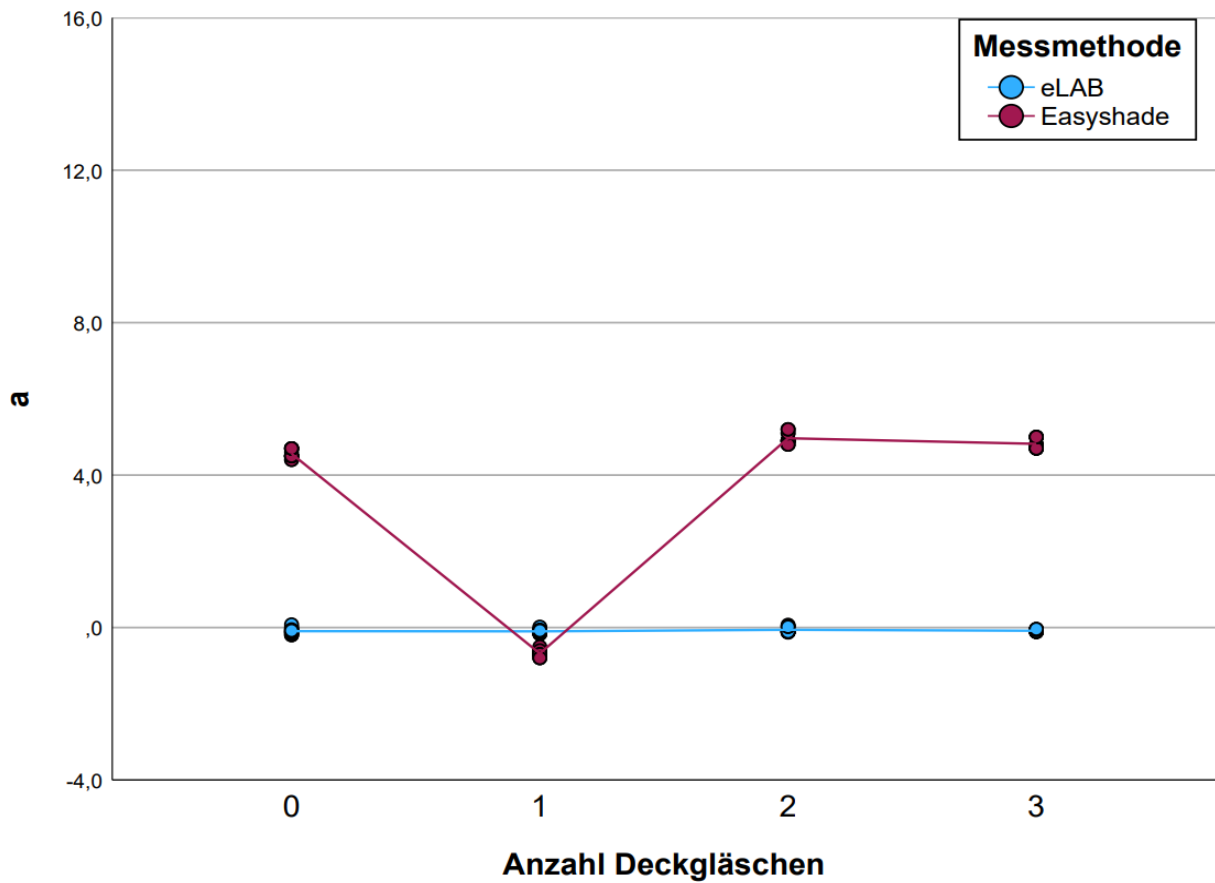


Abb. 32 VE light+ – Einfluss von Deckgläsern auf den a-Wert

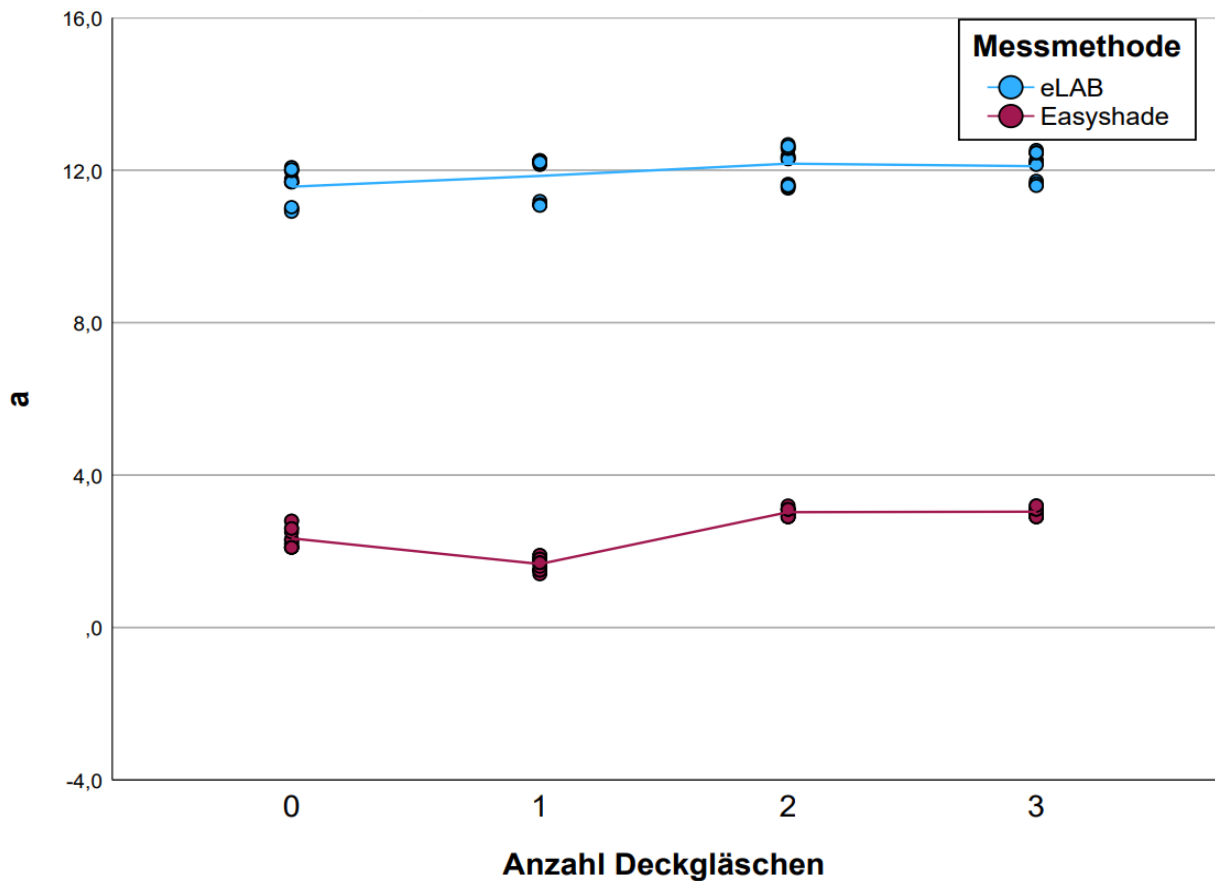


Abb. 33 VE warm+ – Einfluss von Deckgläsern auf den a-Wert

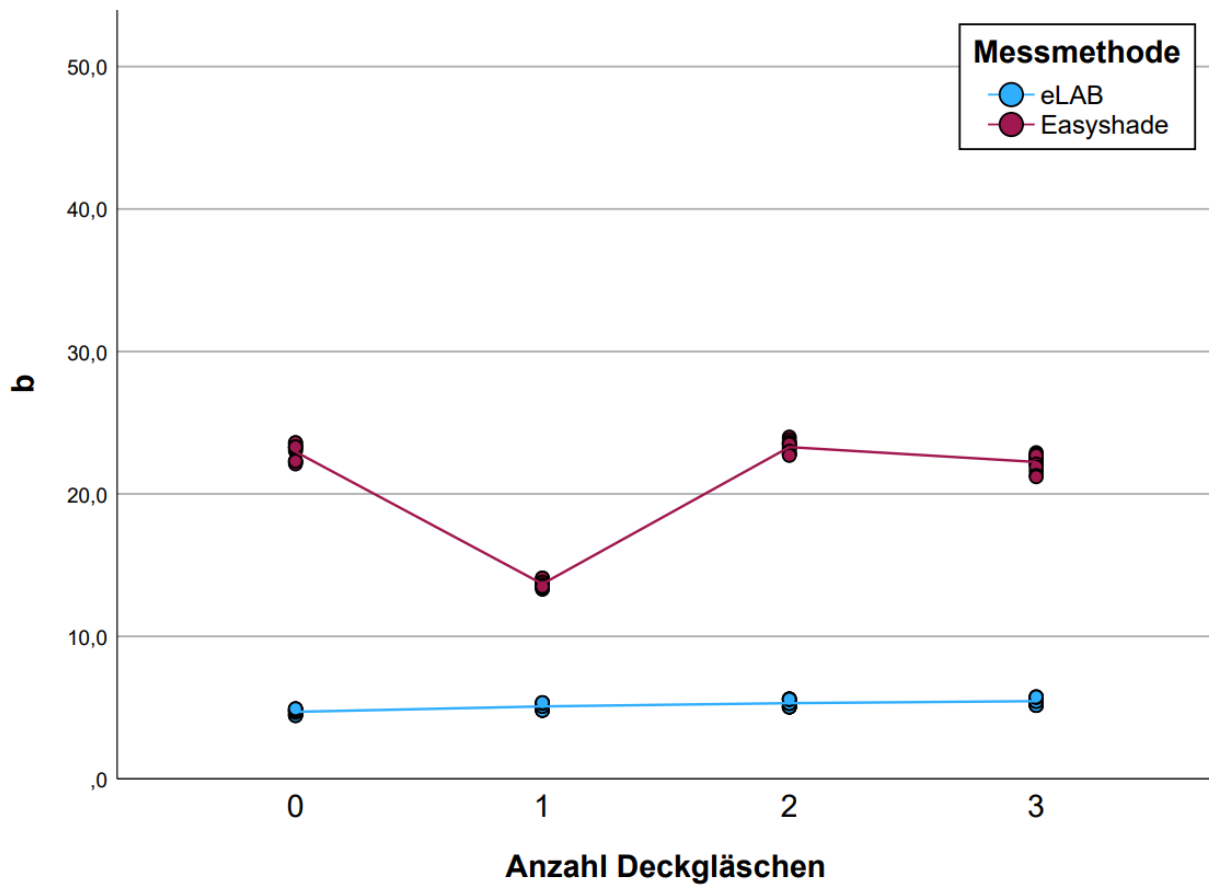


Abb. 34 VE light+ – Einfluss von Deckgläsern auf den b-Wert

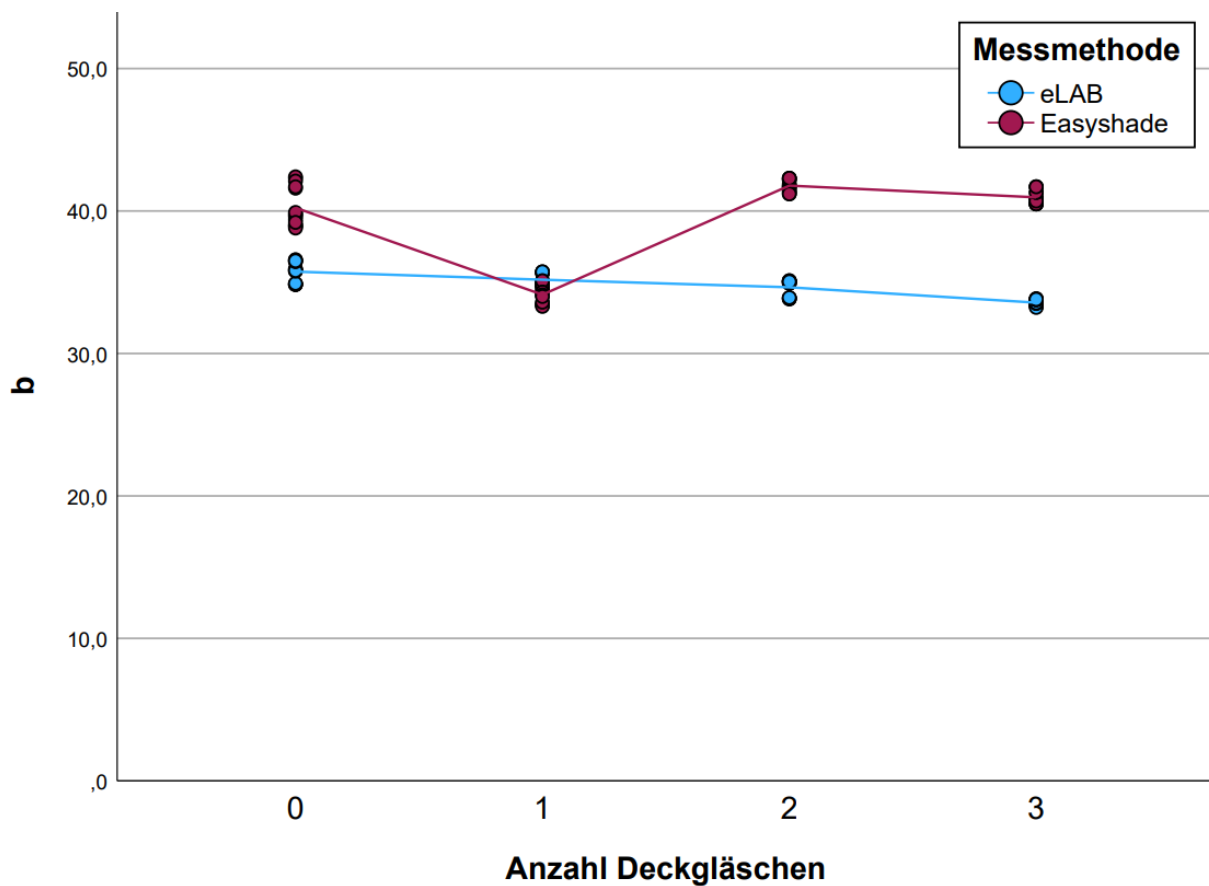


Abb. 35 VE warm+ – Einfluss von Deckgläsern auf den b-Wert

5. Diskussion

Ziel der Untersuchung war es herauszufinden, ob ein Einfluss auf die Farbe von vollkeramischen Restaurationen ausgehend von den Befestigungsmaterialien besteht. Dabei sollte überprüft werden, ob ein Farbabstand zwischen den mit Try-In-Pasten einprobierten und anschließend adhäsiv befestigten keramischen Restaurationen besteht.

In diversen In-vitro-Untersuchungen mit Keramikplättchen konnte ein von der Transluzenz und Dicke der Keramik abhängiger Farbeinfluss des Befestigungsmaterials nachgewiesen werden. Dieser wies zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Try-In-Pasten und Kompositen auf.⁴³⁻⁴⁶

Die optischen Eigenschaften eines Objekts hängen neben der Farbe auch von Faktoren wie der Oberflächenbeschaffenheit und der Form ab. Es ist daher anzunehmen, dass der Farbeindruck von Restaurationen sich von dem der in Untersuchungen häufig verwendeten flachen Plättchen unterscheidet, die teils ohne die für die klinische Anwendung erforderliche Oberflächenbearbeitung getestet wurden.⁴

5.1. Methodik

5.1.1. Zahnstümpfe

Die 3D-gedruckten Zahnstümpfe in den verschiedenen Zahnfarben stellen einen möglichst reproduzierbaren Hintergrund in Zahnform dar. Mit echten Zähnen hätte jedes Veneer eigens konstruiert werden müssen, sodass Unterschiede in der Passung und der Schichtstärke zu erwarten gewesen wären. Dennoch entsprechen die verwendeten Zahnstümpfe keinen echten Zähnen, was bei der Einordnung der Ergebnisse berücksichtigt werden sollte.

5.1.2. Veneers

Eine mögliche Farbdiskrepanz ist besonders bei der Anprobe von vollkeramischen Restaurationen im ästhetischen Bereich relevant. Bei dünnwandigen, oftmals hoch transluzenten Veneers würde ein Farbabstand zwischen Try-In und Komposit einen größeren Einfluss haben als bei dickwandigen oder weniger transluzenten Restaurationsmaterialien.⁵⁴

Verwendet wurde die Lithiumdisilikatkeramik IPS e.max CAD HT A2 in einer Keramikschiebstärke von 0,4 mm. Die Testung unterschiedlicher Materialschiebstärken ist Teil einer Folgeuntersuchung und war nicht Bestandteil dieser Untersuchung. Die Ergebnisse können deshalb

vorerst nur auf keramische Restaurationen mit einer ähnlichen Schichtstärke und Transluzenz übertragen werden.⁵⁵

Die Passung der Veneers auf den Zahnstümpfen, die Qualität des Glanzbrandes und die Schichtstärke der Veneers wurden mehrfach bei verschiedenen Herstellungsschritten kontrolliert. Für Letzteres wurde an neun Messstellen mit einem Tastzirkel gemessen und auf eine maximale Abweichung von 0,05 mm geprüft.

Der Glanzbrand wurde im Sprühverfahren aufgetragen, was eine einfache, praxistaugliche Möglichkeit für die Oberflächennachbearbeitung darstellt.⁵⁶ Dieser weist in Abhängigkeit von der Fülle der Sprühkartusche unterschiedliche Schichtstärken auf.

Die Passung der Veneers wurde optisch kontrolliert und die Spaltbreite an mehreren verklebten Prüfkörpern exemplarisch getestet.

Dabei führte die Welligkeit der Oberfläche ($\pm 15 \mu\text{m}$) des gedruckten Zahnstumpfes zu einer Erhöhung der Spaltbreite von den eingestellten 50 und 80 μm auf circa 70 und 100 μm . Die Welligkeit wurde mit der Oberfläche eines mit einem Rotring-Diamanten beschliffenen Echtzahns verglichen, der eine Welligkeit von $\pm 7 \mu\text{m}$ besaß. Dieser wies eine nur wenig geringere Welligkeit auf, sodass eine ähnliche Erhöhung der Spaltbreite am Patienten zu erwarten wäre.

5.1.3. Messmethoden

Im Vergleich der Messergebnisse fiel eine höhere Reproduzierbarkeit bei den Messungen mit dem eLAB-System auf. Das ES wies eine größere Streubreite zwischen Prüfkörpern innerhalb einer Gruppe auf.

Diese Abweichungen zeigten sich in Nachmessungen reproduzierbar in einem Ausmaß, das weit über die klinische Akzeptanz hinausging. Anders als die mit dem ES ermittelten Farbabstände vermuten ließen, waren diese visuell nicht wahrnehmbar.

In einer Nachuntersuchung sollte der Einfluss des Glanzbrandes auf die beiden Messsysteme untersucht werden. Zur Simulation des Glanzbrandes wurden Deckgläschen in variierender Anzahl übereinandergelegt und als gläsernes Medium vor den Kompositprüfkörpern positioniert.

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass das eLAB nur bei dem L-Wert proportional auf die Anzahl der Deckgläschen reagierte. Alle drei Werte verhielten sich dabei nahezu konstant.

Das ES zeigte ein nichtproportionales Verhalten. So wichen die Ergebnisse der Messungen mit einem Deckgläschen deutlich von den Versuchsreihen ab.

Speziell die L- und b-Werte zeigten sich bei den stark streuenden Prüfkörpern der Untersuchung und bei der Nachuntersuchung als sehr variabel.

Die beiden Messgeräte nutzen verschiedene Techniken zur Farbbestimmung bei einem unterschiedlichen Objekt-Empfänger-Abstand. Auch die unterschiedlichen Farbspektren von den Lichtquellen der Messgeräte sind eine mögliche Ursache für die voneinander abweichenden Messergebnisse.⁵⁵ Della Bona et al. kritisieren an der instrumentellen Farbbestimmung, dass die Ergebnisse zwar zunehmend reproduzierbarer und zuverlässiger werden, aber aufgrund der Messtechnik von der visuell wahrgenommenen Farbe abweichen können.⁵⁷

Die Ergebnisse der Nachuntersuchung werfen Fragen hinsichtlich der Verlässlichkeit des ES für die Analyse von Prüfkörpern mit Glanzbrand auf. Weitere Untersuchungen und Studien erscheinen daher sinnvoll, um mögliche Einschränkungen des Messsystems zu ermitteln.

Das eLAB wies in den Vorversuchen ohne den verwendeten Versuchsaufbau eine deutliche Streuung auf, die die Farbbestimmung in der klinischen Anwendung erschweren könnte.

5.2. Einordnung der Ergebnisse

5.2.1. Farbeinfluss der Befestigungsmaterialien

Paken et al. verwendeten 44 Keramikplättchen mit einer Schichtstärke von 0,8 mm und einer Spaltbreite von 100 μm . Dabei wurden mittels ES unter anderem Pan uni und Pan clear gemessen. Das mittlere $\Delta E_{00, \text{Try-In}}$ (Pan uni) lag bei 1,19 ($\pm 0,84$) und $\Delta E_{00, \text{Try-In}}$ (Pan clear) bei 1,37 ($\pm 0,86$). Der mittlere Farbeinfluss der Befestigungskomposite betrug $\Delta E_{00, \text{Komposit}}$ (Pan uni) = 2,44 ($\pm 1,01$) und $\Delta E_{00, \text{Komposit}}$ (Pan clear) = 3,80 ($\pm 0,75$).⁴³

In der Untersuchung von Vaz et al. wurden 140 Keramikplättchen mit einer Schichtstärke von 0,35 mm auf bovinen Zähnen untersucht. Dabei wurde ein wesentlich größerer mittlerer Farb-
abstand $\Delta E_{00, \text{Try-In}}$ von 21,06 und $\Delta E_{00, \text{Komposit}}$ von 20,54 gemessen.⁵⁸

Die Messergebnisse der vorliegenden Untersuchung sowie anderer Publikationen bewegen sich zwischen diesen Extremwerten.

Die großen Unterschiede, die bei Vaz et al. das Vielfache der Grenze für die klinische Akzeptanz überschreiten, verdeutlichen den erheblichen Einfluss der Art, Transluzenz und Stärke der Keramik sowie der Eigenschaften des Befestigungsmaterials und des Hintergrunds.^{59,60} Neben den Prüfkörpern spielen aber auch die Messgeräte und deren Anwendung eine entscheidende Rolle.

Das macht die Untersuchungen, die sich mit diesem Thema befassen, schwer vergleichbar.⁶¹ Außerdem werden in vielen aktuellen Untersuchungen nur wenige Prüfkörper mit einer kleinen Anzahl verschiedener Produktreihen miteinander verglichen, was den Vergleich der Produkte weiter erschwert (vgl. Tabelle 7 im Anhang).

In dieser Untersuchung werden diverse Fragestellungen mit einer einheitlichen Methodik beantwortet, was in Folgestudien ebenfalls erfolgen sollte. Die Varianz in der Literatur entspricht den realen Bedingungen in der klinischen Anwendung und betont die Notwendigkeit, keramische Restaurationen vor der adhäsiven Befestigung mit Try-In-Pasten zu testen.

5.2.2. Farbabstand von Try-In und Komposit

Den festgestellten Einfluss auf die Farbe von vollkeramischen Restaurationen gilt es mithilfe von Try-In-Pasten abzuschätzen. Dafür sollten sie es ermöglichen, die finale Farbe der Restauration vor der Befestigung vorherzusagen.

Alghazali et al. beschreiben bei 0,6 mm dicken Plättchen aus Glaskeramik, die auf bovinen Zähnen mit einem ES untersucht wurden, ein teils signifikant unterschiedliches ΔE von 1,05

bis 3,34 abhängig von der Produktreihe. Die ermittelten Farbabstände lagen somit überwiegend im wahrnehmbaren Bereich und teilweise darüber.⁶²

Daneshpooy et al. beschreiben bei 0,5 mm dicken, hoch transluzenten Keramikplättchen für Pan uni mit unbekannter Schichtstärke des Befestigungsmaterials einen Farbabstand zwischen Try-In und Komposit von $\Delta E = 0,93 (\pm 0,46)$. Den Farbabstand bei Pan clear gibt er mit $\Delta E = 1,30 (\pm 0,57)$ an. Zwischen den verschiedenen Produktreihen zeigte sich dieser signifikant unterschiedlich ($p < 0,001$). Gemessen wurde dabei mit einem anderen Spektrofotometer (SpectroShade Micro, MHT, Verona, Italien).⁴⁵

In der Untersuchung von Vaz et al. wurden mit einem ES mittlere ΔE von $1,77 \pm 0,81$ bis $4,99 \pm 3,80$ zwischen Try-In und Komposit gemessen. Diese unterschieden sich teilweise signifikant voneinander.⁵⁸

In allen drei Untersuchungen reichen die Ergebnisse vom Bereich der Wahrnehmungsgrenze bis teilweise deutlich über die Akzeptanzgrenze hinaus. Diese Befunde stützen die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung, aus denen sich ableiten lässt, dass häufig eine Farbdiskrepanz zwischen einprobierten und adhäsiv befestigten Veneers besteht.

Daraus folgt, dass man mit Try-In-Pasten das Farbergebnis nicht exakt vorhersagen kann. Besonders große Farbabstände wurden festgestellt, wenn versucht wurde, dunkle Hintergründe durch opake Komposite zu maskieren. Dennoch kann die Try-In-Paste eine Orientierung bieten, da der Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit in der Regel geringer ist als der Gesamteinfluss des Befestigungsmaterials auf die finale Farbe der Restauration.

5.2.3. Einfluss der Spaltbreite

Die Spaltbreite unterscheidet sich im Bereich des Restaurationsrandes vom Rest der Versorgung. Der marginale Spalt gilt als kritischer Faktor für den Langzeiterfolg einer Restauration. Neben dem erhöhten Risiko für Sekundärkaries bei einem zu großen Randspalt ist das Befestigungsmaterial vermehrt den äußeren Einflüssen ausgesetzt. Darum wird dieser Bereich in der CAD-Software auf 0 μm eingestellt.⁶³

Im Lumen der Restauration wird eine Spaltbreite eingestellt, die als Platzhalter für das Befestigungsmaterial dient.

In der Literatur wird ein Einfluss durch die Schichtstärke des Befestigungsmaterials beschrieben. Dieser beruht darauf, dass weniger Licht durch eine stärkere Schicht von Befestigungskomposit hindurchdringt.⁶⁴

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen den Gruppen mit eingestellten Spaltbreiten von 50 und 80 μm . Das betraf den absoluten Farbeinfluss sowie den Farbabstand zwischen Try-In und Komposit.

Zu begründen ist dies durch den geringen Unterschied der gemessenen Schichtstärke des Befestigungsmaterials von circa 70 und 100 μm . Dabei ist zu vermuten, dass die entstehenden Unterschiede der Lichttransmission von der davorliegenden Keramikschicht abgeschwächt werden.^{49,65}

In der Literatur werden die klinisch erreichten Spaltbreiten mit 61 bis 208 μm zum Teil wesentlich höher beschrieben.⁶⁶

Die Vorversuche der Untersuchung, in denen sich eine große Varianz bei Befestigung ohne Befestigungshilfe zeigte, deuten darauf hin, dass die Spaltbreiten in der klinischen Anwendung eine Rolle spielen könnten. Dabei hätte aber die in der Software geplante Spaltbreite weniger Farbeinfluss als der korrekte Sitz und die Passung der Versorgung. Dies sollte in Folgestudien untersucht werden.

5.2.4. Einfluss der Stumpffarbe

Der Farbton des Zahnstumpfes beeinflusst die Farbe der eingesetzten vollkeramischen Restauration. Die Größe dieses Effekts wird maßgeblich durch die Transluzenz der Keramik und des Befestigungsmaterials bestimmt.⁵⁴

In der Untersuchung von Sen et al wird ebenfalls ein signifikanter Einfluss des Hintergrunds auf die Farbe von vollkeramischen Restaurationen beschrieben. Dafür wurden Veneers unter anderem aus IPS e.max MT A1 verwendet. Die Dicke der Veneers wurde mit 0,4 - 0,7 mm angegeben. Gemessen wurde ebenfalls mit einem ES. Als Befestigungskomposite wurden VE light+ und VE neutral verwendet. Dabei wiesen die Zahnstümpfe deutlich größere Farbabstände untereinander auf als in der vorliegenden Untersuchung, sodass ein signifikantes ΔE_{00} von 2,19 ($\pm 0,25$) zwischen der hellsten und der dunkelsten Hintergrundfarbe (ND1-ND5, IPS Natural Die Material Kit, Ivoclar Vivadent GmbH) gemessen wurde ($p < 0,001$).³⁹

In der vorliegenden Untersuchung hatte die Stumpffarbe einen Einfluss auf die Farbe des Veneers nach adhäsiver Befestigung. Allerdings wurde der Farbabstand zwischen einprobierten und adhäsiv befestigten Veneers nicht signifikant von der Stumpffarbe beeinflusst.

5.3. Schlussfolgerung

Die verschiedenen Untersuchungen mit Keramikplättchen zu dem Farbabstand von mit Try-In-Pasten einprobierten und mit Befestigungskompositen verklebten Restaurationen unterstreichen die Ergebnisse dieser Untersuchung:

10. *Die Befestigungsmaterialien verändern den Farbeindruck transluzenter Restaurationen ($p < 0,001$). Der zum Teil deutlich sichtbare Farbabstand sollte bei der Befestigung berücksichtigt werden.*
11. *Try-In-Pasten und entsprechende Befestigungskomposite unterscheiden sich signifikant hinsichtlich ihrer Farbwirkung ($p < 0,001$). Die Farbabstände liegen häufig im Bereich der Wahrnehmungsgrenze ($\Delta E_{00} = 0,8$) und zum Teil deutlich darüber, was die präzise Farbabstimmung im Vorfeld der Befestigung erschwert.*
12. *Der Einfluss der Zahnstumpffarbe auf den Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit ist statistisch nicht signifikant ($p = 0,812$).*
13. *Auch der Farbabstand zwischen Prüfkörpern mit Spaltbreiten von $50 \mu\text{m}$ und $80 \mu\text{m}$ ist nicht signifikant ($p = 0,566$).*
14. *Die Messverfahren sind unabhängig voneinander zu betrachten ($p < 0,001$). Das eLAB-System erscheint dabei besonders geeignet zur Farbmessung von Prüfkörpern mit einem Glanzbrand.*

Zusätzlich lässt sich festhalten, dass der Einfluss der Spaltbreite durch eine schlechte Passung einen Effekt auf die Farbe von Versorgungen haben könnte.

Zudem sollte ein standardisiertes Testverfahren entwickelt werden, um eine bessere Vergleichbarkeit zukünftiger Untersuchungen zu ermöglichen.

6. Literaturverzeichnis

1. Hein S, Tapia J, Bazos P. eLABor_aid: a new approach to digital shade management. *Int J Esthet Dent* 2017; 12(2): 186-202.
2. Joiner A, Luo W. Tooth colour and whiteness: a review. *J Dent* 2017; 67(Suppl): 3-10.
3. Haralur SB. Microleakage of porcelain laminate veneers cemented with different bonding techniques. *J Clin Exp Dent* 2018; 10(2): e166-71.
4. Chu SJ. Dentale Farbenlehre: Farbbestimmung und Farbkommunikation in der ästhetischen Zahnmedizin. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2005.
5. Richter M. Farbmatrik. 8 th ed. Berlin: de Gruyter; 1987.
6. Schmideder J. Ästhetische Zahnmedizin. Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2009.
7. VITA Zahnfabrik. Nr. 10114 VITA Zahnfarbbestimmung | Broschüren (Version 014). 2024. <https://www.vita-zahnfabrik.com/de/Downloadcenter-Produktinformationen-611.html> (Zuletzt abgerufen am 04.07.2025).
8. Luo MR, Cui G, Rigg B. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Res Appl* 2001; 26: 340-50.
9. Sirintawat N, Leelarungruang T, Poovarodom P, Kiattavorncharoen S, Amornsettachai P. The accuracy and reliability of rooth shade selection using different instrumental techniques: an in vitro study. *Sensors (Basel)* 2021; 21(22).
10. Hernandez DKL, Arrais CAG, de 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.
11. Soares-Rusu IBL, Villavicencio-Espinoza CA, de Oliveira NA, et al. Using digital photographs as a tool to assess the clinical color stability of lithium disilicate veneers: a clinical trial. *J Prosthet Dent* 2024; 131(5): 859-864.
12. Villalta P, Lu H, Okte Z, Garcia-Godoy F, Powers JM. Effects of staining and bleaching on color change of dental composite resins. *J Prosthet Dent* 2006; 95(2): 137-42.
13. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, et al. Color difference thresholds in dentistry. *J Esthet Restor Dent* 2015; 27 Suppl 1: 1-9.
14. Paravina RD, Pérez MM, Ghinea R. Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry: A comprehensive review of clinical and research applications. *J Esthet Restor Dent* 2019; 31(2): 103-12.
15. Giti R, Barfei A, Mohaghegh M. The influence of different shades and brands of resin-based luting agents on the final color of leucite-reinforced veneering ceramic. *Saudi Dent J* 2019; 31(2): 284-9.
16. Ghinea R, Pérez MM, Herrera LJ, Rivas MJ, Yebra A, Paravina RD. Color difference thresholds in dental ceramics. *J Dent* 2010; 38 Suppl 2: e57-64.
17. Douglas RD, Steinhauer TJ, Wee AG. Intraoral determination of the tolerance of dentists for perceptibility and acceptability of shade mismatch. *J Prosthet Dent* 2007; 97(4): 200-8.

18. Khashayar G, Bain PA, Salari S, Dozic A, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Perceptibility and acceptability thresholds for colour differences in dentistry. *J Dent* 2014; 42(6): 637-44.
19. International Organization for Standardization. ISO/TR 28642:2016 - Dentistry - Guidance on colour measurement. 2016.
20. 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.
21. Igiel C, Lehmann KM, Ghinea R, et al. Reliability of visual and instrumental color matching. *J Esthet Restor Dent* 2017; 29(5): 303-8.
22. 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.
23. Weyhrauch M, Igiel C, Pabst AM, Wentaschek S, Scheller H, Lehmann KM. Interdevice agreement of eight equivalent dental color measurement devices. *Clin Oral Investig* 2015; 19(9): 2309-18.
24. 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.
25. Joiner A. Tooth colour: a review of the literature. *J Dent* 2004; 32 Suppl 1: 3-12.
26. Blum SL, Horn M, Olms C. A comparison of intraoral spectrophotometers-are there user-specific differences? *J Esthet Restor Dent* 2018; 30(5): 442-8.
27. Datacolor GmbH. Was ist der Unterschied zwischen einem Kolorimeter und einem Spektralphotometer? 2025. <https://www.datacolor.com/de/business-solutions/blog/was-ist-der-unterschied-zwischen-einem-kolorimeter-und-einem-spektralphotometer/> (Zuletzt abgerufen am 04.07.2025).
28. Kern M, Ahlers MO, Beuer F, et al. Vollkeramische Therapiekonzepte. Malsch: AG Keramik; 2023.
29. Troedson M, Dérand T. Shear stresses in the adhesive layer under porcelain veneers: a finite element method study. *Acta Odontol Scand* 1998; 56(5): 257-62.
30. Walls AWG, Steele JG, Wassell RW. Crowns and other extra-coronal restorations: porcelain laminate veneers. *Br Dent J* 2002; 193(2): 73-82.
31. Kern M, Wolfart S, Heydecke G, Witkowski S, Türp JC, Strub JR. Curriculum Prothetik Band 2. Berlin: Quintessence Verlags-GmbH; 2022.
32. Blunck U, Fischer S, Hajtó J, Frei S, Frankenberger R. Ceramic laminate veneers: effect of preparation design and ceramic thickness on fracture resistance and marginal quality in vitro. *Clin Oral Investig* 2020; 24(8): 2745-54.
33. Koubi S. Keramikveneers 20 Techniken für ästhetischen Erfolg. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2021.
34. Liu M, Gai K, Chen J, Jiang L. Comparison of failure and complication risks of porcelain laminate and indirect resin veneer restorations: a meta-analysis. *Int J Prosthodont* 2019; 32(1): 59-65.

35. Morimoto S, Rebello de Sampaio FB, Braga MM, Sesma N, Özcan M. Survival rate of resin and ceramic inlays, onlays, and overlays: a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res* 2016; 95(9): 985-94.
36. Peumans M, Van Meerbeek B, Lambrechts P, Vanherle G. Porcelain veneers: a review of the literature. *J Dent* 2000; 28(3): 163-77.
37. Layton D, Walton T. An up to 16-year prospective study of 304 porcelain veneers. *Int J Prosthodont* 2007; 20(4): 389-96.
38. Ivoclar Vivadent GmbH. IPS e.max CAD. 2023. https://www.ivoclar.com/de_de/products/digital-processes/ips-e.max-cad (Zuletzt abgerufen am 01.04.2025 2025).
39. Sen N, Sermet B. Masking ability of monolithic CAD/CAM laminate veneers over different resin cement shades and substrate colors. *Int J Prosthodont* 2024; 37(5): 540-6.
40. Willard A, Chu TMG. The science and application of IPS e.max dental ceramic. *Kaohsiung J Med Sci* 2018; 34(4): 238-42.
41. Stawarczyk B, Kieschnick A, Liebermann A, Rosentritt M. Werkstoffkunde-Kompendium Dentale Befestigungsmaterialien. Berlin: Quintessenz Verlags-GmbH; 2019.
42. Liebermann A, Stawarczyk B, Kieschnick A. Adhäsiv oder traditionell?. *Quintessenz Zahntech* 2018; 12(1): 22-3.
43. Paken G, Yıldırım B, Ünal M, Tekeli A, Kirarslan Ö. Colour agreement between try-in paste and resin cement: effect of background on zirconia-reinforced lithium silicate. *Aus Dent J* 2021; 66(4): 406-12.
44. 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.
45. Daneshpooy M, Pournaghi Azar F, Alizade Oskoe P, Bahari M, Asdagh 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 Prospect* 2019; 13(1): 61-7.
46. 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.
47. Kürklü D, Azer SS, Yilmaz B, Johnston WM. Porcelain thickness and cement shade effects on the colour and translucency of porcelain veneering materials. *J Dent* 2013; 41(11): 1043-50.
48. Gunal B, Ulusoy MM. Optical properties of contemporary monolithic CAD-CAM restorative materials at different thicknesses. *J Esthet Restor Dent* 2018; 30(5): 434-41.
49. Perroni AP, Kaizer MR, Della Bona A, Moraes RR, Boscato 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.

50. Ivoclar Vivadent GmbH. Variolink Esthetic. 2024. https://www.ivoclar.com/de_de/products/cementation/variolink-esthetic (Zuletzt abgerufen am 04.07.2025).
51. GC Europe. G-CEM Veneer. 2020. <https://www.gc.dental/europe/de-DE/products/gcemveneer> (Zuletzt abgerufen am 04.07.2025).
52. Kuraray Europe GmbH. Panavia Veneer LC. 2023. <https://www.kuraraynoritake.eu/de/resin-cements/panavia-veneer> (Zuletzt abgerufen am 04.07.2025).
53. Nogueira AD, Della Bona A. The effect of a coupling medium on color and translucency of CAD-CAM ceramics. *J Dent* 2013; 41: 18-23.
54. Basso GR, Kodama AB, Pimentel AH, et al. Masking colored substrates using monolithic and bilayer CAD-CAM ceramic structures. *Oper Dent* 2017; 42(4): 387-95.
55. Della Bona A, Nogueira AD, Pecho OE. Optical properties of CAD-CAM ceramic systems. *J Dent* 2014; 42(9): 1202-9.
56. Brodine BA, Koriath TV, Morrow B, Shafter MA, Hollis WC, Cagna DR. Surface roughness of milled lithium disilicate with and without reinforcement after finishing and polishing: an in vitro study. *J Prosthodont* 2021; 30(3): 245-51.
57. Della Bona A, Barrett AA, Rosa V, Pinzetta C. Visual and instrumental agreement in dental shade selection: three distinct observer populations and shade matching protocols. *Dent Mater* 2009; 25(2): 276-81.
58. Vaz EC, Vaz MM, de Torres ÉM, de Souza JB, Barata TdJE, Lopes LG. Resin cement: correspondence with try-in paste and influence on the immediate final color of veneers. *J Prosthodont* 2018; 28(1): 74-81.
59. Turgut S, Bagis B, Ayaz EA. Achieving the desired colour in discoloured teeth, using leucite-based CAD-CAM laminate systems. *J Dent* 2014; 42(1): 68-74.
60. Turgut S, Bagis B. Effect of resin cement and ceramic thickness on final color of laminate veneers: an in vitro study. *J Prosthet Dent* 2013; 109(3): 179-86.
61. Tango RN, Volpato CÂM, Santos KF, Cesar PF, Paravina RD. Harmonizing color measurements in dentistry using translucent tooth-colored materials. *BMC Oral Health* 2024; 24(1): 173.
62. Alghazali N, Laukner J, Burnside G, Jarad FD, Smith PW, Preston AJ. An investigation into the effect of try-in pastes, uncured and cured resin cements on the overall color of ceramic veneer restorations: an in vitro study. *J Dent* 2010; 38: e78-e86.
63. Aboushelib MN, Elmahy WA, Ghazy MH. Internal adaptation, marginal accuracy and microleakage of a pressable versus a machinable ceramic laminate veneers. *J Dent* 2012; 40(8): 670-7.
64. Günal-Abduljalil B, Ulusoy MM. The effect of resin cement shade and restorative material type and thickness on the final color of resin-matrix ceramics. *J Prosthodont Res* 2022; 66(1): 75-82.
65. Chongkavinit P, Anunmana C. Optical effect of resin cement, abutment material, and ceramic thickness on the final shade of CAD-CAM ceramic restorations. *J Prosthet Dent* 2021; 125(3): 517.e1-.e8.

66. Baig MR, Qasim SSB, Baskaradoss JK. Marginal and internal fit of porcelain laminate veneers: a systematic review and meta-analysis. *J Prosthet Dent* 2022.
67. Lindblom BJ. Delta E (CIE 2000). 2017.
http://www.brucelindbloom.com/index.html?Eqn_DeltaE_CIE2000.html (Zuletzt abgerufen am 04.07.2025).
68. Xing W, Jiang T, Ma X, et al. Evaluation of the esthetic effect of resin cements and try-in pastes on ceromer veneers. *J Dent* 2010; 38: 87-94.

7. Anhang

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1 Schemazeichnung – Interaktion des Lichts mit einem Zahn	13
Abb. 2 CIE-Farbraum mit Darstellung des Zahnfarbraums	15
Abb. 3 Schemazeichnung Farbmessung und Farbwahrnehmung des Versuchsaufbaus	17
Abb. 4 Oberflächenprofilmessung eines natürlichen Zahnes nach Rotring-Präparation	27
Abb. 5 3D-gedruckter Zahn 21 in Oberkiefermodell eingesteckt	29
Abb. 6 Entwurfansicht in der Ceramill Mind	30
Abb. 7 Fertigstellung der 300 Veneers nach dem Schleifvorgang	31
Abb. 8 Spaltbreite zwischen Veneer und Stumpf nach manueller Befestigung	32
Abb. 9 Spaltbreite zwischen Veneer und Stumpf mit Befestigungshilfe	33
Abb. 10 Befestigungshilfe in der CAD-Software	33
Abb. 11 Befestigung eines Veneers mit Befestigungshilfe	34
Abb. 12 Studiendesign	35
Abb. 13 Gruppenaufteilung	36
Abb. 14 Befestigungsprotokoll	38
Abb. 15 Positionierungshilfe für das Vita Easyshade V	39
Abb. 16 Farbbestimmung in der eLAB-Software	40
Abb. 17 Versuchsaufbau eLAB	41
Abb. 18 eLAB – Farbveränderung durch das Einsetzen mit Befestigungsmaterialien	44
Abb. 19 Easyshade – Farbveränderung durch das Einsetzen mit Befestigungsmaterialien ..	45
Abb. 20 eLAB & Easyshade – Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit	46
Abb. 21 eLAB – Paarweiser Vergleich der Farbdiskrepanzen zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit der jeweiligen Produktreihen	47
Abb. 22 Easyshade – Paarweiser Vergleich der Farbdiskrepanzen zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit der jeweiligen Produktreihen	47
Abb. 23 eLAB – Einfluss der Spaltbreite auf die Farbdiskrepanz zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit	48
Abb. 24 Easyshade – Einfluss der Spaltbreite auf die Farbdiskrepanz zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit	49
Abb. 25 eLAB – L-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung	50
Abb. 26 eLAB – a-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung	51
Abb. 27 eLAB – b-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung	51

Abb. 28 eLAB – Einfluss der Stumpffarbe auf die Farbdiskrepanz zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit	52
Abb. 29 Easyshade – Einfluss der Stumpffarbe auf die Farbdiskrepanz zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit	53
Abb. 30 VE light+ – Einfluss von Deckgläschen auf den L-Wert	55
Abb. 31 VE warm+ – Einfluss von Deckgläschen auf den L-Wert	55
Abb. 32 VE light+ – Einfluss von Deckgläschen auf den a-Wert	56
Abb. 33 VE warm+ – Einfluss von Deckgläschen auf den a-Wert	56
Abb. 34 VE light+ – Einfluss von Deckgläschen auf den b-Wert	57
Abb. 35 VE warm+ – Einfluss von Deckgläschen auf den b-Wert	57
Abb. 36 Easyshade – L-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung	77
Abb. 37 Easyshade – a-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung	77
Abb. 38 Easyshade – b-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung	78
Abb. 39 Erklärung der CIEDE2000-Farbabstandsformel	81

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Übersicht der verwendeten Befestigungsmaterialien.....	25
Tabelle 2 eLAB – Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss der Befestigungsmaterialien.....	73
Tabelle 3 ES – Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss der Befestigungsmaterialien.....	74
Tabelle 4 Messergebnisse Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit.....	75
Tabelle 5 Nachuntersuchung mit Deckgläschen – VE light+	78
Tabelle 6 Nachuntersuchung mit Deckgläschen – VE warm+	79
Tabelle 7 Literaturübersicht – Farbabstand Try-In-Paste zu Befestigungskomposit.....	81

7.3. Messergebnisse

7.3.1. Farbeinfluss der Befestigungsmaterialien

Tabelle 2 eLAB – Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss der Befestigungsmaterialien

Medium	Produkt	Mittelwert ± SD	Paarweiser Vergleich	p-Wert	Signifikanz	
Try-In	VE light+	2,46 ± 0,84	VE light+-VE warm+	1,000	nein	
	VE warm+	2,64 ± 0,90	-	-	-	
	Pan uni	1,10 ± 0,37	Pan uni-GC A2	1,000	nein	
			Pan uni-VE light+	< 0,001	ja	
			Pan uni-VE warm+	< 0,001	ja	
	Pan clear	0,76 ± 0,42	Pan clear-GC trans	1,000	nein	
			Pan clear-Pan uni	0,051	nein	
			Pan clear-GC A2	0,024	ja	
			Pan clear-VE light+	< 0,001	ja	
			Pan clear-VE warm+	< 0,001	ja	
			GC trans	0,82 ± 0,46	GC trans-Pan uni	0,560
	GC trans	0,82 ± 0,46	GC trans-GC A2	0,204	nein	
			GC trans-VE light+	< 0,001	ja	
			GC trans-VE warm+	< 0,001	ja	
			GC A2	1,26 ± 0,56	GC A2-VE light+	< 0,001
	GC A2	1,26 ± 0,56	GC A2-VE warm+	< 0,001	ja	
			GC A2-VE light+	< 0,001	ja	
	Komposit	VE light+	4,03 ± 1,12	-	-	-
		VE warm+	3,63 ± 1,12	VE warm+-VE light+	1,000	nein
		Pan uni	0,90 ± 0,42	Pan uni-Pan clear	1,000	nein
Pan uni-GC trans				0,041	ja	
Pan uni-GC A2				0,015	ja	
Pan uni-VE warm+				< 0,001	ja	
Pan uni-VE light+				< 0,001	ja	
Pan clear		1,14 ± 0,46	Pan clear-GC trans	1,000	nein	
			Pan clear-GC A2	0,787	nein	
			Pan clear-VE warm+	< 0,001	ja	
			Pan clear-VE light+	< 0,001	ja	
GC trans		1,49 ± 0,60	GC trans-GC A2	1,000	nein	
			GC trans-VE warm+	< 0,001	ja	
			GC trans-VE light+	< 0,001	ja	
GC A2		1,59 ± 0,66	GC A2-VE warm+	< 0,001	ja	
			GC A2-VE light+	< 0,001	ja	

Tabelle 3 ES – Paarweiser Vergleich: Farbeinfluss der Befestigungsmaterialien

Medium	Produkt	Mittelwert ± SD	Paarweiser Vergleich	p-Wert	Signifikanz	
Try-In	VE light+	1,84 ± 0,54	VE light+-VE warm+	< 0,001	ja	
	VE warm+	3,47 ± 1,09	-	-	-	
	Pan uni	1,35 ± 0,88	Pan uni-GC A2	1,000	nein	
			Pan uni-VE light+	0,025	ja	
			Pan uni-VE warm+	< 0,001	ja	
	Pan clear	0,63 ± 0,28	Pan clear-Pan uni	< 0,001	ja	
			Pan clear-GC A2	< 0,001	ja	
			Pan clear-VE light+	< 0,001	ja	
			Pan clear-VE warm+	< 0,001	ja	
	GC trans	0,58 ± 0,26	GC trans-Pan clear	1,000	nein	
			GC trans-Pan uni	< 0,001	ja	
			GC trans-GC A2	< 0,001	ja	
			GC trans-VE light+	< 0,001	ja	
			GC trans-VE warm+	< 0,001	ja	
	GC A2	1,38 ± 0,57	GC A2-VE light+	0,320	nein	
			GC A2-VE warm+	< 0,001	ja	
	Komposit	VE light+	1,64 ± 0,86	VE light+-GC trans	0,390	nein
				VE light+-GC A2	0,001	ja
VE light+-VE warm+				< 0,001	ja	
VE warm+		5,76 ± 1,35	-	-	-	
Pan uni		1,40 ± 0,52	Pan uni-VE light+	1,000	nein	
			Pan uni-GC trans	0,045	ja	
			Pan uni-GC A2	< 0,001	ja	
			Pan uni-VE warm+	< 0,001	ja	
Pan clear		0,97 ± 0,61	Pan clear-Pan uni	0,037	ja	
			Pan clear-VE light+	0,001	ja	
			Pan clear-GC trans	< 0,001	ja	
			Pan clear-GC A2	< 0,001	ja	
			Pan clear-VE warm+	< 0,001	ja	
GC trans		2,15 ± 0,81	GC trans-GC A2	1,000	nein	
			GC trans-VE warm+	< 0,001	ja	
GC A2		2,66 ± 0,71	GC A2-VE warm+	0,009	ja	

7.3.2. Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit

Tabelle 4 Messergebnisse Farbabstand zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit

Messgerät	Produkt	Mittelwert ± SD	Paarweiser Vergleich	p-Wert	Signifikanz	
eLab	VE light+	1,79 ± 0,72	-	-	-	
	VE warm+	1,21 ± 0,71	VE warm+-Pan uni VE warm+-VE light+	1,000 < 0,001	nein ja	
	Pan uni	1,08 ± 0,21	Pan uni-VE light+	< 0,001	ja	
	Pan clear	0,87 ± 0,31	Pan clear-GC trans Pan clear-VE warm+ Pan clear-Pan uni Pan clear-VE light+	1,000 0,148 0,018 < 0,001	nein nein ja ja	
	GC trans	0,95 ± 0,23	GC trans-VE warm+ GC trans-Pan uni GC trans-VE light+	1,000 1,000 < 0,001	nein nein ja	
	GC A2	0,61 ± 0,20	GC A2-Pan clear GC A2-GC trans GC A2-VE warm+ GC A2-Pan uni GC A2-VE light+	0,020 0,005 < 0,001 < 0,001 < 0,001	ja ja ja ja ja	
	ES	VE light+	1,50 ± 0,54	VE light+-GC A2 VE light+-GC trans VE light+-VE warm+	1,000 0,713 0,017	nein nein ja
		VE warm+	2,47 ± 0,14	-	-	-
		Pan uni	1,04 ± 0,91	Pan uni-Pan clear Pan uni-VE light+ Pan uni-GC A2 Pan uni-GC trans Pan uni-VE warm+	1,000 < 0,001 < 0,001 < 0,001 < 0,001	nein ja ja ja ja
		Pan clear	1,09 ± 0,67	Pan clear-VE light+ Pan clear-GC A2 Pan clear-GC trans Pan clear-VE warm+	0,012 0,006 < 0,001 < 0,001	ja ja ja ja
		GC trans	2,00 ± 0,87	GC trans-VE warm+	1,000	nein
		GC A2	1,70 ± 0,77	GC A2-GC trans GC A2-VE warm+	1,000 0,957	nein nein

7.4. Einfluss der Farbe des Zahnstumpfs

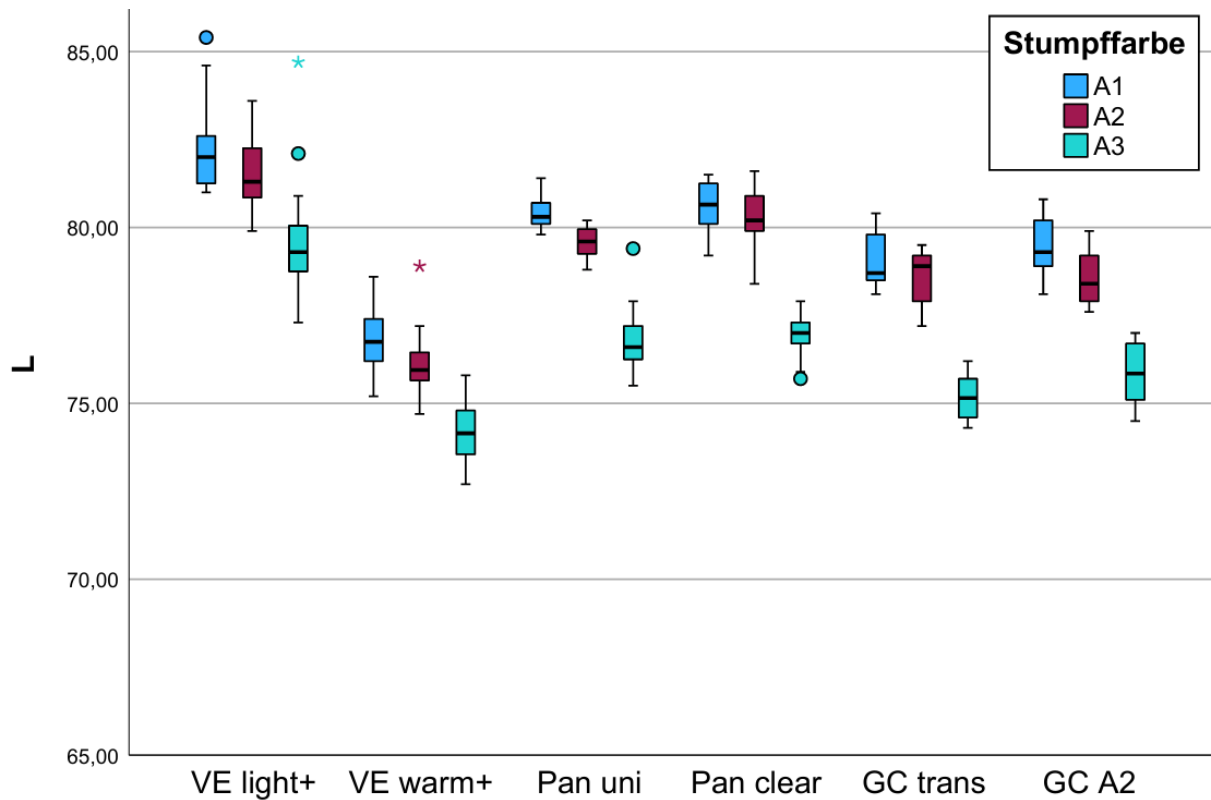


Abb. 36 Easyshade – L-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung

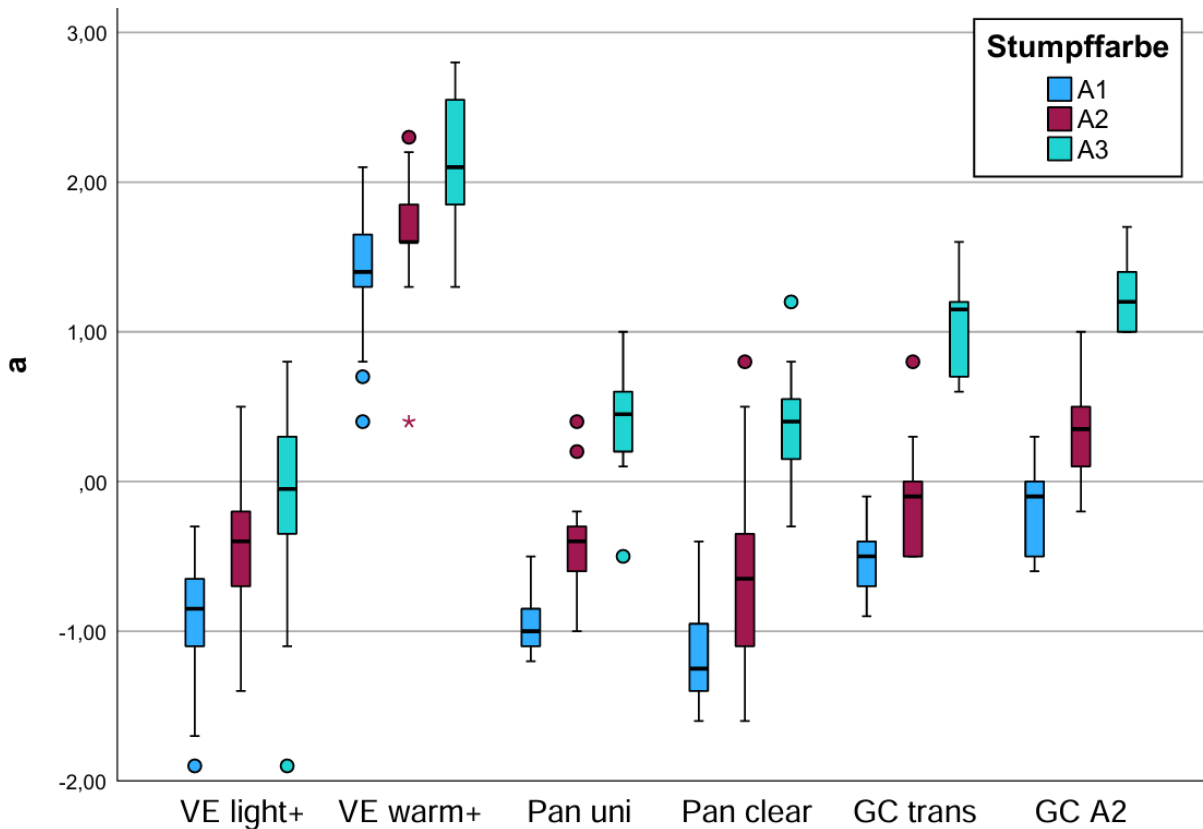


Abb. 37 Easyshade – a-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung

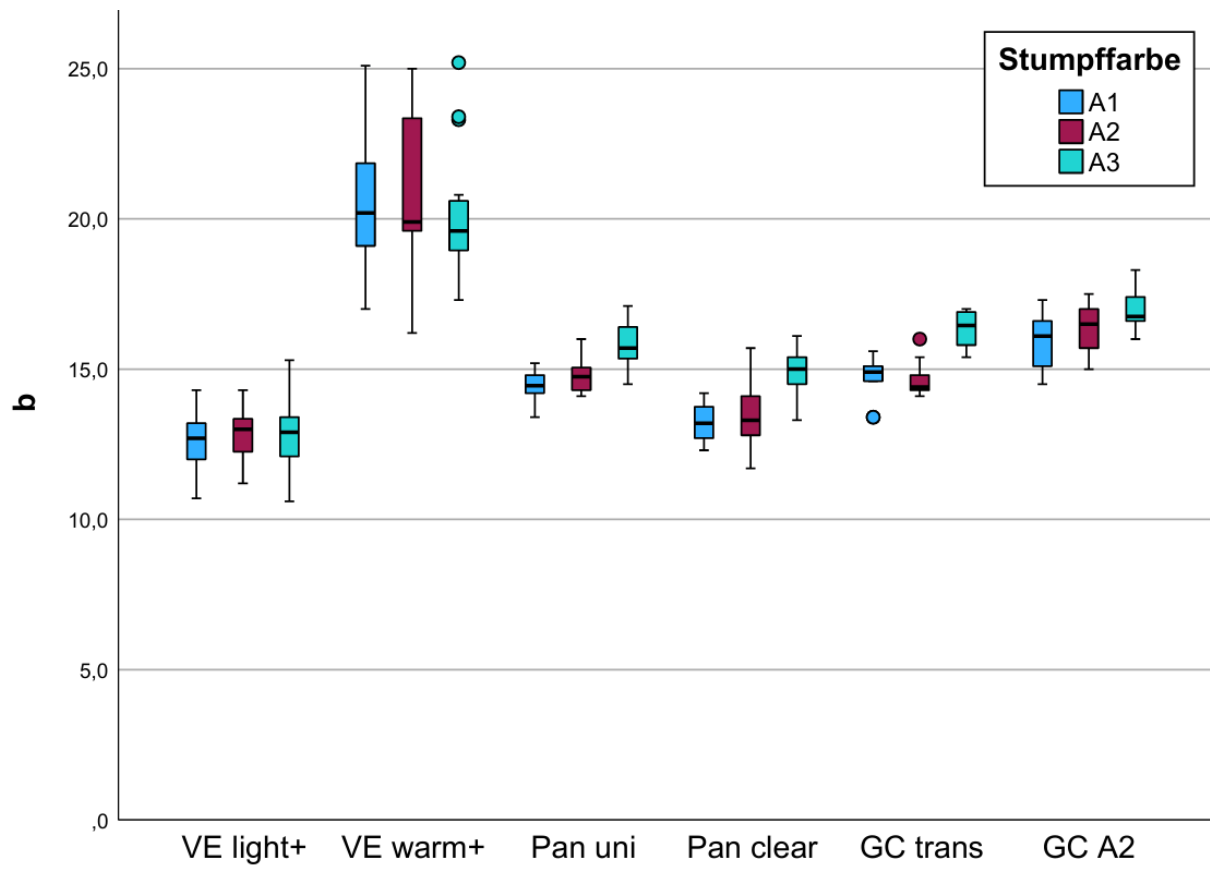


Abb. 38 Easyshade – b-Werte je Stumpffarbe nach adhäsiver Befestigung

7.4.1. Nachuntersuchung mit Deckgläschen

Tabelle 5 Nachuntersuchung mit Deckgläschen – VE light+

Messmethode	Messwert	Anzahl Deckgläschen	Mittelwert \pm SD	p-Wert (zu 1 Deckgläschen)	Signifikanz
eLAB	L	0	93,52 \pm 0,04	<0,001	ja
		1	90,91 \pm 0,04	-	-
		2	87,95 \pm 0,04	<0,001	ja
		3	85,03 \pm 0,04	<0,001	ja
	a	0	-0,10 \pm 0,02	1	nein
		1	-0,10 \pm 0,02	-	-
		2	-0,06 \pm 0,02	0,451	nein
		3	-0,09 \pm 0,02	1	nein
	b	0	4,70 \pm 0,06	<0,001	ja
		1	5,08 \pm 0,06	-	-
		2	5,31 \pm 0,06	0,041	ja
		3	5,45 \pm 0,06	<0,001	ja
ES	L	0	91,29 \pm 0,12	<0,001	ja
		1	99,85 \pm 0,12	-	-
		2	92,48 \pm 0,12	<0,001	ja
		3	93,55 \pm 0,12	<0,001	ja
	a	0	4,56 \pm 0,3	<0,001	ja
		1	-0,68 \pm 0,3	-	-
		2	4,97 \pm 0,3	<0,001	ja
		3	4,82 \pm 0,3	<0,001	ja
	b	0	22,96 \pm 0,12	<0,001	ja
		1	13,68 \pm 0,12	-	-
		2	23,29 \pm 0,12	<0,001	ja
		3	22,24 \pm 0,12	<0,001	ja

Tabelle 6 Nachuntersuchung mit Deckgläschen – VE warm+

Messmethode	Messwert	Anzahl Deckgläschen	Mittelwert ± SD	p-Wert (zu 1 Deckgläschen)	Signifikanz	
eLAB	L	0	74,70 ± 0,19	<0,001	ja	
		1	72,56 ± 0,19	-	-	
		2	68,83 ± 0,19	<0,001	ja	
		3	66,03 ± 0,19	<0,001	ja	
	a	0	11,57 ± 0,12	0,572	nein	
		1	11,85 ± 0,12	-	-	
		2	12,17 ± 0,12	0,356	nein	
		3	12,11 ± 0,12	0,797	nein	
	b	0	35,74 ± 0,13	0,019	ja	
		1	35,18 ± 0,13	-	-	
		2	34,64 ± 0,13	0,031	ja	
		3	33,57 ± 0,13	<0,001	ja	
	ES	L	0	80,19 ± 0,10	<0,001	ja
			1	79,47 ± 0,10	-	-
			2	78,37 ± 0,10	<0,001	ja
			3	78,49 ± 0,10	<0,001	ja
a		0	2,34 ± 0,04	<0,001	ja	
		1	1,67 ± 0,04	-	-	
		2	3,03 ± 0,04	<0,001	ja	
		3	3,04 ± 0,04	<0,001	ja	
b		0	40,23 ± 0,21	<0,001	ja	
		1	34,13 ± 0,21	-	-	
		2	41,78 ± 0,21	<0,001	ja	
		3	40,96 ± 0,21	<0,001	ja	

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

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

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

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

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

$$G = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{C^7}{C^7 + 25^7}} \right) \quad (6)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$R_C = 2\sqrt{\frac{C^7}{C^7 + 25^7}} \quad (24)$$

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

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

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

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

Abb. 39 Erklärung der CIEDE2000-Farbabstandsformel ⁶⁷

Tabelle 7 Literaturübersicht – Farbabstand Try-In-Paste zu Befestigungskomposit

Autor(en)	Jahr	Hintergrund	Befestigungsmaterial
Paken, G. et al. ⁴³	2021	Komposit, Filtek Z250 A1 & A3 (3M ESPE)	4 Farbtöne Panavia V5 (Kuraray Noritake)
Daneshpooy, M. et al. ⁴⁵	2019	Komposit, Natural Shade A3 (Nova Dfl)	5 Farbtöne Panavia V5 (Kuraray Noritake)
Alghazali, N. et al. ⁴⁴	2018	Bovine Zähne	9 Farbtöne Calibra Nexus-3 Universal Luting system RelyX Unicem Veneer cement (Dentsply Sirona, Kerr Corporation, 3M ESPE)
Vaz, E. C. et al. ⁵⁸	2018	Bovine Zähne	7 Farbtöne Variolink Veneer (Ivoclar Vivadent) <i>Unbekannte/ungleichmäßige Spaltbreite</i>
Xu, B. et al. ⁴⁶	2014	Komposit, Amelogen Plus A3 (Ultradent)	5 Farbtöne RelyX Veneer (3M ESPE) <i>keine Ätzung, kein Adhäsiv</i>
Xing, W. et al. ⁶⁸	2010	Komposit, Value Plus A3 (3M ESPE)	5 Farbtöne RelyX Veneer (3M ESPE) <i>keine Ätzung, kein Adhäsiv</i>

Keramik	Messgerät	Fallzahl	$\Delta E / \Delta E_{00}$ zwischen Try-In-Paste und Befestigungskomposit
Plättchen 0,8 mm, A1 Celtra Duo HT (Dentsply Sirona)	ES (Spektralfotometer)	44	Nur Farbveränderung im Vergleich zur Referenzmessung angegeben
Plättchen 0,5 & 0,7 mm, A1 Katana UTML (Kuraray Noritake)	SpectroShade Micro (MHT) (Spektralfotometer)	90	ΔE (0,5 mm) = 0,93-2,57 ΔE (0,7 mm) = 0,85-2,29
Plättchen 0,6 mm, 1M1 Vitadur Alpha VM7 (Vita Zahnfabrik)	ES (Spektralfotometer)	135	$\Delta E = 1,05-3,34$
Plättchen 0,7 & 0,35 mm, B1 IPS e.max HT (Ivoclar Vivadent)	ES (Spektralfotometer)	140	ΔE (0,7 mm) = 1,77-4,99 ΔE (0,35 mm) = 1,01-4,66
Plättchen 1 & 0,7 & 0,5 mm, A3 IPS e.max (Ivoclar Vivadent)	PR-650 Spectra Scan (Photo Research) (Spektralfotometer)	10 (x 15)	ΔE (1 mm) = 0,69±0,21 ΔE (0,7 mm) = 1,27±0,48 ΔE (0,5 mm) = 1,40±0,57
Plättchen 1 & 0,8 & 0,5 mm, A2 Ceramage body materials (Shofu Inc.)	PR-650 Spectra Scan (Photo Research) (Spektralfotometer)	30 (x3)	ΔE (1 mm) = 1,54±0,53 ΔE (0,8 mm) = 1,69±0,50 ΔE (0,5 mm) = 1,67±0,41

* Untersuchungen ohne genaue Angabe von Material und Methode wurden ausgeschlossen

8. Vorabveröffentlichungen von Ergebnissen

Brackhagen L., Di Gregorio-Schininà M., Steeger B., Faber F.-J., Schulz A., Liebermann A.:
Einfluss von Try-In-Pasten und Befestigungskompositen auf die endgültige Farbe von Keramikveneers: Farbbestimmung mit digitaler Fotografie und Spektrofotometrie

71. Jahrestagung der DGPro, Leipzig (2024)

Brackhagen L., Di Gregorio-Schininà M.:

Einfluss von adhäsiven Befestigungssystemen auf die Farbe von Keramikveneers.

36. DGZMK/BZÄK/Dentsply Sirona Förderpreis, Düsseldorf (2024)