

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde
der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Evaluation der Reproduzierbarkeit der Farbkoordinaten
L*, a*, b*, C* und h° unter Verwendung eines dentalen Spektralphotometers im Rahmen
einer Bleachingstudie

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Zahnmedizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Veronika Baumann
aus Bonn

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. Hansjörg Schild

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 21.02.25

**Mit großer Dankbarkeit meiner Familie
gewidmet**

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis | I |
| Tabellenverzeichnis | II |
| Abkürzungsverzeichnis | IV |
| 1. Einleitung..... | 1 |
| 2. Einführung | 2 |
| 2.1. Was ist Farbe | 2 |
| 2.2. Farbmeterik | 2 |
| 2.3. Natürliche Zahnfarbe | 3 |
| 2.4. Zahnverfärbungen | 3 |
| 2.4.1 Extrinsische Verfärbungen..... | 4 |
| 2.4.2 Intrinsische Verfärbungen..... | 4 |
| 2.5. Bleichmittel und ihre Wirkungsweise..... | 5 |
| 2.6. Bleichverfahren | 5 |
| 2.6.1 Externes Bleaching..... | 5 |
| 2.6.2 Internes Bleaching | 6 |
| 2.7. Zahnfarbbestimmung | 7 |
| 2.7.1 Visuelle Zahnfarbbestimmung | 7 |
| 2.7.2 Digitale Zahnfarbbestimmung..... | 7 |
| 2.8. Messfehler | 9 |
| 2.9. Derzeitige Studienlage | 10 |
| 2.10. Ziel der Studie | 12 |
| 3. Material und Methode..... | 13 |
| 3.1. Material | 13 |
| 3.1.1 Geräte | 13 |
| 3.1.2 Instrumente..... | 14 |
| 3.1.3 Verbrauchsmaterialien..... | 15 |
| 3.1.4 Softwareprogramme | 15 |
| 3.2. Methode..... | 16 |
| 3.2.1 Studiendesign | 16 |
| 3.2.2 Studienaufbau und Verlauf | 16 |
| 3.2.3 Datenauswertung..... | 20 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4. | Ergebnisse | 22 |
| 4.1. | Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° im Vergleich ohne versus mit Schiene | 22 |
| 4.1.1 | Farbkoordinate L^* | 23 |
| 4.1.2 | Farbkoordinate a^* | 24 |
| 4.1.3 | Farbkoordinate b^* | 25 |
| 4.1.4 | Farbkoordinate C^* | 26 |
| 4.1.5 | Farbkoordinate h° | 27 |
| 4.1.6 | Signifikanzen im Vergleich ohne versus mit Schiene | 27 |
| 4.2. | Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zu den Zahngruppen | 28 |
| 4.2.1 | Tabellen zu den Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen | 28 |
| 4.2.2 | Graphische Darstellung | 30 |
| 4.2.3 | Signifikanzen | 33 |
| 4.3. | Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zu den Messzeitpunkten | 38 |
| 4.3.1 | Tabellen zu den Intraklassenkorrelationen der Messtermine | 38 |
| 4.3.2 | Graphische Darstellung | 40 |
| 4.3.3 | Signifikanzen | 45 |
| 5. | Diskussion | 49 |
| 5.1. | Methodendiskussion | 49 |
| 5.1.1 | Studienteilnehmende | 49 |
| 5.1.2 | Ärztliches Bleaching | 49 |
| 5.1.3 | Produkt „Phillip Zoom! DayWhite“ | 50 |
| 5.1.4 | Spektralphotometer VITA Easyshade V | 51 |
| 5.1.5 | Durchführung der Messungen | 52 |
| 5.1.6 | Einsatz desselben Gerätes | 52 |
| 5.1.7 | Positionierungsschienen | 53 |
| 5.1.8 | Untersuchungsgegenstand: Der natürliche Zahn | 54 |
| 5.1.9 | Umgebungsfaktoren | 54 |
| 5.1.10 | Statistische Auswertung | 55 |
| 5.1.11 | Studienlage zu Bleaching und digitaler Reproduzierbarkeit | 55 |
| 5.2. | Ergebnisdiskussion | 57 |
| 5.2.1 | Einfluss einer Schiene auf die Reproduzierbarkeit | 57 |
| 5.2.2 | Reproduzierbarkeit bei unterschiedlichen Zahngruppen | 60 |
| 5.2.3 | Einfluss einer Bleaching-Behandlung auf die Reproduzierbarkeit | 64 |
| 5.2.4 | Reproduzierbarkeit bei Anwendung des VITA Easyshade V | 66 |
| 6. | Zusammenfassung | 68 |

| | | |
|----|---------------------------------|----|
| 7. | Literaturverzeichnis | 69 |
| 8. | Anhang | 80 |
| 9. | Tabellarischer Lebenslauf | 85 |

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Das VITA Easyshade V in seiner Akkuladestation mit integrierter Kalibrierungsmembran und Touchscreen
- Abb. 2: Präzision der Farbbestimmung
- Abb. 3: Positionierungsschiene für die Messung mit Schiene in situ und mit positioniertem Messkopf
- Abb. 4: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate L^*
- Abb. 5: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate a^*
- Abb. 6: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate b^*
- Abb. 7: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate C^*
- Abb. 8: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate h°
- Abb. 9: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ für die Farbkoordinate L^*
- Abb. 10: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ für die Farbkoordinate a^*
- Abb. 11: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ für die Farbkoordinate b^*
- Abb. 12: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ für die Farbkoordinate C^*
- Abb. 13: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ für die Farbkoordinate h°
- Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Farbkoordinate L^* zum Termin $t(6)$

Tabellenverzeichnis

- Tab. 1: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate L^* im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst
- Tab. 2: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate a^* im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst
- Tab. 3: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate b^* im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst
- Tab. 4: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate C^* im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst
- Tab. 5: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate h° im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst
- Tab. 6: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate L^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin
- Tab. 7: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate a^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin
- Tab. 8: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate b^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin
- Tab. 9: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate C^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin
- Tab.10: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate h° der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin
- Tab. 11: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 11, 21 als Referenz
- Tab. 12: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 12, 22 als Referenz
- Tab. 13: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 13, 23 als Referenz
- Tab. 14: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 31, 41 als Referenz
- Tab. 15: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 32, 42 als Referenz

- Tab. 16: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 33, 43 als Referenz
- Tab. 17: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate L^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen
- Tab. 18: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate a^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen
- Tab. 19: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate b^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen
- Tab. 20: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate C^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen
- Tab. 21: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate h° der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen
- Tab. 22: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(0)$ als Referenz
- Tab. 23: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(1)$ als Referenz
- Tab. 24: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(2)$ als Referenz
- Tab. 25: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(3)$ als Referenz
- Tab. 26: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(4)$ als Referenz
- Tab. 27: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(5)$ als Referenz
- Tab. 28: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(6)$ als Referenz
- Tab. 29: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(7)$ als Referenz

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-------------------------------|--|
| 3D | 3-dimensional |
| a* | Rot-Grün-Parameter |
| b* | Gelb-Blau-Parameter |
| C* | Sättigungsparameter |
| CIE | Commission Internationale de l'Eclairage |
| h° | Farbtonparameter |
| H ₂ O ₂ | Wasserstoffperoxid |
| ICC | Intraklassenkorrelation |
| K | Kelvin |
| L* | Helligkeitsparameter |
| Lux | Einheit der Beleuchtungsstärke |
| OTC | Over-the-counter |

1. Einleitung

Diese klinische Arbeit befasst sich mit der digitalen Farbbestimmung von Zähnen anhand eines im Markt eingeführten Spektralphotometers. Durchgeführt wurden mehr als 30.000 Einzelmessungen an 57 Probandinnen und Probanden.

Die Bedeutung einer zuverlässigen Farbbestimmung ist erheblich; nur so kann den ästhetischen Ansprüchen unserer Patienten und Patientinnen im Rahmen von Bleaching-Verfahren ein objektiver Hintergrund gegeben werden. Zahnärztinnen und Zahnärzte sehen sich heute zunehmend mit dem Wunsch nach einer Zahnaufhellung konfrontiert (1, 2). Unter den Möglichkeiten der Farbkorrektur kommt der chemischen Zahnaufhellung eine große Bedeutung zu, was sich auch in einem wachsenden Angebot aufhellender Substanzen widerspiegelt (2, 3).

Um festzustellen, ob eine Zahnaufhellung stattgefunden hat, muss man in der Lage sein, die Zahnfarbe vor und nach der Behandlung genau zu bestimmen, einen Farbunterschied berechnen und die Ergebnisse mit einem Standard vergleichen können, an Hand dessen sich eine klinische Veränderung darstellen lässt (4, 5). Der Farbbestimmung kommt eine Schlüsselrolle zu. Sie stellt nach wie vor eine Herausforderung für den Behandler oder die Behandlerin dar (6-8).

Voraussetzung für eine digitale Farbbestimmung ist deren Reproduzierbarkeit. Eine vorhandene Farbe bzw. Farbkoordinate muss wiederholt als solche bestimmt werden können, um eine Farbe festzulegen und eine Veränderung dokumentieren zu können. Ziel dieser Untersuchung war es, die Reproduzierbarkeit der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit einem digitalen Spektralphotometer zu untersuchen. Zum Einsatz gelangte das Gerät Easyshade V, das von der Firma VITA Zahnfabrik (Bad Säckingen, Deutschland) angeboten wird. Die Reproduzierbarkeit bezieht sich auf die Konstanz der Messergebnisse bei wiederholter Messung, ohne das Gerät vom zu messenden Zahn zu entfernen.

2. Einführung

2.1. Was ist Farbe

Farbe ist keine physikalische Größe. Sie beruht auf der Interpretation eines Reizes in Form von Licht, der mit Hilfe des menschlichen Auges, des Gehirns und des visuellen Systems wahrgenommen wird (9). Die für uns sichtbare Strahlung liegt im Wellenlängenbereich von 400nm bis 700nm und wird als Licht bezeichnet. Das Licht an sich ist nicht farbig (10). Es kann von dem beleuchteten Objekt jedoch absorbiert, reflektiert, gestreut oder durchgelassen werden (11). Eine bestimmte Farbe entsteht dann dadurch, dass das Objekt eine bestimmte Wellenlänge stärker reflektiert als andere. So erscheint ein Objekt rot, wenn die Wellenlänge der Farbe Rot stärker reflektiert wird als die der anderen Farben und somit die Wellenlängen der Farbe Rot unser Auge erreichen. Unsere Wahrnehmung wird somit durch die Wechselwirkung von Licht mit der Materie beeinflusst. Je nach Zusammensetzung der Wellenlängen der Lichtquelle nehmen wir unterschiedliche Farben wahr (12).

2.2. Farbmeterik

Der erste Versuch, Farbe objektiv numerisch auszudrücken und zu quantifizieren, wurde im Jahr 1905 von Munsell unternommen, der ein Farbmodell in Form einer Weltkugel mit den fünf Hauptfarben Rot, Gelb, Grün, Blau und Violett entwickelte (13). Im Jahr 1976 entwickelte die Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) den CIELAB-Farbraum (14), der sich bis heute durchsetzt.

Der CIELAB-Farbraum lässt sich in einem kartesischen Koordinatensystem mit den Koordinaten L^* , a^* und b^* darstellen. L^* ist dabei ein Maß für die Helligkeit (Helligkeitsparameter). Ein perfektes Schwarz hat den Wert Null und ein reines Weiß den Wert 100. Im Bereich dazwischen gibt es verschiedene Grautöne. Mathematisch gesehen stellt L^* die Ordinate dar und liegt senkrecht zu den Farbwertachsen a^* (Rot-Grün-Parameter) und b^* (Gelb-Blau-Parameter). Die Abszisse wird durch a^* definiert, das bei einem positiven Wert die Farbe Rot und bei einem negativen Wert die Farbe Grün repräsentiert. Die b^* -Achse steht für die Farbe Gelb bei positivem Wert und für die Farbe Blau bei negativem Wert. Zur L^* -Achse und zum Zentrum hin werden die Farben zunehmend achromatischer.

Der CIELAB-Farbraum kann neben dem kartesischen Koordinatensystem auch in einem Polarkoordinatensystem mit einer Abstandskordinate C^* und einer Winkelkordinate h° dargestellt werden (die Koordinate L^* bleibt unverändert). C^* steht dabei für die Sättigung (Chroma) und h° für den Farbton (hue). Für die Intensität einer Farbe bedeutet dies, dass alle Farben auf einer Kreislinie rund um einen Mittelpunkt unabhängig vom Farbton die gleiche

Intensität haben. Die Winkelkoordinate h° geht aus dem Radiusstrahl hervor. Bei einem Winkel von 0° ergibt sich die Farbe Rot (a^+), bei 90° Gelb (b^+), bei 180° Grün (a^-) und bei 270° Blau (b^-) (15).

Der Zusammenhang zwischen allen Koordinaten lässt sich mathematisch wie folgt darstellen (15):

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h^\circ = \frac{b^*}{\sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}}$$

Die Abstände zwischen den Farbenorten im Farbenraum (ΔE) bezeichnen den empfundenen Farbunterschied des menschlichen Auges (16, 17). Die Berechnungsformel von ΔE lautet (14):

$$\Delta E_{ab} = \sqrt{(L_x^* - L_y^*)^2 + (a_x^* - a_y^*)^2 + (b_x^* - b_y^*)^2}$$

Die Verwendung der Farbsysteme L^* , a^* , b^* sowie L^* , C^* und h° in Verbindung mit objektiven Messmethoden wie der digitalen Farbbestimmung ist aus der Zahnmedizin nicht mehr wegzudenken (18-23).

2.3. Natürliche Zahnfarbe

Die natürlichen Zahnfarben liegen nur in einem kleinen Teil des Farbsystems. Parallel zur Helligkeitsachse L^* erstrecken sich die Zahnfarben bananenförmig. Dies ist insbesondere auf die Helligkeitsunterschiede der natürlichen Dentition zurückzuführen. Dunklere Zähne liegen im unteren Bereich, hellere Zähne weiter oben. Die natürlichen Farbtöne liegen zwischen hellrot (a^* positiver Bereich) und hellgelb (b^* positiver Bereich). Hellere Zähne weisen in der Regel einen höheren Gelbanteil und eine geringere Farbintensität auf. Dunklere Zähne haben dagegen einen höheren Rotanteil und sind farbintensiver (17).

2.4. Zahnverfärbungen

Natürliche Zähne können Licht reflektieren, streuen, absorbieren und transmittieren. Das reflektierte Licht entsteht entweder direkt an der Oberfläche oder wird erst im Inneren des Zahnes vom Dentin zurückgeworfen. Der Schmelz ist mehr als doppelt so transluzent wie das Dentin. Somit bestimmt das Dentin maßgeblich die Farbe des Zahnes. Durch eine Ablagerung von Sekundär- und Tertiärdentin im Laufe des Lebens erscheinen die Zähne zunehmend dunkler (24). Der Schmelz modifiziert das reflektierte Licht durch seine Lichtdurchlässigkeit

und Dicke. Zusätzlich wird die Farbe durch die Oberflächenstruktur und den Oberflächenglanz beeinflusst (25).

Darüber hinaus kann die Farbe natürlicher Zähne durch intrinsische und extrinsische Faktoren verändert werden. Die extrinsischen Verfärbungen befinden sich auf der Zahnoberfläche oder innerhalb des erworbenen Pellikels, während die intrinsischen Verfärbungen im Zahninneren zu finden sind (26). Verfärbungen in oder auf unseren Zähnen entstehen durch Ionengruppen, die als Chromophore bezeichnet werden. Sie lagern sich in oder auf der Zahnhartsubstanz an und zeichnen sich durch konjugierte Doppelbindungen aus (26).

2.4.1 Extrinsische Verfärbungen

Hauptsächlich verantwortlich für extrinsische Verfärbungen sind der Konsum von Nahrungsmitteln und Getränken wie Rotwein, Kaffee, schwarzer Tee oder das Rauchen (27). Physikalische und chemische Anziehungskräfte auf die Zahnoberfläche spielen bei der Entstehung extrinsischer Verfärbungen eine entscheidende Rolle. Von Bedeutung sind unter anderem: van der Waals-Kräfte, hydrophobe Wechselwirkungen, Dipol-Dipol-Kräfte, Wasserstoffbrückenbindungen sowie elektrostatische Kräfte. Aufgrund der negativen Ladung der Schmelzoberfläche dominieren die elektrostatischen Kräfte. Sie führen zur selektiven Anlagerung von Proteinen (28, 29). Die extrinsischen Zahnverfärbungen befinden sich insbesondere in schwer zu reinigenden Bereichen der Zahnoberfläche mit ausgeprägter Pellikelbildung (30-32).

Die meisten extrinsischen Verfärbungen können mit rein prophylaktischen und abrasiven Methoden entfernt werden (33-36). Der Einsatz von Bleichmitteln kann ebenfalls hilfreich sein (28, 31, 37).

2.4.2 Intrinsische Verfärbungen

Intrinsische Verfärbungen treten im Schmelz oder Dentin auf (28) und sind schwieriger zu behandeln als oberflächliche extrinsische Verfärbungen. Verfärbungen im Dentin sind von außen kaum zu behandeln (30, 32). Dennoch kann eine Bleaching-Behandlung eine Therapieoption zur Behandlung der Verfärbungen darstellen (38). Die intrinsischen Verfärbungen können in präeruptive, also solche die während der Zahnentwicklung zum Beispiel durch Medikamente oder die Genetik entstanden sind, und posteruptive Verfärbungen, die zum Beispiel auf posttraumatische Einlagerung von Blut zurückzuführen sind, unterteilt werden (28, 39). Nach einem Trauma oder einer Vitalexstirpation können Blut- und Gewebereste sowie die nachfolgenden Abbauprodukte zu intrinsischen Verfärbungen führen (40, 41).

2.5. Bleichmittel und ihre Wirkungsweise

Unter Bleichen versteht man die chemische Aufhellung der Zähne und damit den Umbau von Chromogenen, die Licht im sichtbaren Spektrum absorbieren (26, 42). Der am häufigsten verwendete Wirkstoff ist das Wasserstoffperoxid. Es kann entweder als Wasserstoffperoxid direkt oder in Form von Carbamidperoxid, das als Depotform von H_2O_2 angesehen wird, zur Verfügung gestellt werden (26). Carbamidperoxid setzt circa ein Drittel seines Inhalts als Wasserstoffperoxid frei (42). Nathoo et al. (43) bewiesen im Jahr 2003, bei der Untersuchung der Effektivität zweier Bleachinggels, dass es keinen statistischen Unterschied in der Wirksamkeit der Zahnaufhellung zwischen einem 25% Carbamidperoxid-Gel und einem 8,7% Wasserstoffperoxid-Gel gibt. Die Wirkung von H_2O_2 beruht auf der Diffusion in den Zahn und der Freisetzung instabiler freier Radikale und der daraus resultierenden Oxidation der Doppelbindungen der Chromogene. Die Spaltung der Doppelbindung führt zur Bildung kleinerer Moleküle mit Verschiebung des Absorptionsspektrums (37, 44, 45).

2.6. Bleichverfahren

Bei der chemischen Bleiche gibt es verschiedene Verfahren. Man unterscheidet zwischen externer und interner Applikation des Bleichmittels. Die interne Applikation ist nur bei avitalen Zähnen möglich (45, 46). Voraussetzung für die Indikationsstellung zum internen Bleaching ist eine suffiziente Wurzelkanalfüllung (40, 41). Externes Bleaching kann sowohl bei vitalen als auch bei avitalen Zähnen angewendet werden. Grundsätzlich sollte jeder externen Bleaching-Behandlung eine professionelle Zahnreinigung vorausgehen, damit die Wirksamkeit des Bleichmittels nicht durch Beläge auf den Zähnen herabgesetzt wird (36, 47).

2.6.1 Externes Bleaching

Das externe Aufhellen von Zähnen kann entweder durch den Zahnarzt „In-Office“ oder zu Hause unter zahnärztlicher Aufsicht (Home-Bleaching) oder auch ohne ärztliche Betreuung mithilfe freiverkäuflicher Produkte („over-the-counter“, abgekürzt OTC) durchgeführt werden (26, 36, 48-50).

Das Home-Bleaching-Verfahren ist wahrscheinlich die am häufigsten angewandte Methode (51). Erstmals wurde die Technik 1989 von Haywood und Heymann als „nightguard-vital-bleaching“ beschrieben (52). Sie ist mit geringen Kosten, einer einfachen Anwendung, einem geringen Risiko der Entwicklung von Zahnempfindlichkeiten und einer hohen Erfolgsrate verbunden (44, 51). Dabei führt der Patient oder die Patientin unter zahnärztlicher Betreuung den Bleachingprozess zu Hause selbst durch. Nach Abdrucknahme erhält er oder

sie eine individuell angepasste, flexible Kunststoffschiene. Diese sollte zum Zahnfleischsaum hin abgedichtet sein und eine Aussparung für das spätere Gelvolumen enthalten. Die Qualität der Schiene ist entscheidend für den Therapieerfolg. Eine unzureichend angepasste Schiene kann zum Austritt von Bleichmittel mit der Folge einer verminderten Bleachingleistung sowie zu unerwünschten Nebenwirkungen führen (36). Je nach Bleichmittel und Konzentration muss der Patient oder die Patientin die Schiene täglich zwischen 30 Minuten und mehreren Stunden tragen (48). Die Wasserstoffperoxidkonzentrationen liegen in der Regel in einem Bereich zwischen 3% und 7,5% (53). Ein deutlicher Behandlungserfolg beim Home-Bleaching kann sich bereits nach 7 - 10 Tagen (36), nach zwei (36, 54, 55) oder sechs Wochen (52) einstellen. Beim „In-Office“-Bleaching erfolgt die Aufhellung ausschließlich in Praxisräumlichkeiten unter zahnärztlicher Kontrolle. Verwendet wird Wasserstoffperoxid oder Carbamidperoxid in einer Konzentration von bis zu 40%. Bei einer derart hohen Wirkstoffkonzentration muss der oder die Behandelnde für einen suffizienten Schutz der Gingiva beispielsweise durch Liquid Kofferdam sorgen (36, 44, 47, 48, 53, 56, 57). Die Einwirkzeit variiert; sie wird mit beispielsweise 10-15 Minuten (47, 53) oder 20-30 Minuten (32) angegeben. Der Vorgang kann wiederholt werden, um das gewünschte Ergebnis zu erzielen. Die Behandlung führt schnell zu einem Ergebnis (44) und ist weitgehend unabhängig von dem Verhalten des Patienten/der Patientin (53). Diskutiert wird, ob die gleichzeitige Bestrahlung mit Licht die Bildung von Radikalen aus dem Wasserstoffperoxid erhöht und den Prozess beschleunigt (58-60). Nicht verschreibungspflichtige Bleichmittel werden bei der „over-the-counter“-Methode verwendet. Solche Bleichmittel haben in den letzten Jahren an Popularität gewonnen (61). Die Produkte gibt es zum Beispiel in Form von Streifen, Gelen, Zahnpasten oder Mundspülungen. Die jeweils freiverkäuflichen Konzentrationen sind länderspezifisch. Streifen gelten als die effektivste Form dieser Behandlungsmethode (62).

2.6.2 Internes Bleaching

Internes Bleaching ist eine Methode zum Aufhellen von devitalen Zähnen. Heute gibt es verschiedene Techniken zur Durchführung des internen Bleachings. Allen gemeinsam ist, dass das Bleichmittel in die Zugangskavität eingebracht wird. Zur Anwendung kommen unter anderem die Walking-Bleach-Technik oder das Inside/Outside-Verfahren. Eine gefürchtete Komplikation des internen Bleachings ist die Wurzelresorption. Diese kann infolge von Austritten des Bleichmittels durch Mikroperforationen ins Parodontium und der daraus resultierenden Entzündungsreaktion entstehen (63).

2.7. Zahnfarbbestimmung

Die Zahnfarbbestimmung ist ein häufiger Arbeitsschritt in der Zahnmedizin, um die Farbe der natürlichen oder prothetischen Zähne eines Patienten festzulegen. Somit spielt sie bei der Herstellung von direkten und indirekten Restaurationen sowie bei der Beurteilung von Farbunterschieden und der Kontrolle von Zahnaufhellungen für ein zufriedenstellendes Ergebnis eine entscheidende Rolle (4, 64). Derzeit werden verschiedene Methoden eingesetzt, um die Farbe von Zähnen zu bestimmen. Man unterscheidet zwischen subjektiven Verfahren wie der visuellen Beurteilung mit Hilfe von Farbschlüsseln und objektivierten, instrumentellen Bestimmungen (65-67).

2.7.1 Visuelle Zahnfarbbestimmung

Die visuelle Zahnfarbbestimmung ist die weltweit am weitesten verbreitete Methode (6, 68). Die Bestimmung erfolgt durch individuellen Vergleich eines natürlichen Zahnes mit einem standardisierten Farbschlüssel, typischerweise in Zahnform. Dabei werden die Referenzzähne im Mund mit Musterzähnen einer Farbskala verglichen (68). Da es sich um ein subjektives Verfahren handelt, wird die Farbbestimmung unter anderem durch den Hintergrund (69), die Lichtverhältnisse (66, 70, 71), die Transluzenz (25, 66), die Oberflächenstruktur (11, 69), den Oberflächenglanz (66), das Farbempfinden des Betrachters (70, 72-74) sowie dessen Erfahrung beeinflusst (69).

2.7.2 Digitale Zahnfarbbestimmung

Die digitale Zahnfarbbestimmung ist ein objektives Verfahren, welches die visuelle Methode ergänzt (8, 23, 67, 75). Hierzu werden spezielle Geräte verwendet, die digitale Daten liefern. Anwendung finden zum Beispiel Intraoralkameras, Colorimeter, Digitalkameras und Spektralphotometer (76). Ein Spektralphotometer ist Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

2.7.3 Spektralphotometer

Spektralphotometer bestehen aus einer Strahlungsquelle, einem Objekt zur Streuung des Lichts, einem Detektor und einem System zur Umwandlung des Lichts in ein auswertbares Signal (77). Die vom Objekt reflektierte Lichtmenge wird durch den enthaltenen Disperser, der ursprünglich aus einem Prisma bestand, heute aber häufig durch einen aus Beugungsgitter und Photodiodenzellen bestehenden Spektrographen ersetzt ist, in die Wellenlängen des

gesamten sichtbaren Spektrums aufgespalten. Die Anzahl der Photodiodenzellen korrespondiert mit der Wellenlängenauflösung und variiert von 16 bis zu mehreren Tausend Zellen. Die Detektoren innerhalb der Photodiodenzellen erfassen immer einen bestimmten Wellenlängenbereich. Das daraus resultierende elektrische Signal wird verstärkt, digitalisiert und numerisch verarbeitet. Vereinfacht ausgedrückt sendet das Gerät also Licht verschiedener Wellenlängen aus und misst die reflektierte Strahlung und deren spektrale Zusammensetzung. Aus den so gewonnenen Daten werden Farbkoordinaten wie L^* , a^* und b^* berechnet (77). Diese Koordinaten definieren einen bestimmten Punkt im dreidimensionalen Farbraum. Die gewonnenen Informationen werden für den klinischen Vergleich in der Regel zusätzlich in Farbschlüsseläquivalente übersetzt (7, 16, 78). Die Daten können abschließend gespeichert und für weitere Kommunikation oder Dokumentation genutzt werden.

Prinzipiell kann jede Lichtquelle mit ausreichender Leistung im interessierenden Wellenlängenbereich verwendet werden. Die meisten Geräte sind jedoch auf die spektrale Charakteristik von D65 zwischen 300nm und 780nm abgestimmt (77). Spektralphotometer verwenden ein integriertes standardisiertes Licht und sollen von der Umgebungsbeleuchtung weitgehend unbeeinflusst bleiben (79, 80).

2.7.4 VITA Easyshade V

Das hier verwendete VITA Easyshade V gehört zur neuesten Gerätegeneration der Firma VITA Zahnfabrik, Bad Säckingen. Es handelt sich um ein intraorales Kontakt-Spektralphotometer. Der Durchmesser des Messkopfes beträgt circa 5 mm. Das Gerät verfügt über unterschiedliche Betriebsmodi für die Grundfarbbestimmung, die Mittelungsfarbbestimmung, die Zahnbereichsfarbbestimmung sowie die Farbbestimmung im Bleaching-Modus. In der vorliegenden Untersuchung wurde der Modus der Grundfarbbestimmung verwendet. Die gemessenen Farbwerte werden direkt an einen kabellos verbundenen Computer übertragen und können dort gespeichert werden.



Abb. 1: Das VITA Easyshade V in seiner Akkuladestation mit integrierter Kalibrierungsmembran und Touchscreen

Abbildung 1 zeigt das verwendete Gerät in seiner Ladestation. Der Instrumentenkopf liegt auf der Kalibrierungsmembran auf. Vor jeder Inbetriebnahme am jeweiligen Probanden/Probandin wurde das Gerät kalibriert. Nach der Kalibrierung in der Ladestation wird der Instrumentenkopf zur Messung auf den zu untersuchenden Zahn positioniert. Durch Drücken des Knopfes auf dem Geräterücken sendet das VITA Easyshade V Licht aus und beendet die Messung mit einem Piepton. Die Daten werden sofort auf einem mit dem Gerät verbundenen Computer abgelegt.

2.8. Messfehler

Bei allen Arten von Messungen gibt es zweierlei Messungengenauigkeiten, zum einen denjenigen der Präzision und zum anderen denjenigen der Genauigkeit der Messung. Roy S. Berns hat dies anhand einer Zielscheibe veranschaulicht. Treffen mehrere Darts in die Nähe des Zentrums, jedoch an unterschiedliche Stellen, spricht man von hoher Genauigkeit und geringer Präzision. Treffen alle Darts an dieselbe Stelle, jedoch vom Zentrum weit entfernt, spricht man ausschließlich von hoher Präzision (81).

Für die vorliegende Studie ist die Präzision von Interesse. Bezogen auf die Thematik der Zahnfarbbestimmung geht es um die Frage, ob eine Farbe immer als dieselbe gemessen wird.

Sind unsere Methoden in der Lage, bei wiederholten Messungen unter gleichen Bedingungen immer wieder die gleichen Ergebnisse zu liefern? Wir Menschen tun uns damit schwer. Einige Studien haben gezeigt, dass unsere Beobachtungen über die Zeit nicht konstant bleiben (72, 82-84). Ein Konsens zwischen mehreren Beobachtern wirkt sich jedoch positiv aus (85).

Ein aufmerksamer Beobachter wird im folgenden Beispiel, Abb. 2 feststellen, dass bei der dritten Messung die Farben nicht passend zur Referenzfarbe gepaart wurden. Allerdings sind die Farbunterschiede in diesem Beispiel so groß gewählt, dass uns die Fehlpaarung wahrscheinlich jedes Mal auffallen würde. Im Bereich der Zahnfarben sind die Unterschiede dagegen so gering, dass eine zuverlässige Zuordnung von Zahnfarben zu Referenzfarben nicht mehr möglich ist.

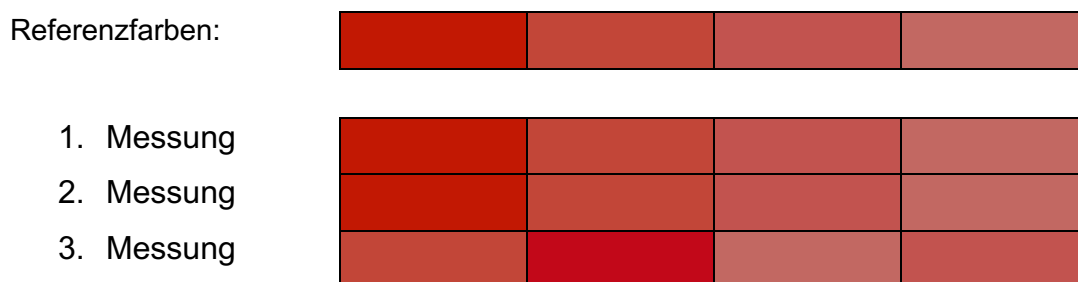


Abb. 2: Präzision der Farbbestimmung

Für die Zahnmedizin ist dies jedoch von entscheidender Bedeutung. Für die Zahnaufhellung beispielsweise bedeutet dies, dass man nur dann, wenn eine Zahnfarbe präzise reproduziert werden kann, sicher sein kann, dass bei einer Veränderung der Messergebnisse tatsächlich auch eine Farbveränderung stattgefunden hat. Dies ist für die Kommunikation mit dem Patienten/Patientin unerlässlich. Die Genauigkeit, also ob die korrekte natürliche Farbe gemessen wird, ist nicht Gegenstand dieser Studie.

2.9. Derzeitige Studienlage

Das Interesse an der Farbforschung hat in den letzten Jahrzehnten zugenommen. Bei den zwei Schlüsselbegriffen „Farbe und Zahnmedizin“ fanden sich im Jahr 1980 557 Artikel auf dem Rechercheportal „pubmed“. Dreißig Jahre später ließen sich bereits mehr als das Zehnfache an Artikeln abrufen (6789 Artikel). Im Jahr 2023 zeigten sich unter den genannten Schlüsselwörtern 13.568 Ergebnisse (86).

Mit der Entwicklung von gerätegestützten Farbbestimmungssystemen in den späten 1990er Jahren eröffneten sich neue Möglichkeiten. Es ist heute möglich den Erfolg der Farbanpassung den Patienten und Patientinnen zu kommunizieren, sowie die Werte zu reproduzieren und zu überprüfen. Dies steigert die Qualität der klinischen Zahnmedizin (23).

Vielfach wird der Vergleich zwischen visuellen und digitalen Methoden der Zahnfarbbestimmung in der Literatur diskutiert. Verschiedene Studien berichten von besseren Ergebnissen bei der Verwendung eines digitalen Gerätes im Vergleich zur visuellen Beurteilung (75, 83, 87-90). Die besseren Ergebnisse sind auf eine hohe Präzision und Genauigkeit zurückzuführen (19, 87, 88, 91-93). Dies wird unter anderem durch die Eliminierung von subjektiven Faktoren, wie zum Beispiel der individuellen Farbwahrnehmung durch den Zahnarzt, ermöglicht (19, 72).

Gegenstand einiger Studien ist auch die geräteinterne und geräteübergreifende Übereinstimmung von Farbmessungen (94-96). Der Grad der Übereinstimmung zwischen verschiedenen elektronischen Farbmessgeräten unterschiedlicher Hersteller ist oft nicht zufriedenstellend. Die gemessenen Ergebnisse können deshalb nach Meinung der Autoren nicht miteinander verglichen werden (16, 19, 92, 95, 97).

Höher ist die Übereinstimmung zwischen verschiedenen Geräten des gleichen Typs. In einer Studie aus dem Jahr 2015, die acht baugleiche VITA Easyshade Advance Spektralphotometer (Bad Säckingen, VITA Zahnfabrik) untersuchte, wurden hohe Übereinstimmungswerte festgestellt (94). Allerdings liefern gleiche Geräte mit unterschiedlichen Seriennummern (VITA Easyshade V) nicht zwangsläufig die gleichen Farbdaten. Obwohl sie eine hohe Wiederholbarkeit der CIE L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Werte aufweisen (98). Daraus folgt, dass für eine Untersuchung oder eine Untersuchungsreihe immer dasselbe Gerät verwendet werden sollte. Ist dies nicht möglich, sollte mindestens das gleiche Modell identischer Bauart Anwendung finden.

Vergleicht man nun die Studien und untersucht, welches Modell von welchem Hersteller die besten Ergebnisse hinsichtlich Präzision und Genauigkeit liefert, so schneidet jedenfalls das Easyshade der Firma VITA auffallend gut ab (92, 93, 99).

2.10. Ziel der Studie

Ziel dieser Studie ist es, im Rahmen von Bleaching-Behandlungen unter Verwendung des digitalen Spektralphotometers VITA Easyshade V zu untersuchen,

- ob die Verwendung einer Positionierungsschiene einen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Messung hat;
- ob die verschiedenen Zahngruppen unterschiedliche Reproduzierbarkeiten aufweisen;
- ob die verschiedenen Messzeitpunkte während einer Bleaching-Behandlung und in der sich anschließenden Beobachtungsphase ($t(0)$ - $t(7)$) einen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit haben.

Alle diese Fragen wurden unter Berücksichtigung und Differenzierung der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° untersucht.

Folgende Nullhypothesen wurden aufgestellt:

1. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° innerhalb einer Zahngruppe bei den Messungen ohne versus mit Schiene“.
2. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei den Messungen verschiedener Zahngruppen.“
3. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei den Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Verlauf einer Bleaching-Behandlung.“

3. Material und Methode

3.1. Material

Folgende Geräte, Instrumente, Verbrauchsmaterialien und Softwareprogramme wurden in der vorliegenden Arbeit verwendet:

3.1.1 Geräte

| | |
|------------------------------------|---|
| Behandlungseinheit Siemens M1 | Siemens Sirona, Bensheim, Deutschland |
| Sirona Winkelstück Grün T1 CLASSIC | Siemens Sirona, Bensheim, Deutschland |
| Trimmer D-R 644 | Harnisch+Rieth GmbH & Co. KG, Winterbach, Deutschland |
| Handstück C3 Master | Georg Schick Dental GmbH, Schlemmerhofen, Deutschland |
| Dampfstrahlgerät Triton SLA | BEGO GmbH & Co. KG, Bremen, Deutschland |
| Tiefziehgerät Erkoform-RVE | Erkodent, Pfalzgrafenweiler, Germany |
| Bluephase Lichthärtegerät | Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Lichtenstein |
| Laptop Dell Latitude E5500 | Dell Technologies, Round Rock, USA |
| VITA Easyshade V | VITA Zahnfarbik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland |

3.1.2 Instrumente

| | |
|------------------------------|---|
| Grundinstrumentarium | Hu-Friedy Mfg. Co, Chicago, USA |
| Miratray Abformlöffel | Hager & Werken GmbH & Co. KG, Duisburg, Germany |
| Gipsanrührspatel | M+W Dental, Büdingen, Deutschland |
| Gipsanrührbecher | M+W Dental, Büdingen, Deutschland |
| Gipsfräse | M+W Dental, Büdingen, Deutschland |
| Rosenbohrer ISO 008 | Meisinger, Neuss, Deutschland |
| Schere | M+W Dental, Büdingen, Deutschland |
| Kunststofffräse | M+W Dental, Büdingen, Deutschland |
| Siroson Ansatz Nr. 3L | Dentsply Sirona, Wals, Österreich |
| HS-Modellierinstrument Zahle | Henry Schein Dental, New York, USA |
| Polierkelche Pro Cup | Kerr, Kloten, Schweiz |
| Schutzbrille | 3M, Saint Paul, USA |

3.1.3 Verbrauchsmaterialien

| | |
|---|---|
| Polierpaste Proxyt | Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Lichtenstein |
| Alginat Pluralgin super | Pluradent AG & Co KG, Offenbach, Deutschland |
| hydro-stone® 200 Gips | Dentona AG, Dortmund, Deutschland |
| Tiefziehfolien Erkoflex transparent 2.0 mm | Erkodent, Pfalzgrafenweiler, Deutschland |
| LC Block-Out Resin Kit | Ultradent, München, Deutschland |
| ZOOM DayWhite 6% | Koninklijke Philips N.V., Amsterdam, Niederlande |
| Schülke wipes | Schülke, Norderstedt, Deutschland |

3.1.4 Softwareprogramme

| | |
|-------------------------------|---|
| Easysshade Helper V | VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland |
| Stata Version 17.0 | Stata Corp., College Station, USA |
| Microsoft Excel Version 16.68 | Microsoft Deutschland, München, Deutschland |
| Microsoft Word Version 16.67 | Microsoft Deutschland, München, Deutschland |

3.2. Methode

Im Rahmen dieser Dissertation wurde eine prospektive Studie in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde an der Universitätsmedizin Mainz mit 57 Probandinnen und Probanden durchgeführt. Die Studie wurde von der Ethikkommission der Universitätsmedizin Mainz genehmigt (Genehmigungsnummer: 2019-14669).

3.2.1 Studiendesign

Aufgabe der Studie war es, den Aufhellungsprozess der Zähne während der Behandlung mit dem Bleichmittel Phillips ZOOM DayWhite 6% (Oral Healthcare, 22100 Bothell-Everett Hwy, Bothell WA 98021-3003, US) zu bestimmten Zeitpunkten mittels instrumenteller Messungen zu dokumentieren und die Ergebnisse hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Messungen statistisch auszuwerten. Dabei wurde unterschieden, ob ohne oder mit Positionierungsschiene gemessen wurde, welche Zahngruppe untersucht und zu welchem Zeitpunkt die Messungen durchgeführt wurden. Die Studie erfolgte unter höchsten hygienischen Bedingungen mit besonderer Beachtung der Corona-Pandemie.

Untersucht wurden die Zähne 13-23 und 33-43 der jeweiligen Probanden und Probandinnen zu folgenden Messzeitpunkten:

t(0)= unmittelbar vor der ersten Bleachingsitzung (nach Zahnreinigung)

t(1)= unmittelbar nach der ersten Bleaching-Behandlung

t(2)= zwei Tage später

t(3)= sieben Tage später

t(4)= 14 Tage später

t(5)= einen Monat später

t(6)= zwei Monate später

t(7)= sechs Monate später

3.2.2 Studienaufbau und Verlauf

Studienaufbau und Verlauf gliederten sich wie folgt:

3.2.2.1 Eingangsuntersuchung und Stichprobenbeschreibung

Die Rekrutierung der potenziellen Patientinnen und Patienten erfolgte über eine Online-Ausschreibung und einen Aushang am Schwarzen Brett im Bereich der Zahnklinik der Universitätsmedizin Mainz. Im Rahmen der Eingangsuntersuchung wurden die potentiellen

Probandinnen und Probanden über die Studie, die Risiken und die Nebenwirkungen der Behandlung aufgeklärt sowie auf die nachstehenden Ein- und Ausschlusskriterien hin überprüft.

Für die Patientenauswahl galten als Einschlusskriterien:

- Mindestalter von 18 Jahren
- Unterzeichnung der Einwilligungserklärung
- Vitale Zähne ohne Anzeichen auf Hypersensibilitäten und Schmelzrisse
- Keine Parodontitis oder Karies
- Unbehandelte Front- und Eckzähne im Ober- und Unterkiefer

Ausschlusskriterien waren:

- Schmelzanomalien
- Intrinsische Zahnverfärbungen
- Insuffiziente Mundhygiene
- Starkes Rauchen oder starker Alkoholkonsum
- Allergien gegen Inhaltsstoffe
- Schwangerschaft oder Stillzeit

An der Studie nahmen 57 Personen teil. Mit 78,6% stellten die weiblichen Teilnehmer den weitaus größeren Teil der Stichprobe. Das Durchschnittsalter betrug in etwa 25 Jahre. Lediglich 14,2% der Probandinnen und Probanden gaben an Raucher zu sein. Die Datenerhebung fand zwischen Februar 2021 und September 2021 statt.

3.2.2.2 Modell- und Schienenherstellung

Nach schriftlicher Einverständniserklärung der ausgewählten Patienten und Patientinnen und Erfüllung der Kriterien erfolgte jeweils die Abformung mit Alginat Pluralgin super von Ober- und Unterkiefer zur Herstellung der Positionierungs- und Bleachingschienen.

Die genommenen Abformungen wurden mit hydro-stone® 200 Gips ausgegossen. Auf dem ausgehärteten und zum Tiefziehen vorbereiteten, aber nicht modifizierten Modell wurde jeweils eine Tiefziehschiene für den Ober- und Unterkiefer hergestellt, die später als Positionierungsschienen dienten. In diese Schienen wurden im Bereich des zentralen Drittels der zu messenden Zähne 13-23 und 33-43 Perforationen mit einem Durchmesser von 5 mm gefräst, die dem Durchmesser des Kopfes des verwendeten Spektralphotometers entsprachen und somit der eindeutigen Repositionierung des Messkopfes zwischen den einzelnen Messungen dienten.

Anschließend konnte das Modell für die Herstellung der Bleachingschienen vorbereitet werden. Um später mit der Schiene eine suffiziente Abdichtung des Bleichmittels zur Gingiva zu erreichen, wurde mit einem Rosenbohrer (Durchmesser circa 1 mm) an dem Modell entlang

des Gingivalsaums eine girlandenförmige Vertiefung von circa 1 mm Tiefe angelegt. Anschließend wurde ein lichthärtender flüssiger Kofferdam auf die abgeformten Labialflächen der zu bleichenden Zähne auf dem Modell aufgetragen. Dieser diente dazu, einen Hohlraum für das einzubringende Bleichgel zu schaffen. Auf dem Modell konnte anschließend die Bleichschiene tiefgezogen werden. Abschließend wurde jede Schiene mit einer Schere mundgerecht zugeschnitten und die Schutzfolie entfernt.

Insgesamt wurden pro Person vier Schienen angefertigt, zwei Positionierungsschienen und zwei Bleichschienen. Die Passgenauigkeit der Schienen wurde vor dem Beginn der Studie klinisch überprüft.

3.2.2.3 Professionelle Zahnreinigung

Innerhalb von 24 Stunden vor der ersten Bleichsitzung wurde eine professionelle Zahnreinigung durchgeführt, um harte und weiche Beläge für eine exakte Farbbestimmung zu entfernen. In der Regel erfolgte die Reinigung unmittelbar vor der ersten Zahnfarbbestimmung $t(0)$.

3.2.2.4 Digitale Zahnfarbenbestimmung

Die instrumentellen Messungen fanden zu den acht unter 3.2.1 festgelegten Messzeitpunkten statt. Angewandt wurde das Spektralphotometer VITA Easyshade V zunächst mit eingesetzter Positionierungsschiene und in einem weiteren Durchgang ohne Positionierungsschiene. In jedem Durchgang wurden die Zähne 13-23 und 33-43 jeweils dreimal ohne Positionsänderung oder Anheben des Messkopfes im Grundfarbenmodus gemessen. Das Spektralphotometer wurde immer im zentralen Drittel der Zahnoberfläche positioniert. Dabei wurde stets auf eine stabile Auflage des Messkopfes und damit auf einen 90°-Winkel zur Labialfläche sowie auf eine sichere Kopfhaltung des Patienten geachtet. Bei der Messung mit Positionierungsschiene gab die Schiene die Position vor. Jede Messung endete mit einem akustischen Signal (Piepton).



Abb. 3: Positionierungsschiene für die Messung mit Schiene in situ und mit positioniertem Messkopf

Für jede Messung wurden die Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit Hilfe einer speziellen Software der Firma VITA Zahnfabrik sofort automatisch auf einen an das Gerät verbundenen Computer ausgegeben.

Um die hygienischen Standards einzuhalten, wurde das Instrument mit dem Wischdesinfektionsmittel schülke wipes für jeden Patienten oder jede Patientin jeweils desinfiziert. Auf die Verwendung einer Einweg-Schutzkappe wurde aufgrund der erhöhten Fehleranfälligkeit verzichtet.

Das untersuchte Messgerät VITA Easyshade V wurde entsprechend den Herstellerangaben verwendet.

Alle Zahnfarbbestimmungen erfolgten stets nach vorstehend geschilderten standardisierten Bedingungen und Abläufen zu den acht festgelegten Zeitpunkten. Der Messraum wurde mit einer Farbtemperatur von 6500K und einer Lichtstärke von circa 1000lux beleuchtet. Um den Einfluss des Tageslichtes auszuschließen, wurde ein vertikaler Lamellenvorhang vor die Fenster gehängt.

3.2.2.5 Bleachingprotokoll

Die Zahnaufhellung erfolgte mit dem Home-Bleaching-Produkt Phillips ZOOM DayWhite 6%. Die Probandinnen und Probanden wurden über die Anwendung des Produkts informiert und hierüber instruiert. Außerdem wurden sie darauf hingewiesen, dass der Verzehr von stark pigmentierten Lebensmitteln wie Rotwein oder Curry das Bleachingergebnis beeinträchtigen kann. Abgesehen von der ersten Bleachingsitzung führten die Probandinnen und Probanden den Aufhellungsprozess über einen Zeitraum von 14 Tagen selbstständig durch. Sie sollten täglich zunächst ihre Zähne reinigen und dann das Bleaching vornehmen. Dazu mussten sie die Bleachingschiene vestibulär mit einer etwa erbsengroßen Menge Gel pro Zahn befüllen.

Die Menge war individuell an die Zahngröße und -breite des individuellen Probanden anzupassen. Die gefüllte Schiene musste dann eingesetzt, die Überschüsse sollten mit beispielsweise einem Wattestäbchen entfernt und die Schiene für circa 30-90 Minuten in situ belassen werden. Abschließend wurde der Mund gründlich ausgespült und die Schiene von Gelresten befreit und gereinigt.

3.2.3 Datenauswertung

Die Auswertung der Daten erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik der Universität Mainz.

Zunächst wurden die Daten der 57 Patienten/innen randomisiert und in eine Excel-Tabelle übertragen. Insgesamt wurden pro Proband/in 12 Zähne (13-23 und 33-43) an acht Terminen untersucht. Pro Termin wurden zwei Messdurchläufe (mit und ohne Schiene) mit jeweils drei Messungen pro Zahn durchgeführt. Somit wurden pro Proband/in 576 einzelne photometrische Messungen (acht Termine, 12 Zähne, zwei Durchgänge mit jeweils drei Messungen pro Zahn) erstellt. Um den Rahmen der Dissertationsschrift nicht zu überschreiten, begrenzen sich die Auswertungen auf die Werte der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° . Außerdem werden bei der Auswertung die Zähne zu Zahngruppen zusammengefasst. So wurden die Zähne 11+21, 12+22, 13+23, 31+41, 32+42 und 33+43 jeweils zusammen betrachtet. Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Statistikprogramm Stata. Es wurden Intraklassenkorrelationen (ICC) im one-way random-effects model berechnet, welches die zufällige Variation zwischen den einzelnen Messungen erfasst (indem die zwischenindividuelle Varianz durch die Summe aus der zwischenindividuellen und innerhalbindividuellen Varianz dividiert wird). Die drei Messwiederholungen pro Termin und Durchgang dienten als Rater für die Berechnung der ICCs. Ausgewertet wurden die sogenannten Individual ICCs. Um die aufgestellten Nullhypothesen zu untersuchen, gliedert sich die Auswertung in drei Teile. Der erste Teil befasst sich mit der Unterscheidung der Messungen ohne versus mit Schiene. Es wurden die über alle Zeitpunkte gemittelten ICCs mit und ohne Schiene in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° für die einzelnen Zahngruppen berechnet. Die Stichprobenanzahl betrug $n=894$. Mit Hilfe der ermittelten ICCs wurden die p-Werte für den Vergleich ohne versus mit Schiene für die einzelnen Zahngruppen berechnet und die erste Nullhypothese überprüft, die lautet:

„Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° innerhalb einer Zahngruppe bei den Messungen ohne versus mit Schiene“.

Das lokale Signifikanzniveau wurde nach Bonferroni auf 0,01 festgelegt. Die weiteren Auswertungen zur zweiten und dritten Nullhypothese beschränken sich dann auf die Werte mit Schiene der untersuchten Farbkoordinaten. Die ICCs wurden für die verschiedenen Zeitpunkte für jede Zahngruppe in den genannten fünf Farbkoordinaten berechnet. Daraus ergaben sich

fünf Tabellen mit den Zahngruppen in den Zeilen und den Zeitpunkten in den Spalten. Zusätzlich wurden die Intraklassenkorrelationen an den Rändern der Tabelle ermittelt. Das bedeutet, dass einerseits für jede Zahngruppe unabhängig vom Termin und andererseits für jeden Termin unabhängig von der Zahngruppe ein Wert berechnet wurde.

Anhand dieser Werte konnte der t-Test zur Überprüfung der folgenden Nullhypothesen durchgeführt werden:

2. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei den Messungen verschiedener Zahngruppen.“
3. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei den Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Verlauf einer Bleaching-Behandlung.“

Für die Prüfung der zweiten Nullhypothese waren die über den gesamten Messzeitraum gemittelten Intraklassenkorrelationen der einzelnen Zahngruppen von Interesse. Der t-Test wurde immer mit einer Zahngruppe als Referenz durchgeführt. Somit ergaben sich sechs Referenzzahngruppen (11,21; 12,22 ; 13,23 ; 31,41 ; 32,42 ; 33,43), die jeweils gegen die anderen getestet wurden. Nach der Bonferroni-Korrektur ergab sich bei beidseitiger Testung ein Signifikanzniveau von 0,004. Die Stichprobengröße betrug $n=894$.

Für die dritte Nullhypothese waren die Intraklassenkorrelationen der Termine unabhängig von den Zahngruppen von Interesse. Der t-Test wurde für die fünf Farbkoordinaten mit den jeweiligen Messzeitpunkten als Referenz durchgeführt. So entstanden acht Tabellen, basierend auf den acht Messzeitpunkten mit jeweils fünf Spalten für die Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° . Das Signifikanzniveau wurde nach der Bonferroni-Korrektur auf 0,003 festgelegt. Die Stichprobengröße betrug $n=684$.

Bei den Berechnung der t-Tests für die Prüfung der zweiten und dritten Nullhypothese führte die Statistiksoftware auch den Test des Referenzwertes gegen sich selbst durch. Daraus resultierte immer ein Wert von 1. Er ist der Vollständigkeit halber mit aufgeführt, wird aber grau kaschiert und ist ohne eigenen Aussagekraft.

4. Ergebnisse

Im Folgenden wird die Reproduzierbarkeit des Messinstrumentes VITA Easyshade V hinsichtlich verschiedener Parameter untersucht. Anhand der Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° wurde bewertet, ob das Gerät bei mehrfacher Messung dieselben Farbkoordinaten erzeugt. Die „tatsächliche“ Zahnfarbe der Probanden und Probandinnen, welche sich aus dem Zusammenspiel der einzelnen Farbkoordinaten ergibt, hat für die folgenden Ergebnisse keine Bedeutung.

4.1. Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° im Vergleich ohne versus mit Schiene

In den Tabellen 1 bis 5 sind die über den gesamten Beobachtungszeitraum gemittelten Intraklassenkorrelationen der einzelnen Zahngruppen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° im Vergleich ohne und mit Schiene gegenübergestellt. Es wurde der Wert ohne Schiene gegen den Wert mit Schiene getestet.

Die höchsten Intraklassenkorrelationen und statistischen Signifikanzen sind grün und die niedrigsten/auffällig niedrigen Werte rot markiert. Der p-Wert gibt für jeden Test an, mit welcher Wahrscheinlichkeit die folgenden Unterhypothesen zutreffen:

- 1.1. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate L^* zwischen den Messungen ohne versus mit Schiene.“
- 1.2. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate a^* zwischen den Messungen ohne versus mit Schiene.“
- 1.3. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate b^* zwischen den Messungen ohne versus mit Schiene.“
- 1.4. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate C^* zwischen den Messungen ohne versus mit Schiene.“
- 1.5. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate h° zwischen den Messungen ohne versus mit Schiene.“

4.1.1 Farbkoordinate L*

Jede der folgenden Tabellen widmet sich der Beantwortung einer Unterhypothese.

Tab.1: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate L* im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst

| Zähne | Schiene | ICC individual | p-Wert |
|--------|---------|----------------|--------|
| 11, 21 | Nein | 0,977 | <0,001 |
| 11, 21 | Ja | 0,990 | |
| 12, 22 | Nein | 0,980 | <0,001 |
| 12, 22 | Ja | 0,985 | |
| 13, 23 | Nein | 0,972 | 0,998 |
| 13, 23 | Ja | 0,966 | |
| 31, 41 | Nein | 0,969 | <0,001 |
| 31, 41 | Ja | 0,975 | |
| 32, 42 | Nein | 0,974 | 0,727 |
| 32, 42 | Ja | 0,973 | |
| 33, 43 | Nein | 0,978 | 0,997 |
| 33, 43 | Ja | 0,974 | |

Der Vergleich der Intraklassenkorrelationen der Messungen ohne Schiene versus mit Schiene der Farbkoordinate L* kann der Tabelle 1 entnommen werden. Bei durchgehend hohen ICCs stellt sich im Bereich der Oberkieferfrontzähne 12-22 sowie der Unterkiefer-Einser (31, 41) die Messung mit Schiene als signifikant besser dar ($p < 0,001$).

4.1.2 Farbkoordinate a*

Tab. 2: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate a* im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst

| Zähne | Schiene | ICC individual | p-Wert |
|--------|---------|----------------|--------|
| 11, 21 | Nein | 0,975 | <0,001 |
| 11, 21 | Ja | 0,990 | |
| 12, 22 | Nein | 0,980 | <0,001 |
| 12, 22 | Ja | 0,987 | |
| 13, 23 | Nein | 0,979 | <0,001 |
| 13, 23 | Ja | 0,987 | |
| 31, 41 | Nein | 0,967 | 0,273 |
| 31, 41 | Ja | 0,968 | |
| 32, 42 | Nein | 0,962 | 0,967 |
| 32, 42 | Ja | 0,958 | |
| 33, 43 | Nein | 0,958 | <0,001 |
| 33, 43 | Ja | 0,980 | |

Für die Farbkoordinate a* ergeben sich signifikant höhere ICCs ($p < 0,001$) mit Schiene versus ohne Schiene bei allen gemessenen Oberkieferzähnen (13-23) sowie den Unterkieferzähnen (Tabelle 2). Sowohl ohne als auch mit Schiene zeigen die Unterkieferfrontzähne 32-42 etwas niedrigere ICCs als die übrigen gemessenen Zähne.

4.1.3 Farbkoordinate b*

Tab. 3: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate b* im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst

| Zähne | Schiene | ICC | p-Wert |
|--------|---------|--------------|--------|
| 11, 21 | Nein | 0,976 | <0,001 |
| 11, 21 | Ja | 0,991 | |
| 12, 22 | Nein | 0,985 | <0,001 |
| 12, 22 | Ja | 0,988 | |
| 13, 23 | Nein | 0,984 | 1,000 |
| 13, 23 | Ja | 0,979 | |
| 31, 41 | Nein | 0,976 | <0,001 |
| 31, 41 | Ja | 0,984 | |
| 32, 42 | Nein | 0,972 | <0,001 |
| 32, 42 | Ja | 0,981 | |
| 33, 43 | Nein | 0,978 | <0,001 |
| 33, 43 | Ja | 0,986 | |

Für die Farbkoordinate b* zeigt sich eine Signifikanz mit einem p-Wert von $p < 0,001$ für alle gemessenen Zähne außer 13 und 23 (Tabelle 3). Die Messungen der Oberkiefereckzähne mit Schiene erweisen sich nicht als signifikant besser als ohne Schiene. Die ICCs ohne Schiene berechneten sich sogar höher als mit Schiene.

4.1.4 Farbkoordinate C*

Tab. 4: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate C* im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst

| Zähne | Schiene | ICC | p-Wert |
|--------|---------|--------------|--------|
| 11, 21 | Nein | 0,976 | <0,001 |
| 11, 21 | Ja | 0,991 | |
| 12, 22 | Nein | 0,986 | 0,004 |
| 12, 22 | Ja | 0,988 | |
| 13, 23 | Nein | 0,984 | 1,000 |
| 13, 23 | Ja | 0,979 | |
| 31, 41 | Nein | 0,976 | <0,001 |
| 31, 41 | Ja | 0,984 | |
| 32, 42 | Nein | 0,972 | <0,001 |
| 32, 42 | Ja | 0,980 | |
| 33, 43 | Nein | 0,978 | <0,001 |
| 33, 43 | Ja | 0,986 | |

Für die Farbkoordinate C* ergeben sich für alle gemessenen Zähne mit Ausnahme der Oberkiefereckzähne signifikant höhere ICCs bei der Messung mit Schiene versus ohne Schiene (Tabelle 4).

4.1.5 Farbkoordinate h°

Tab. 5: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate h° im Vergleich ohne versus mit Schiene über alle Zeitpunkte zusammengefasst

| Zähne | Schiene | ICC | p-Wert |
|--------|---------|--------------|--------|
| 11, 21 | Nein | 0,973 | <0,001 |
| 11, 21 | Ja | 0,988 | |
| 12, 22 | Nein | 0,970 | <0,001 |
| 12, 22 | Ja | 0,985 | |
| 13, 23 | Nein | 0,971 | 0,154 |
| 13, 23 | Ja | 0,972 | |
| 31, 41 | Nein | 0,968 | <0,001 |
| 31, 41 | Ja | 0,975 | |
| 32, 42 | Nein | 0,963 | <0,001 |
| 32, 42 | Ja | 0,971 | |
| 33, 43 | Nein | 0,950 | <0,001 |
| 33,43 | Ja | 0,977 | |

Mit Ausnahme der Oberkiefer Eckzähne errechneten sich zu den übrigen gemessenen Zähnen auch für die Farbkoordinate h° signifikant höhere Reproduzierbarkeit bei der Messung mit Schiene ($p < 0,001$) (Tabelle 5).

4.1.6 Signifikanzen im Vergleich ohne versus mit Schiene

Aus den Tabellen 1 bis 5 geht hervor, dass für alle untersuchten Farbkoordinaten sowohl bei der Messung mit als auch der Messung ohne Schiene durchgehend hohe ICCs erzielt wurden. Überwiegend zeigt die Messung mit Schiene eine signifikant höhere Reproduzierbarkeit als ohne die Schiene. Unterschiede ergeben sich zu den einzelnen Zahngruppen. Für die Oberkieferschneidezähne (12-22) errechnet sich eine signifikant höhere Reproduzierbarkeit im Vergleich ohne versus mit Schiene mit einem p-Wert von $< 0,001$ über alle Koordinaten hinweg, sprich L^* , a^* , b^* , C^* und h° . In den Koordinaten b^* , C^* und h° liegt auch für alle untersuchten Unterkieferzähne eine Signifikanz von $p < 0,001$ vor.

Bei den Oberkiefer Eckzähnen hingegen weisen alle Farbkoordinaten mit Ausnahme der Farbkoordinate a^* einen p-Wert oberhalb des Signifikanzniveaus auf ($p > 0,01$). Die p-Werte der Farbkoordinaten L^* und a^* für die seitlichen unteren Schneidezähne liegen ebenfalls oberhalb des Signifikanzniveaus von 0,01.

4.2. Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zu den Zahngruppen

Im Folgenden werden nur noch die Messwerte mit Schiene betrachtet und dabei die zweite Nullhypothese geprüft: „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei den Messungen verschiedener Zahngruppen.“

4.2.1 Tabellen zu den Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen

Jede der folgenden Tabellen (Tabellen 6 bis 10) repräsentiert eine Farbkoordinate. Die über alle Zeitpunkte gemittelten und damit nur noch von der Zahngruppe abhängigen Intraklassenkorrelationen ergeben sich aus den Rändern der Tabelle (ICC Zähne). Der Vollständigkeit halber sind auch die Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ für die einzelnen Zahngruppen angegeben, um das Zustandekommen der interessierenden Werte nachvollziehen zu können. Höchstwerte sind grün, stark abweichende und niedrige Werte rot hervorgehoben.

Tab. 6: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate L^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten $t(0)$ - $t(7)$ mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) | ICC Zähne |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 11,21 | 0,991 | 0,991 | 0,987 | 0,994 | 0,994 | 0,990 | 0,977 | 0,990 | 0,991 |
| 12,22 | 0,973 | 0,989 | 0,990 | 0,991 | 0,989 | 0,975 | 0,958 | 0,980 | 0,985 |
| 13,23 | 0,980 | 0,978 | 0,974 | 0,982 | 0,989 | 0,935 | 0,797 | 0,942 | 0,966 |
| 31,41 | 0,975 | 0,976 | 0,975 | 0,983 | 0,981 | 0,969 | 0,924 | 0,976 | 0,975 |
| 32,42 | 0,979 | 0,980 | 0,976 | 0,971 | 0,979 | 0,974 | 0,921 | 0,966 | 0,973 |
| 33,43 | 0,977 | 0,974 | 0,978 | 0,954 | 0,978 | 0,968 | 0,955 | 0,972 | 0,974 |

Tab. 7: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate a* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) | ICC Zähne |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 11,21 | 0,994 | 0,994 | 0,991 | 0,992 | 0,975 | 0,983 | 0,973 | 0,990 | 0,990 |
| 12,22 | 0,984 | 0,982 | 0,990 | 0,990 | 0,987 | 0,961 | 0,982 | 0,984 | 0,987 |
| 13,23 | 0,975 | 0,978 | 0,986 | 0,983 | 0,986 | 0,976 | 0,974 | 0,949 | 0,987 |
| 31,41 | 0,973 | 0,938 | 0,982 | 0,973 | 0,979 | 0,944 | 0,953 | 0,978 | 0,968 |
| 32,42 | 0,964 | 0,971 | 0,966 | 0,977 | 0,837 | 0,959 | 0,950 | 0,961 | 0,958 |
| 33,43 | 0,977 | 0,975 | 0,975 | 0,983 | 0,977 | 0,976 | 0,965 | 0,929 | 0,980 |

Tab. 8: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate b* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) | ICC Zähne |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 11,21 | 0,993 | 0,991 | 0,990 | 0,992 | 0,990 | 0,985 | 0,976 | 0,990 | 0,991 |
| 12,22 | 0,976 | 0,991 | 0,991 | 0,993 | 0,981 | 0,974 | 0,975 | 0,985 | 0,987 |
| 13,23 | 0,972 | 0,970 | 0,970 | 0,986 | 0,980 | 0,961 | 0,942 | 0,957 | 0,979 |
| 31,41 | 0,983 | 0,984 | 0,987 | 0,980 | 0,983 | 0,975 | 0,984 | 0,984 | 0,984 |
| 32,42 | 0,983 | 0,988 | 0,982 | 0,961 | 0,957 | 0,981 | 0,980 | 0,982 | 0,981 |
| 33,43 | 0,978 | 0,982 | 0,982 | 0,983 | 0,981 | 0,984 | 0,983 | 0,972 | 0,986 |

Tab. 9: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate C* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) | ICC Zähne |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 11,21 | 0,993 | 0,991 | 0,990 | 0,992 | 0,990 | 0,985 | 0,976 | 0,990 | 0,991 |
| 12,22 | 0,976 | 0,991 | 0,991 | 0,993 | 0,980 | 0,974 | 0,975 | 0,986 | 0,987 |
| 13,23 | 0,972 | 0,970 | 0,970 | 0,986 | 0,980 | 0,960 | 0,942 | 0,958 | 0,979 |
| 31,41 | 0,983 | 0,984 | 0,986 | 0,981 | 0,983 | 0,973 | 0,984 | 0,984 | 0,984 |
| 32,42 | 0,982 | 0,988 | 0,982 | 0,960 | 0,953 | 0,981 | 0,980 | 0,982 | 0,980 |
| 33,43 | 0,978 | 0,982 | 0,982 | 0,983 | 0,981 | 0,984 | 0,983 | 0,972 | 0,986 |

Tab. 10: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate h° der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Zahngruppen unabhängig vom Termin

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) | ICC Zähne |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| 11,21 | 0,991 | 0,989 | 0,989 | 0,991 | 0,983 | 0,984 | 0,971 | 0,989 | 0,988 |
| 12,22 | 0,984 | 0,984 | 0,990 | 0,991 | 0,985 | 0,996 | 0,977 | 0,969 | 0,984 |
| 13,23 | 0,977 | 0,978 | 0,986 | 0,986 | 0,982 | 0,973 | 0,935 | 0,856 | 0,972 |
| 31,41 | 0,974 | 0,949 | 0,983 | 0,974 | 0,980 | 0,969 | 0,966 | 0,977 | 0,975 |
| 32,42 | 0,971 | 0,973 | 0,971 | 0,981 | 0,942 | 0,972 | 0,953 | 0,964 | 0,971 |
| 33,43 | 0,975 | 0,965 | 0,973 | 0,979 | 0,973 | 0,975 | 0,962 | 0,934 | 0,977 |

Aus den Tabellen 6 bis 10 geht hervor, dass bis auf wenige Ausreißer durchweg relativ hohe Intraklassenkorrelationen ermittelt wurden, allerdings mit - wenn auch kleineren - Unterschieden, die im Folgenden noch näher untersucht und erläutert werden. Auffällig ist, dass die höchste Intraklassenkorrelation unabhängig vom Termin in jeder Koordinate bei den mittleren Oberkieferfrontzähnen zu finden ist. Die niedrigsten Intraklassenkorrelationen unabhängig vom Termin finden sich sowohl bei den Oberkieferreckszähnen als auch bei den seitlichen unteren Schneidezähnen.

4.2.2 Graphische Darstellung

In den folgenden Abbildungen 4 bis 8 werden die Ränder der obigen Tabellen 6-10 „ICC Zähne“ zur besseren Veranschaulichung dessen, dass eine Abhängigkeit der Reproduzierbarkeit von der gemessenen Zahngruppe besteht, grafisch dargestellt. Abgebildet wird die errechnete Intraklassenkorrelation (y-Achse) für die jeweilige Zahngruppe (x-Achse) sowie das zugehörige 95%-Konfidenzintervall. Es ist zu beachten, dass sich die Skalierung der y-Achse in den Grafiken unterscheidet.

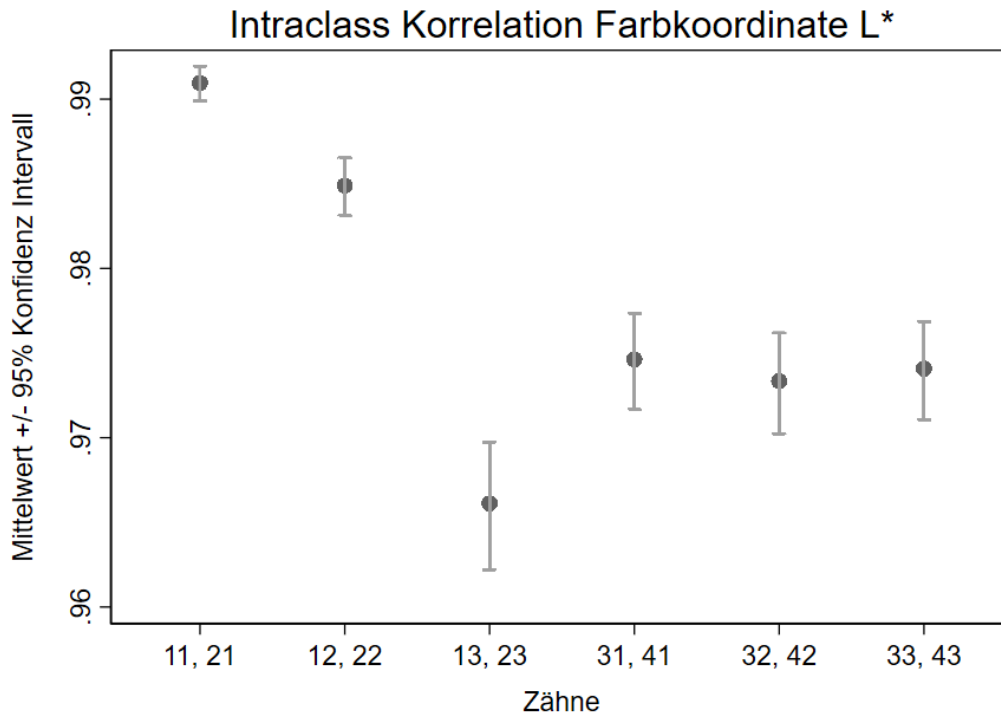


Abb. 4: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate L*

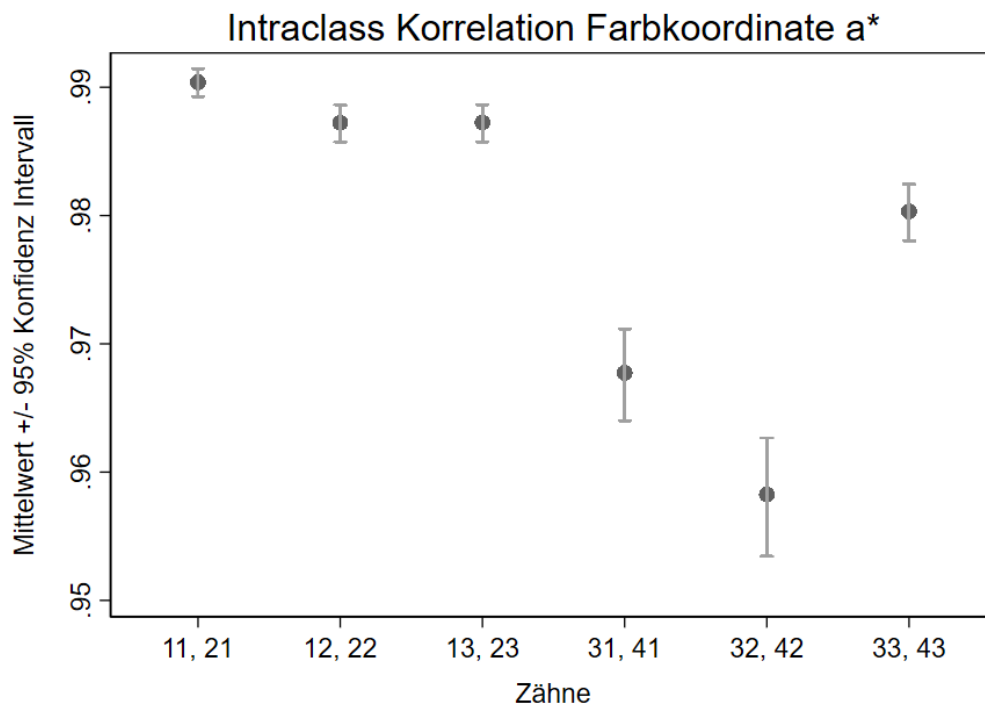


Abb. 5: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate a*

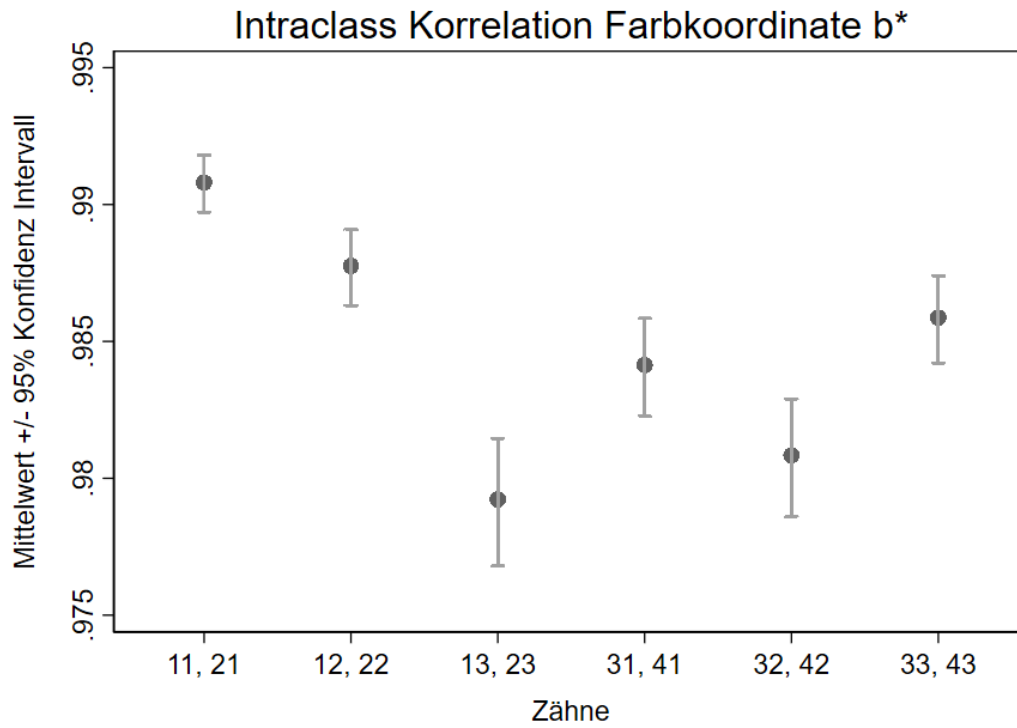


Abb. 6: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate b*

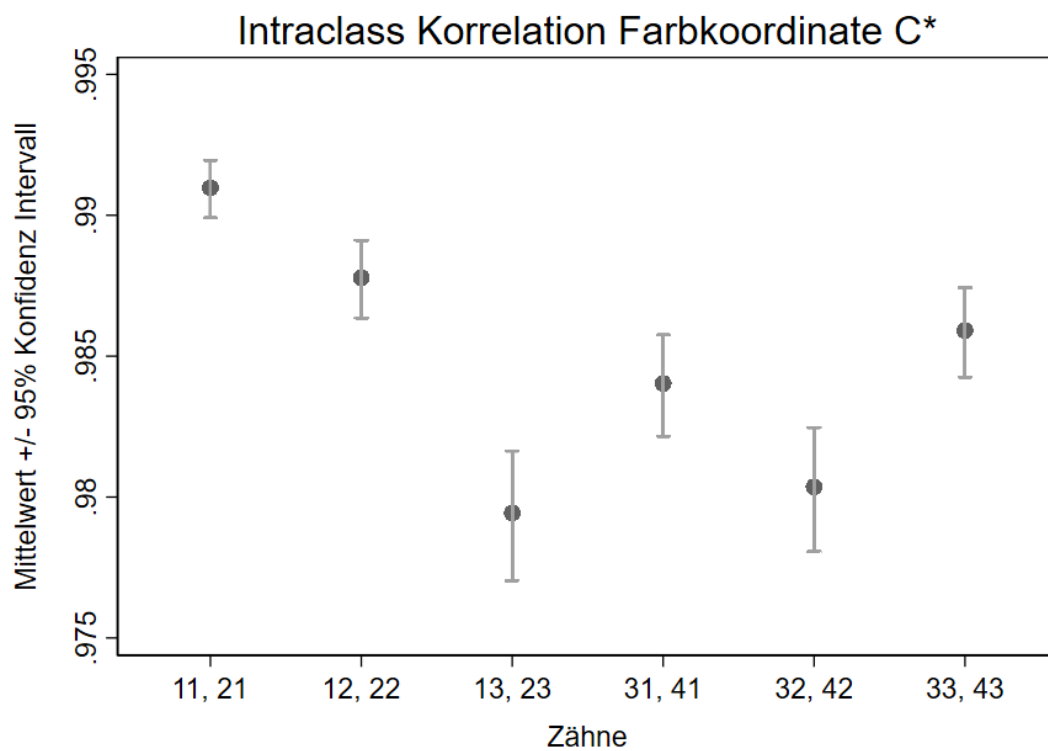


Abb. 7: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate C*

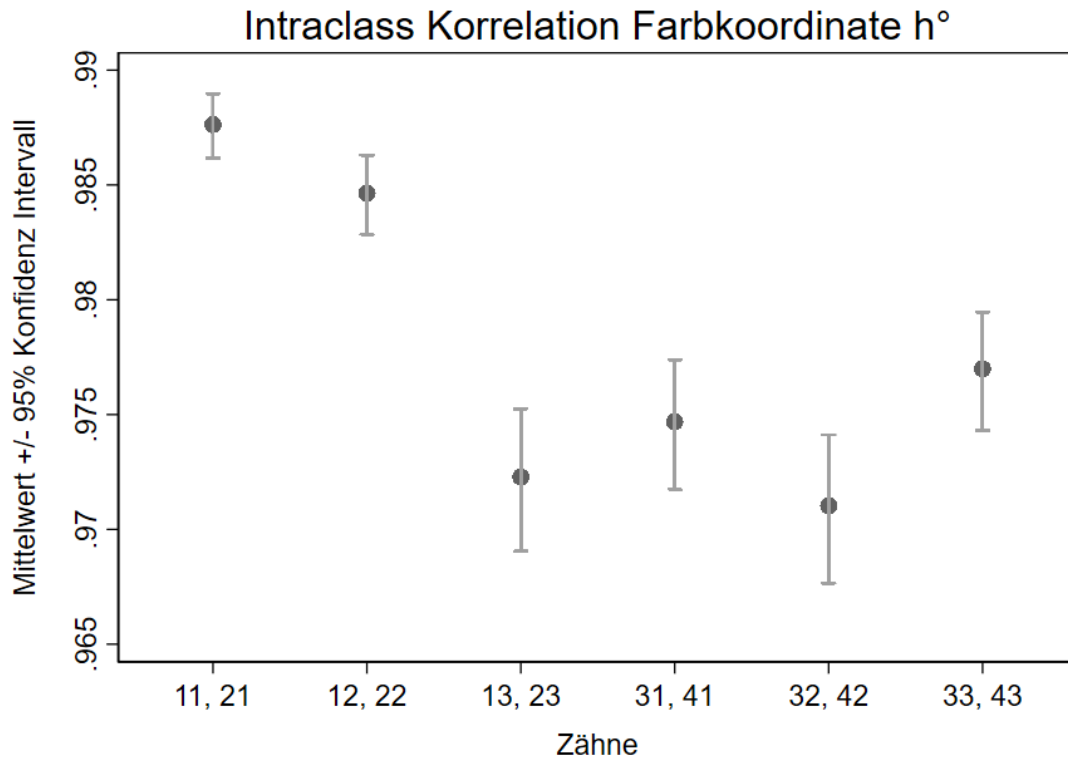


Abb. 8: Intraklassenkorrelationen der Zahngruppen für die Farbkoordinate h°

Bei Betrachtung aller Grafiken fällt auf, dass die Koordinaten L^* , b^* , C^* und h° ein ähnliches Bild darstellen. Die Zähne 11, 21 zeigen jeweils die höchste ICC mit dem kleinsten Konfidenzintervall und die oberen Eckzähne besitzen die geringste ICC in den Koordinaten L^* , b^* , C^* mit einem deutlich größeren Konfidenzintervall (Ausnahme Farbkoordinate h° Zähne 32, 42). Der gedachte Verlauf einer Verbindungslinie erinnert in den Koordinaten b^* , C^* und h° an ein asymmetrisches „W“. Die ICC nimmt von den oberen mittleren Schneidezähnen über die seitlichen Schneidezähne zu den Eckzähnen ab, steigt für die mittleren unteren Schneidezähne, sinkt bei den seitlichen Schneidezähnen und steigt erneut circa auf die Höhe der Zähne 31, 41 für die Zähne 33, 43. In der Farbkoordinate a^* erreichen die oberen Eckzähne einen vergleichbar hohen Wert wie die Oberkieferfrontzähne, somit unterscheidet sich a^* von dem Bild der anderen Koordinaten grundlegend. Alle oberen Zähne zeigen hier einen höheren ICC im Vergleich zu den Unterkieferzähnen.

4.2.3 Signifikanzen

Um nun zu prüfen, ob die Unterschiede in den ICCs zufällig zustande gekommen sind oder sich statistisch signifikant darstellen, folgen die Ergebnisse des t-Tests, also die p-Werte. Die Werte, die für die Berechnungen herangezogen wurden, ergeben sich aus den Rändern der Tabellen 6 bis 10 und sind in den Abbildungen 4 bis 8 grafisch aufgezeigt. Untersucht wird, ob

die einzelnen Zahngruppen sich signifikant in ihren ICCs unterscheiden. Dafür wurde die Intraklassenkorrelation einer Zahngruppe als Referenz im Vergleich zu den ICCs der übrigen Gruppen untersucht. Für die klare statistische Aufbereitung wurde die aufgestellte Nullhypothese in die folgenden Hypothesen untergliedert:

- 2.1. „Es gibt keinen Unterschied zwischen den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei der Messung der oberen mittleren Schneidezähne im Vergleich zu denjenigen der übrigen gemessenen Zahngruppen.“
- 2.2. „Es gibt keinen Unterschied zwischen den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei der Messung der oberen lateralen Schneidezähne im Vergleich zu denjenigen der übrigen gemessenen Zahngruppen.“
- 2.3. „Es gibt keinen Unterschied zwischen den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei der Messung der oberen Eckzähne im Vergleich zu denjenigen der übrigen gemessenen Zahngruppen.“
- 2.4. „Es gibt keinen Unterschied zwischen den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei der Messung der unteren mittleren Schneidezähne im Vergleich zu denjenigen der übrigen gemessenen Zahngruppen.“
- 2.5. „Es gibt keinen Unterschied zwischen den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei der Messung der unteren lateralen Schneidezähne im Vergleich zu denjenigen der übrigen gemessenen Zahngruppen.“
- 2.6. „Es gibt keinen Unterschied zwischen den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei der Messung der unteren Eckzähne im Vergleich zu denjenigen der übrigen gemessenen Zahngruppen.“

Bei dem Test, in dem die Referenzzahngruppen mit sich selber getestet werden, erhalten wir immer einen Wert von 1,000, welcher grau kaschiert wird. Alle Werte, welche sich als signifikant darstellen, werden mit der Farbe grün hervorgehoben.

In der Tabelle 11 werden die Werte der Zähne 11, 21 mit denjenigen der anderen Zahngruppen verglichen.

Tab. 11: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L*, a*, b*, C*, h° mit den Zähnen 11, 21 als Referenz

| Zähne | p_L* | p_a* | p_b* | p_C* | p_h° |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 11, 21 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 12, 22 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 13, 23 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 31, 41 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 32, 42 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 33, 43 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |

Hier ergibt sich, dass die Zähne 11, 21 signifikant höhere Werte im Vergleich zu den übrigen Zahngruppen aufweisen. Der p-Wert beträgt für alle Koordinaten bei allen Zahngruppen, außer sich selbst, <0,001. Die Nullhypothese 2.1. muss somit abgelehnt werden. Konform dazu zeigen die Tabellen 12 bis 16 bei dem Test gegen die Zähne 11, 21 einen p-Wert von 1,000. In der weiteren Beschreibung der Ergebnisse wird somit davon abgesehen, die p-Werte im Bezug zu den Zähnen 11, 21 zu beschreiben.

Tabelle 12 setzt die Zähne 12, 22 zu den anderen Zahngruppen in Bezug.

Tab. 12: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L*, a*, b*, C*, h° mit den Zähnen 12, 22 als Referenz

| Zähne | p_L* | p_a* | p_b* | p_C* | p_h° |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 11, 21 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 12, 22 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 13, 23 | <0,001 | 0,651 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 31, 41 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 32, 42 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 33, 43 | <0,001 | <0,001 | 0,065 | 0,063 | <0,001 |

Aus der Tabelle 12 geht hervor, dass die Zähne 12, 22 mit $p < 0,001$ fast durchgehend signifikant höhere Intraklassenkorrelationen im Vergleich zu den Zahngruppen 13, 23; 31, 41; 32, 42 sowie 33, 43 aufweisen. Deutlich außerhalb des Signifikanzniveaus zeigt sich nur der Wert 0,651 für die Zähne 13, 23 in der Koordinate a*, und für die Koordinaten b* und C* finden wir bei den Zähnen 33, 43 knapp nicht signifikante Werte von 0,065 und 0,063. Somit trifft auch (abgesehen von den erwähnten Ausnahmen) die Nullhypothese 2.2. nicht zu.

Für die oberen Eckzähne gehen die Signifikanzen aus der Tabelle 13 hervor.

Tab. 13: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 13, 23 als Referenz

| Zähne | p_{L^*} | p_{a^*} | p_{b^*} | p_{C^*} | p_{h° |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 11, 21 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 12, 22 | 1,000 | 0,344 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 13, 23 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 31, 41 | 1,000 | <0,001 | 1,000 | 1,000 | 0,943 |
| 32, 42 | 1,000 | <0,001 | 0,919 | 0,788 | 0,217 |
| 33, 43 | 1,000 | <0,001 | 1,000 | 1,000 | 0,999 |

Für die oberen Eckzähne ergibt sich ausschließlich eine Signifikanz innerhalb der Farbkoordinate a^* im Vergleich zu den untersuchten Unterkieferzähnen (Tabelle 13). Abgesehen von dieser Farbkoordinate ist somit die Nullhypothese 2.3. für den Vergleich der oberen Eckzähne mit den untersuchten Unterkieferzähnen zu verwerfen.

Referenzzahngruppe der Tabelle 14 sind die mittleren Unterkieferinzisivi.

Tab. 14: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 31, 41 als Referenz

| Zähne | p_{L^*} | p_{a^*} | p_{b^*} | p_{C^*} | p_{h° |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 11, 21 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 12, 22 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 13, 23 | <0,001 | 1,000 | <0,001 | <0,001 | 0,053 |
| 31, 41 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 32, 42 | 0,191 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | 0,008 |
| 33, 43 | 0,352 | 1,000 | 0,977 | 0,984 | 0,951 |

Für die mittleren Unterkieferinzisivi finden wir p-Werte <0,001 für die Zähne 13, 23 in den Koordinaten L^* , b^* und C^* und für die Zähne 32, 42 in den Koordinaten a^* , b^* und C^* (Tabelle 14). Hier trifft die Nullhypothese 2.4. nicht zu.

Tabelle 15 befasst sich mit den lateralen Unterkieferschneidezähnen.

Tab. 15: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 32, 42 als Referenz

| Zähne | p_{L^*} | p_{a^*} | p_{b^*} | p_{C^*} | p_{h° |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 11, 21 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 12, 22 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 13, 23 | <0,001 | 1,000 | 0,077 | 0,207 | 0,779 |
| 31, 41 | 0,804 | 1,000 | 0,999 | 1,000 | 0,991 |
| 32, 42 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 33, 43 | 0,686 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Für die lateralen Unterkieferinzisivi ergibt sich ausschließlich ein signifikanter p-Wert <0,001 im Vergleich zu den Zähnen 13, 23 in der Farbkoordinate L^* (Tabelle 15).

In Tabelle 16 werden die Signifikanzen der Unterkiefercanini im Vergleich mit den anderen Zahngruppen aufgelistet.

Tab. 16: p-Werte zwischen den Zahngruppen zu den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* , h° mit den Zähnen 33, 43 als Referenz

| Zähne | p_{L^*} | p_{a^*} | p_{b^*} | p_{C^*} | p_{h° |
|--------|-----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| 11, 21 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |
| 12, 22 | 1,000 | 1,000 | 0,932 | 0,933 | 1,000 |
| 13, 23 | <0,001 | 1,000 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 31, 41 | 0,643 | <0,001 | 0,021 | 0,014 | 0,046 |
| 32, 42 | 0,308 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| 33, 43 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 |

Für die Unterkiefercanini finden wir signifikante Werte im Vergleich zu den Oberkieferreckszähnen und den lateralen Unterkieferfrontzähnen (32, 42). Bei den Oberkieferreckszähnen zeigt sich dies in allen Koordinaten abgesehen von der Koordinate a^* und für die lateralen Unterkieferfrontzähne ergibt es sich in allen Farbkoordinaten abgesehen von der Helligkeitskoordinate L^* (Tabelle 16). Somit muss für diese Vergleiche die Nullhypothese 2.6. verworfen werden.

4.3. Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zu den Messzeitpunkten

Analog zu den Untersuchungen unter 4.2. wird im Folgenden auf die Intraklassenkorrelationen der einzelnen Messtermine bei den Messungen mit Schiene eingegangen. Die zu untersuchende Nullhypothese lautet: „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei den Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Verlauf einer Bleaching-Behandlung.“

4.3.1 Tabellen zu den Intraklassenkorrelationen der Messtermine

In den Tabellen 17 bis 21 werden alle Werte, die zu der Entstehung des interessierenden Randes „ICC Termin“ beigetragen haben, sowie der entsprechende Rand aufgezeigt. Bis auf den Rand der Tabelle, welcher grau hinterlegt ist, sind es dieselben Werte wie unter 4.2. Die Werte „ICC Termin“ sind von den Zahngruppen unabhängig. Höchstwerte werden grün und stark abweichende sowie niedrige Werte rot hervorgehoben.

Tab. 17: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate L^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11,21 | 0,991 | 0,991 | 0,987 | 0,994 | 0,994 | 0,990 | 0,977 | 0,990 |
| 12,22 | 0,973 | 0,989 | 0,990 | 0,991 | 0,989 | 0,975 | 0,958 | 0,980 |
| 13,23 | 0,980 | 0,978 | 0,974 | 0,982 | 0,989 | 0,935 | 0,797 | 0,942 |
| 31,41 | 0,975 | 0,976 | 0,975 | 0,983 | 0,981 | 0,969 | 0,924 | 0,976 |
| 32,42 | 0,979 | 0,980 | 0,976 | 0,971 | 0,979 | 0,974 | 0,921 | 0,966 |
| 33,43 | 0,977 | 0,974 | 0,978 | 0,954 | 0,978 | 0,968 | 0,955 | 0,972 |
| ICC Termin | 0,983 | 0,985 | 0,983 | 0,982 | 0,986 | 0,969 | 0,926 | 0,972 |

Tab. 18: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate a^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11,21 | 0,994 | 0,994 | 0,991 | 0,992 | 0,975 | 0,983 | 0,973 | 0,990 |
| 12,22 | 0,984 | 0,982 | 0,990 | 0,990 | 0,987 | 0,961 | 0,982 | 0,984 |
| 13,23 | 0,975 | 0,978 | 0,986 | 0,983 | 0,986 | 0,976 | 0,974 | 0,949 |
| 31,41 | 0,973 | 0,938 | 0,982 | 0,973 | 0,979 | 0,944 | 0,953 | 0,978 |
| 32,42 | 0,964 | 0,971 | 0,966 | 0,977 | 0,837 | 0,959 | 0,950 | 0,961 |
| 33,43 | 0,977 | 0,975 | 0,975 | 0,983 | 0,977 | 0,976 | 0,965 | 0,929 |

| | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ICC Termin | 0,989 | 0,986 | 0,991 | 0,991 | 0,974 | 0,978 | 0,979 | 0,977 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Tab. 19: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate b^* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11,21 | 0,993 | 0,991 | 0,990 | 0,992 | 0,990 | 0,985 | 0,976 | 0,990 |
| 12,22 | 0,976 | 0,991 | 0,991 | 0,993 | 0,981 | 0,974 | 0,975 | 0,985 |
| 13,23 | 0,972 | 0,970 | 0,970 | 0,986 | 0,980 | 0,961 | 0,942 | 0,957 |
| 31,41 | 0,983 | 0,984 | 0,987 | 0,980 | 0,983 | 0,975 | 0,984 | 0,984 |
| 32,42 | 0,983 | 0,988 | 0,982 | 0,961 | 0,957 | 0,981 | 0,980 | 0,982 |
| 33,43 | 0,978 | 0,982 | 0,982 | 0,983 | 0,981 | 0,984 | 0,983 | 0,972 |

| | | | | | | | | |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ICC Termin | 0,988 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,986 | 0,983 | 0,981 | 0,982 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Tab. 20: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate C* der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11,21 | 0,993 | 0,991 | 0,990 | 0,992 | 0,990 | 0,985 | 0,976 | 0,990 |
| 12,22 | 0,976 | 0,991 | 0,991 | 0,993 | 0,980 | 0,974 | 0,975 | 0,986 |
| 13,23 | 0,972 | 0,970 | 0,970 | 0,986 | 0,980 | 0,960 | 0,942 | 0,958 |
| 31,41 | 0,983 | 0,984 | 0,986 | 0,981 | 0,983 | 0,973 | 0,984 | 0,984 |
| 32,42 | 0,982 | 0,988 | 0,982 | 0,960 | 0,953 | 0,981 | 0,980 | 0,982 |
| 33,43 | 0,978 | 0,982 | 0,982 | 0,983 | 0,981 | 0,984 | 0,983 | 0,972 |

| ICC Termin | 0,988 | 0,990 | 0,990 | 0,990 | 0,985 | 0,983 | 0,980 | 0,983 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Tab. 21: Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinate h° der einzelnen Zahngruppen zu den Messzeitpunkten t(0)-t(7) mit ICC der Termine unabhängig von den Zahngruppen

| Zähne | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 11,21 | 0,991 | 0,989 | 0,989 | 0,991 | 0,983 | 0,984 | 0,971 | 0,989 |
| 12,22 | 0,984 | 0,984 | 0,990 | 0,991 | 0,985 | 0,996 | 0,977 | 0,969 |
| 13,23 | 0,977 | 0,978 | 0,986 | 0,986 | 0,982 | 0,973 | 0,935 | 0,856 |
| 31,41 | 0,974 | 0,949 | 0,983 | 0,974 | 0,980 | 0,969 | 0,966 | 0,977 |
| 32,42 | 0,971 | 0,973 | 0,971 | 0,981 | 0,942 | 0,972 | 0,953 | 0,964 |
| 33,43 | 0,975 | 0,965 | 0,973 | 0,979 | 0,973 | 0,975 | 0,962 | 0,934 |

| ICC Termin | 0,989 | 0,986 | 0,991 | 0,991 | 0,984 | 0,982 | 0,975 | 0,969 |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

4.3.2 Graphische Darstellung

Analog zu den Abbildungen 4 bis 8 werden in den folgenden Abbildungen die interessierenden Werte aus den Rändern „ICC Termin“ graphisch dargestellt. Abgebildet sind die Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L*, a*, b*, C* und h° im zeitlichen Verlauf der Bleachingstudie zu den Messzeitpunkten t(0) bis t(7) mit zugehörigem 95%-Konfidenzintervall (Abb. 9 bis 13). Beachtet werden soll, dass es sich bei der Darstellung nicht mehr um

gerundete Werte handelt und es somit zu geringfügigen Abweichungen zu den Tabellen kommen kann. Auf der x-Achse sind die Termine und auf der y-Achse sind die Intraklassenkorrelationen mit zugehörigem 95%-Konfidenzintervall dargestellt. Die Skalierung der y-Achse variiert zwischen den Graphiken.

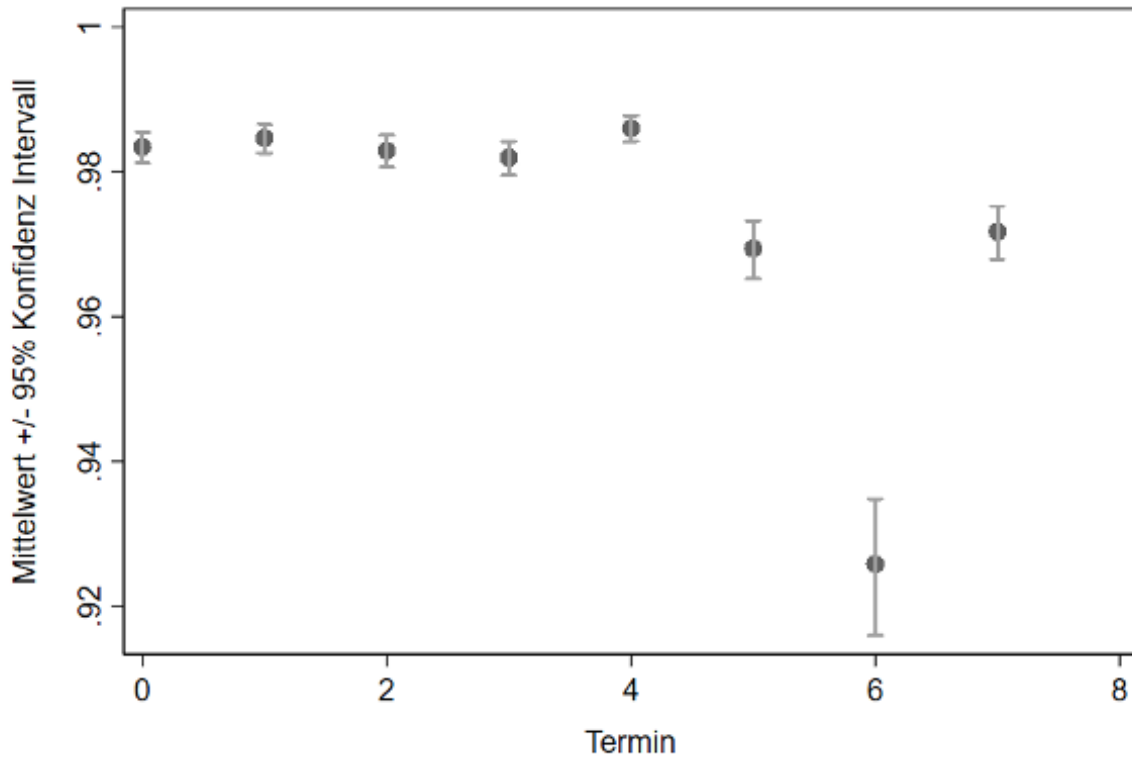


Abb. 9: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten t(0)-t(7) für die Farbkoordinate L*

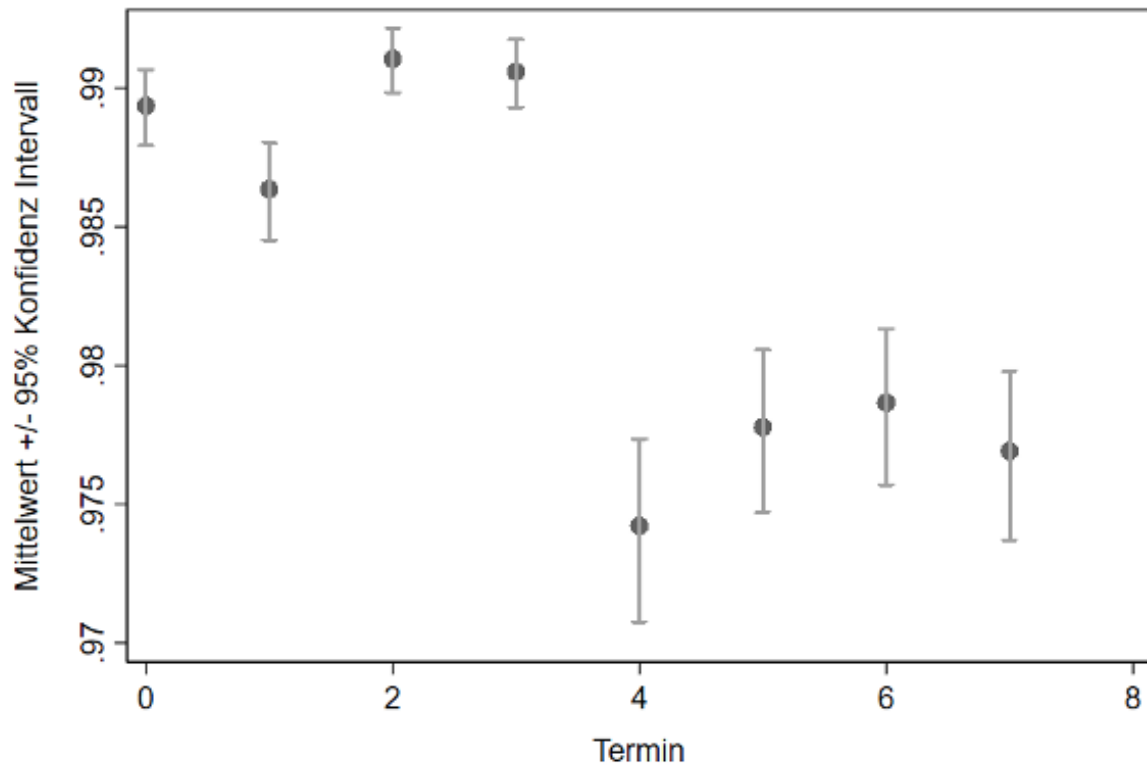


Abb. 10: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten t(0)-t(7) für die Farbkoordinate a*

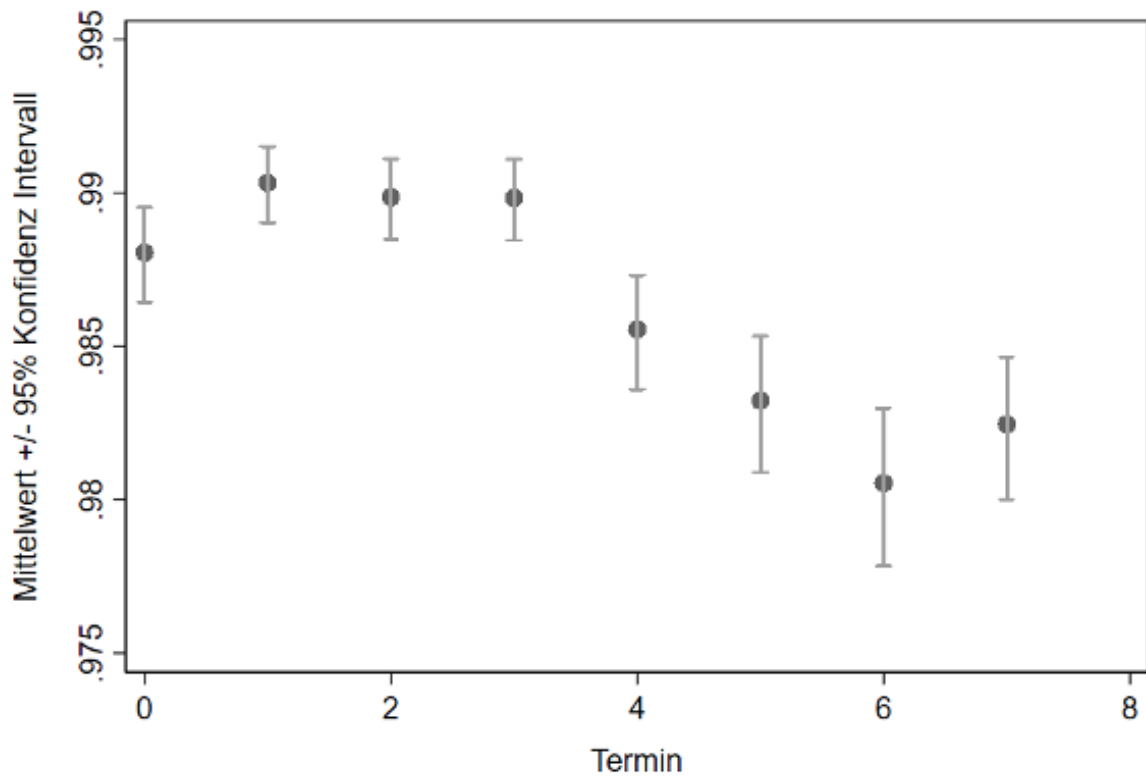


Abb. 11: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten t(0)-t(7) für die Farbkoordinate b*

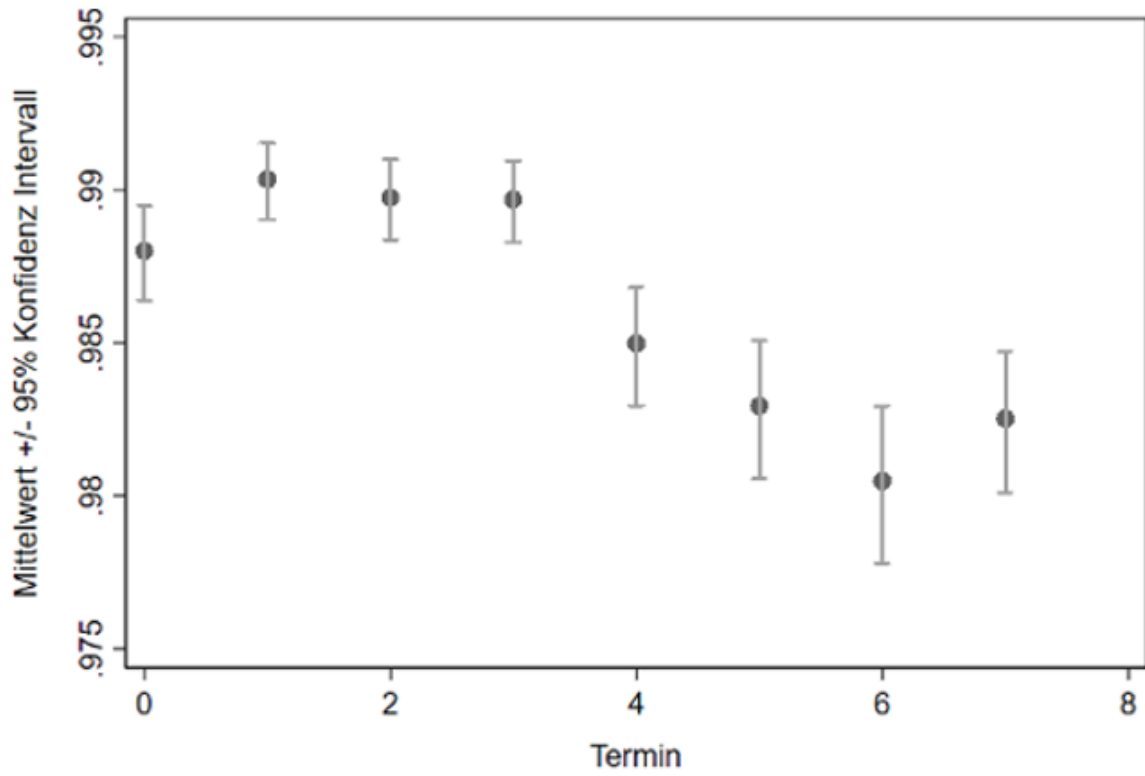


Abb. 12: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten t(0)-t(7) für die Farbkoordinate C*

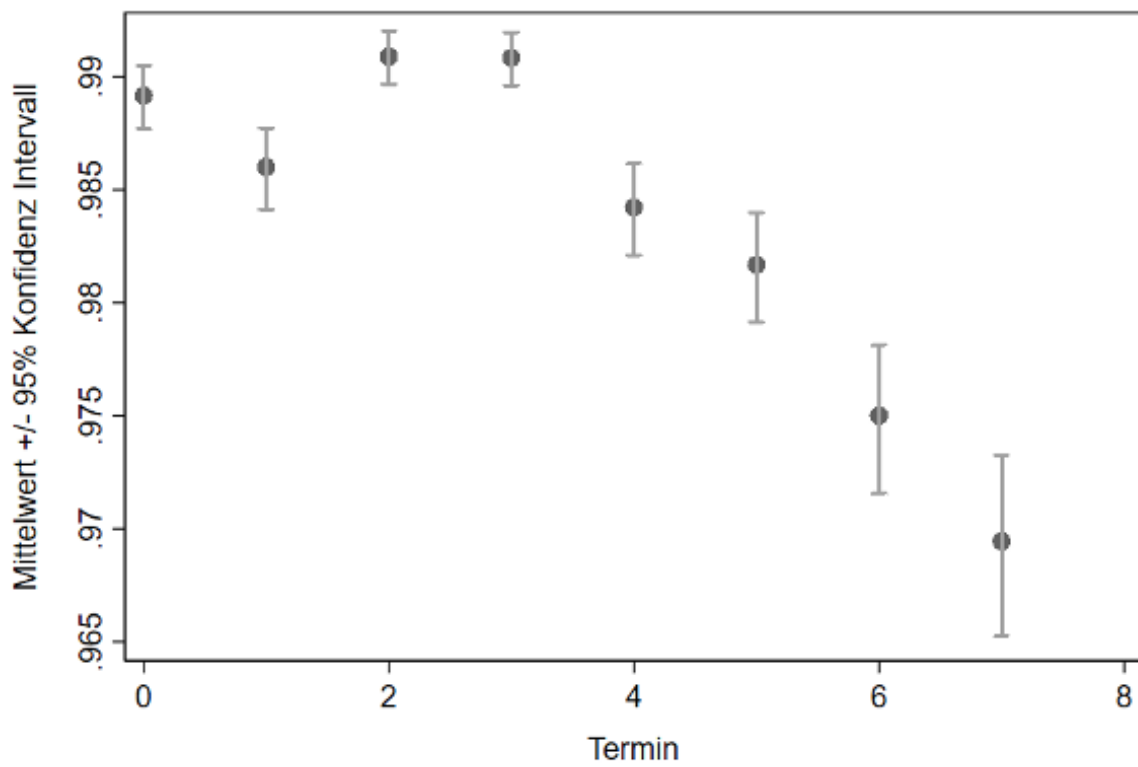


Abb. 13: Intraklassenkorrelationen zu den Zeitpunkten t(0)-t(7) für die Farbkoordinate h°

Für die Farbkoordinate L^* ist zu erkennen, dass die Intraklassenkorrelationen der Zeitpunkte $t(0)$ bis $t(4)$ sich alle circa auf derselben Höhe befinden. Davon ausgehend erscheinen die ICCs der Zeitpunkte $t(5)$ und $t(7)$ etwas niedriger. Deutlich davon weicht der Messzeitpunkt $t(6)$ ab. Wie bereits aus der Tabelle 17 hervorgeht, stellt er sich deutlich niedriger dar.

Bei Betrachtung der ICCs der Farbkoordinate a^* im Verlauf der Bleachingstudie erkennen wir zwei Gruppierungen. Eine Gruppierung ergibt sich aus den Terminen $t(0)$ - $t(3)$ und die zweite aus den Terminen $t(4)$ - $t(7)$. Die ersten vier Termine stellen sich in der Reproduzierbarkeit höher und mit einem geringeren Konfidenzintervall im Vergleich zu den folgenden vier Terminen dar.

Die Abbildungen für die Farbkoordinaten a^* , b^* , C^* und h° machen schließlich sichtbar, dass eine gewisse Abhängigkeit der Reproduzierbarkeit vom Messzeitpunkt besteht. Danach ist in den früheren Messungen im Verlauf der Bleaching-Behandlung die Reproduzierbarkeit etwas höher als in den späteren.

Grundsätzlich gilt, je höher der ICC desto kleiner das Konfidenzintervall.

Zur genaueren Betrachtung der L^* -Werte zum Zeitpunkt $t(6)$ wurden die Häufigkeitsverteilungen der Werte der Koordinate L^* für die verschiedenen Zeitpunkte untersucht. Alle Zeitpunkte zeigten sich vergleichbar. Abgebildet ist nur die Häufigkeitsverteilung zum Zeitpunkt $t(6)$ (Abb. 14). Erkennbar sind einige Ausreißer, welche jedoch auch zu den anderen Zeitpunkten nachgewiesen werden konnten. Aus der Häufigkeitsverteilung ergab sich damit keine Erklärung für den Ausreißer zum Zeitpunkt $t(6)$.

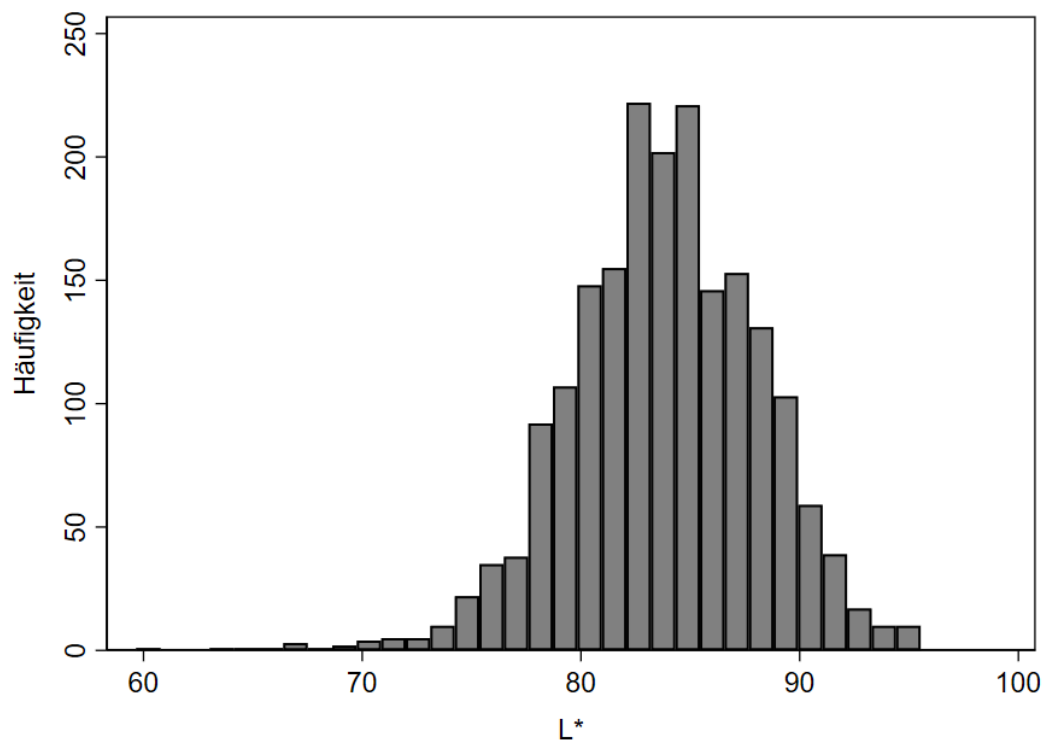


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung der Farbkoordinate L^* zum Termin $t(6)$

4.3.3 Signifikanzen

Nachfolgend gilt es nun zu prüfen, ob eine signifikante Abhängigkeit der Intraklassenkorrelationen von dem Messzeitpunkt besteht. Für die Untersuchung wird die dritte Hypothese in die folgenden acht Unterhypothesen gegliedert:

- 3.1. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zwischen dem Zeitpunkt $t(0)$ und den übrigen Messzeitpunkten.“
- 3.2. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zwischen dem Zeitpunkt $t(1)$ und den übrigen Messzeitpunkten.“
- 3.3. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zwischen dem Zeitpunkt $t(2)$ und den übrigen Messzeitpunkten.“
- 3.4. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zwischen dem Zeitpunkt $t(3)$ und den übrigen Messzeitpunkten.“
- 3.5. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zwischen dem Zeitpunkt $t(4)$ und den übrigen Messzeitpunkten.“
- 3.6. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zwischen dem Zeitpunkt $t(5)$ und den übrigen Messzeitpunkten.“
- 3.7. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zwischen dem Zeitpunkt $t(6)$ und den übrigen Messzeitpunkten.“
- 3.8. „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° zwischen dem Zeitpunkt $t(7)$ und den übrigen Messzeitpunkten.“

In den Tabellen 22 bis 29 sind die p-Werte abgebildet, die aus den Berechnungen des t-Tests mit jeweils den Intraklassenkorrelationen eines Termins als Referenz im Vergleich zu den übrigen Terminen resultierten. Die verwendeten Werte der Ränder „ICC Termin“ (siehe 4.3.) sind von den Zahngruppen unabhängig. Es ergeben sich acht Tabellen, die jeweils einen Termin als Referenz verwenden und der Beantwortung der entsprechenden Unterhypothese dienen.

Der Wert von 1,000 bei dem Test des Referenztermins mit sich selber ist grau kaschiert, und der Vollständigkeit halber mit aufgeführt. Alle Werte, welche sich als signifikant darstellen, werden mit der Farbe grün hervorgehoben.

Tab. 22: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen in den Farbkoordinaten L*, a*, b*, C* und h° mit dem Termin t(0) als Referenz

| | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|----|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| L* | 1,000 | 0,876 | 0,328 | 0,093 | 0,995 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| a* | 1,000 | <0,001 | 0,995 | 0,967 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| b* | 1,000 | 0,999 | 0,993 | 0,992 | 0,002 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| C* | 1,000 | 0,999 | 0,991 | 0,998 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| h° | 1,000 | <0,001 | 0,996 | 0,994 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |

Tab. 23: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen in den Farbkoordinaten L*, a*, b*, C* und h° mit dem Termin t(1) als Referenz

| | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|----|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| L* | 0,119 | 1,000 | 0,053 | 0,006 | 0,923 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| a* | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| b* | <0,001 | 1,000 | 0,232 | 0,222 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| C* | <0,001 | 1,000 | 0,181 | 0,156 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| h° | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,032 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |

Tab. 24: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen in den Farbkoordinaten L*, a*, b*, C* und h° mit dem Termin t(2) als Referenz

| | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|----|-------|--------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| L* | 0,666 | 0,944 | 1,000 | 0,189 | 0,999 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| a* | 0,004 | <0,001 | 1,000 | 0,216 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| b* | 0,006 | 0,763 | 1,000 | 0,485 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| C* | 0,008 | 0,814 | 1,000 | 0,459 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |
| h° | 0,004 | <0,001 | 1,000 | 0,464 | <0,001 | <0,001 | <0,001 | <0,001 |

Tab. 29: p-Werte zwischen den einzelnen Terminen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem Termin $t(7)$ als Referenz

| | t(0) | t(1) | t(2) | t(3) | t(4) | t(5) | t(6) | t(7) |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| L^* | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,114 | <0,001 | 1,000 |
| a^* | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,048 | 0,714 | 0,877 | 1,000 |
| b^* | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,998 | 0,745 | 0,060 | 1,000 |
| C^* | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,987 | 0,635 | 0,049 | 1,000 |
| h° | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 0,998 | 1,000 |

Schon bei Betrachtung der p-Werte der Tabelle 22 mit dem Referenzzeitpunkt $t(0)$ wird ersichtlich, dass sich signifikante Ergebnisse im Vergleich zu den späteren Messzeitpunkten ergeben, sodass die Nullhypothese 3.1. verworfen werden muss. Somit nimmt die Reproduzierbarkeit der spektralphotometrischen Messung nicht viel, aber doch signifikant nach einer zweiwöchigen Home-Bleaching-Behandlung ab. Dies wird durch die Vergleiche bestätigt, die in den Tabellen 22 bis 29 angegeben sind.

5. Diskussion

5.1. Methodendiskussion

Die klinische Untersuchung der vorliegenden Studie erstreckte sich über einen Zeitraum von sechs Monaten. Es nahmen 57 Probandinnen und Probanden teil, an denen jeweils 576 Einzelmessungen vorgenommen wurden. Ziel war es, die Reproduzierbarkeit der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit dem digitalen Spektralphotometer VITA Easyshade V während und nach einer zweiwöchigen Home-Bleaching-Behandlung zu evaluieren. Spektralphotometrisch gemessen wurden hierfür die oberen und unteren Frontzähne (13-23 und 33-43), für die hohe Ansprüche an die Ästhetik und damit an die Farbe gelten (100).

5.1.1 Studienteilnehmende

In der analysierten Stichprobe überwiegen Frauen mit einem Durchschnittsalter von circa 25 Jahren. Dies indiziert das Interesse dieser Bevölkerungsgruppe am Bleaching, ist aber auch Konsequenz der Probandensuche über einen Aushang am studentischen „schwarzen Brett“ in der Universitätsklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten Mainz.

Die Stichprobe führte dazu, dass sich die Studie zu eher helleren Farben verhält, denn jüngere Personen und insbesondere Frauen haben im Vergleich zu älteren Menschen in der Regel hellere Zähne (101). Ob die zugrunde liegende Farbe die Fähigkeit beeinflusst, eine hohe digitale Reproduzierbarkeit zu erreichen, ist unklar. Frühere Studien, die die Reproduzierbarkeit von digitalen Messinstrumenten untersuchten, hierfür Farbschlüssel als Untersuchungsmaterial verwendeten und somit eine weite Bandbreite an Zahnfarben abdeckten, gingen hierauf nicht ein (83, 102). Im Bereich der visuellen Zahnfarbestimmung scheinen hellere Farben höhere Reproduzierbarkeiten aufzuweisen als dunklere (83). Die vorliegende Studie beschränkt sich auf Zähne, die frei von Kronen oder Füllungen im Bereich der zu untersuchenden Zähne waren. Dieses Eingangskriterium wurde gewählt, um Verfälschungen der Messungen zu vermeiden. Vor dem aufgezeigten Hintergrund kann die Studie nicht beanspruchen, dass die Messergebnisse repräsentativ für die Gesamtbevölkerung sind. Andere Studien enthalten ähnliche Einschränkungen (103, 104).

5.1.2 Ärztliches Bleaching

Die Frage, welche Personen ein Bleaching durchführen dürfen, war lange Zeit umstritten. Die Bundeszahnärztekammer weist in ihrer Stellungnahme von 2014 (105) darauf hin, dass das Bleichen der Zähne eine Tätigkeit ist, die ausschließlich Zahnärzten und Zahnärztinnen vorbehalten ist. Ein Urteil des Oberlandesgerichts Frankfurt am Main vom 1. März 2012

(Az. 6 U 264/10) (106) verbot einer zahnmedizinischen Fachassistentin die Durchführung von Zahnreinigungen und das Bleichen von Zähnen in einem von ihr geführten "Zahnkosmetikinstitut" mit Produkten, die mehr als sechs Prozent Wasserstoffperoxid enthielten.

Nach der europäischen Verordnung 1223/2009/EG (107) gelten Zahnaufheller oder Zahnbleichmittel als Mundmittel und dürfen frei verkauft werden, sofern sie maximal 0,1% Wasserstoffperoxid enthalten oder freisetzen; erfasst sind Wasserstoffperoxid und andere Wasserstoffperoxid freisetzende Verbindungen oder Gemische, einschließlich Carbamid-Peroxid und Zinkperoxid (108). Solche Produkte können ohne Mitwirkung einer Zahnärztin oder eines Zahnarztes verwendet werden. Produkte mit einer Konzentration von mehr als 0,1% Wasserstoffperoxid gelten als medizinisch und unterliegen somit dem zahnärztlichen Vorbehalt.

Dies bedeutet, dass die erste Anwendung solcher Produkte immer einem Zahnarzt oder einer Zahnärztin vorbehalten sein oder unter seiner/ihrer direkten Aufsicht erfolgen muss. Der Patient und die Patientin kann dann die Behandlung zu Hause fortsetzen und in Ausführung der zahnärztlichen Empfehlung das gewählte Produkt anwenden (105).

5.1.3 Produkt „Phillip Zoom! DayWhite“

Für die vorliegende Studie fand das Produkt „Phillips Zoom! DayWhite“ mit einem Wasserstoffperoxidgehalt von sechs Prozent, einem pH-Wert von 7-8,5 und einer Einwirkzeit zwischen 30-90 Minuten täglich über 14 Tage Verwendung. Dieses Produkt vereinigt Verträglichkeit und Effektivität in optimaler Weise. Eine in vitro-Studie aus dem Jahr 2019 von Lilaj (109) verglich neun verschiedene Produkte, jeweils drei Produkte aus den Kategorien Home-Bleaching, In-Office-Bleaching mit einem Wasserstoffperoxidgehalt von unter sechs Prozent und In-Office-Bleaching mit einem Wasserstoffperoxidgehalt von über sechs Prozent. Es zeigte sich, dass die wirksamsten Produkte der drei Gruppen untereinander keine statistisch signifikanten Unterschiede aufwiesen. Die Studie nimmt an, dass ähnliche Aufhellungseffekte bei niedrigen H_2O_2 -Konzentrationen im Vergleich zu denen bei höheren Konzentrationen durch längere Einwirkzeiten begründet sind. Um hohe Konzentrationen zu vermeiden, sind deshalb laut der Studie Produkte mit einem niedrigen Wasserstoffperoxidgehalt in Kombination mit einem neutralen pH-Wert und relativ kurzer Einwirkdauer zur Zahnaufhellung zu empfehlen. Es zeigte sich darüber hinaus, dass bei Anwendung des Produktes „Phillips Zoom! DayWhite“ nur geringe morphologische Veränderungen der Zahnhartsubstanz festgestellt werden konnten.

Das Produkt „Phillips Zoom! DayWhite“ gewährleistete deshalb die Sicherheit der Probanden und Probandinnen bestmöglich. Die erste Bleichsitzung fand unter zahnärztlicher Aufsicht in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde Mainz statt. Die weiteren

täglichen Bleichsitzungen führten die Probandinnen und Probanden selbstständig zu Hause durch.

5.1.4 Spektralphotometer VITA Easyshade V

Ziel der Studie war es, zum einen die Qualität und Eignung des Spektralphotometers Easyshade V bei Bleachingverfahren zu untersuchen. Zum anderen sollte geprüft werden, ob die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse durch eine Positionierungsschiene beeinflusst wird, sowie weiter, ob es hier Messunterschiede zwischen verschiedenen Zahngruppen gibt.

Das Spektralphotometer VITA Easyshade hat in vorhergehenden Studien eine hohe Präzision und Genauigkeit bewiesen (93, 96, 99, 102, 110-115). Allerdings sind die vorhergehenden Studien für die vorliegende Fragestellung nur begrenzt aussagekräftig, da sie nicht im Rahmen von Bleachingverfahren durchgeführt wurden, nur einzelne Zähne aus dem Frontzahnbereich betrachteten, nur Ergebnisse *in vitro* lieferten und/oder ein anderes Modell verwendeten.

Blum et al. (116) verglichen die Präzision der neuesten Modelle der Firma VITA, das VITA Easyshade IV und das VITA Easyshade V. Sie führten zwei Messungen mit beiden Geräten (eine Messung mit Positionierungsschiene und eine Messung ohne Positionierungsschiene) an einem extrahierten mittleren rechten Schneidezahn, Zahn 11, im KaVo-Modell in einem Phantomkopf durch. Im Unterschied zu der Untersuchung von Blum et al. beruht die vorliegende Studie auf Messungen *in vivo* und an sämtlichen Frontzähnen sowohl im Ober- als auch im Unterkiefer (13-23 und 33-43) an 57 Probandinnen und Probanden und ist deshalb um ein Vielfaches aussagekräftiger.

Klotz et al. untersuchten in ihrer 2018 veröffentlichten Studie (102) spektralphotometrische Messungen mit dem VITA Easyshade 4.0 und Easyshade V sowohl im Labor als auch unter klinischen Bedingungen. An den untersuchten Shade Tabs, also Keramikpräparaten, erzielten sie exzellente Reproduzierbarkeiten und Interrater Agreements von 1.000. Unter klinischen Bedingungen waren die Zähne 12-22 an 15 Patienten und Patientinnen Gegenstand der Untersuchung. Hier ergab die Studie Interrater Agreements von ICC>0.964, was die Autoren als gut, aber etwas niedriger als *in-vitro* beschreiben.

Eine systematische Übersichtsarbeit aus dem Jahr 2022 (117) konnte eine hohe Genauigkeit von verschiedenen Spektralphotometern feststellen und konstatierte gleichzeitig, dass diese Ergebnisse für *in vivo*-Messungen nicht belastbar sind; als Fazit wird formuliert: *„To improve the quality of future research, it is suggested to perform in vivo experimental tests using larger samples and standardized protocols“* (118).

Vorliegend wurde das Spektralphotometer VITA Easyshade V im Rahmen einer grundlegenden klinischen Untersuchung aller Frontzähne einschließlich der Eckzähne mit einer Vielzahl von Patienten und einer großen Zahl von Messungen geprüft. Entscheidend ist die Messung an natürlichen Zähnen; nur hierdurch kann die Eignung des Geräts für den

praktischen Einsatz beurteilt werden. Auch sollten Daten zur Qualität eines Spektralphotometers im Rahmen einer Bleaching-Behandlung bewertet werden.

5.1.5 Durchführung der Messungen

Den Empfehlungen des Herstellers VITA (119) folgend, wurde der Sondenkopf des Spektralphotometers bei der Messung immer möglichst stabil und plan an der Zahnoberfläche angelegt. Die stabile Abstützung vermeidet Ungenauigkeiten durch kleinste Bewegungen während des Messvorgangs. Dem Probanden/der Probandin wurde erklärt, dass kleinste Bewegungen zwischen den Messungen zu Messfehlern führen können. Daher wurde stets darauf geachtet, den Kopf stabil abzustützen. Diese Maßnahmen sollten auch den Einfluss der Sitzposition auf die Messungen vermeiden. Einen solchen Einfluss auf die Bestimmung der Farbe hat Oilo (120) in seiner Studie 2010 nachgewiesen.

Die Messungen der vorliegenden Studie führte eine Person durch, die nach ausführlicher Instruktion und anschließender Testphase geübt im Handling war. Mehrmalige Testläufe waren vorausgegangen. Die Erfahrung im Umgang mit dem VITA Easyshade V dürfte deshalb keine Rolle spielen. Blum et al. (116) zeigten darüber hinaus, dass das Easyshade V auch bei unerfahrenen Benutzern gute Ergebnisse liefert.

Vor Beginn eines jeden Messdurchlaufs - gemessen wurden dabei die Zähne 13-23 und 33 - 43 des jeweiligen Probanden oder der jeweiligen Probandin jeweils dreimal mit Schiene und dreimal ohne Schiene - wurde das VITA Easyshade V kalibriert. Auf eine häufigere Kalibrierung wurde aufgrund der Ergebnisse von Olms et al. (121) verzichtet. Diese zeigten zwar, dass die höchsten Reproduzierbarkeiten bei einer Kalibrierung nach zehn Messungen im Vergleich zu Kalibrierungen nach einer oder fünf Messungen erreicht werden konnten. Dennoch spielen nach Olms et al. der Zeitpunkt und die Häufigkeit der Kalibrierung eine untergeordnete Rolle (110, 121).

5.1.6 Einsatz desselben Gerätes

Unterschiedliche Geräte führen zu unterschiedlichen Ergebnissen, auch wenn grundsätzlich eine hohe Reproduzierbarkeit von digitalen Messinstrumenten nachgewiesen wurde (5, 16, 19, 102). Studien zeigen selbst bei gleichen Geräten voneinander abweichende Messergebnisse auf (93, 96, 99, 122, 123). Zahlreiche Studien untersuchten die „Intra-“ und „Interdevice“-Reliability bzw. -Repeatability, also die Reproduzierbarkeit von Messungen innerhalb eines Gerätes bzw. die Reproduzierbarkeit von Messungen unter Verwendung verschiedener Geräte. Douglas (124), Joiner (66) und Lagouvardos et al. (96) stimmen darin überein, dass die Interdevice-Reliability geringer ist als die Intradvice-Reliability. Kim (98) zeigte in einer Untersuchung des VITA Easyshade V, dass die Farbdaten selbst mit dem

gleichen Gerät, aber mit unterschiedlichen Seriennummern nicht auf vorhersagbare Weise reproduziert werden können. Lehmann et al. (16) konnten hohe Intradvice-Repeatabilities für alle Zahnregionen erreichen, solange dasselbe Gerät verwendet wurde. Die Bestimmung der Farbe durch ein digitales Messinstrumentes ist also gerätespezifisch. Unter Berücksichtigung dieser Erkenntnisse wurden hier alle digitalen Messungen mit demselben Gerät durchgeführt.

5.1.7 Positionierungsschienen

Die jeweils verwendete Positionierungsschiene wurde aus einer transparenten weichbleibenden Folie mit einer Stärke von 2 mm hergestellt.

Eine Schiene kann helfen, nicht nur eine exakte Repositionierung im Messbereich, sondern auch eine feste senkrechte Position der Instrumentensonde zu erzielen. In vorhergehenden Studien zu Oberkieferzähnen erwies sich bereits ein Nutzen von Positionierungsschienen (115, 125). Hemming et al. (125) nutzen bei ihrer Untersuchung eine Schiene mit einer Stärke von 1 mm, während in der Studie von Fernández Millán et al. (115) eine Schiene mit einer Dicke von 4 mm verwendet wurde, um Variationen der Winkelungen zu minimieren. Bereits im Jahr 1995 stellten Leibrock et al. (126) fest, dass eine Abweichung von 4° von der senkrechten Haltung der Messsonde zu deutlichen Messfehlern führt. Eine Pilotstudie von Ontiveros et al. (127), die im Jahr 2009 durchgeführt wurde, zeigte, dass auch kleine Winkelveränderungen immer noch zu einer Variation der Daten führen. Mit der in der vorliegenden Studie verwendete Positionierungsschiene von 2 mm kommt eine Schiene mittlerer Stärke zum Einsatz.

Die transparente Ausführung der Schiene entspricht den Erkenntnissen von Santana et al. (128), die bei bunten Schienen veränderte Farbwerte festgestellt haben. Ein solcher Einfluss auf die vorliegenden Messungen sollte vermieden werden.

Da die Herstellung der Positionierungsschienen aufwändig und teuer ist, befasst sich die Studie auch mit Messungen ohne Schiene. Lehmann et al. (16) kamen in ihrer Studie zu dem Schluss, dass ohne Positionierungsschiene klinisch akzeptable Reproduzierbarkeiten in allen Bereichen des Zahnes erreicht werden.

In der vorliegenden Studie wird nicht diskutiert, welchen Einfluss eine Positionierungsschiene auf Messungen hat, bei denen der Messkopf zwischen mehrmaligen Messungen während eines Messtermins angehoben wird. Für die Dokumentation der Zahnfarbe vor und nach einer Bleaching-Behandlung ist es von Bedeutung, dieselbe Stelle an verschiedenen Messterminen zu untersuchen.

Erschwerte Messungen gab es bei einigen Studienteilnehmenden, bei denen die Unterkieferfrontzähne besonders schmal waren. Hier war es schwierig, den Messkopf nur auf den schmalen Zahn aufzusetzen und nicht auch Zahnzwischenräume und Nachbarzähne zu erfassen. So überlappten sich auch teils die Perforationen in den Positionierungsschienen. Die

Perforationen mussten abgestimmt auf den Messsondenkopf einen Durchmesser von 5 mm haben. Bei schmalere Zähnen führte das dazu, dass zwischen den jeweiligen Perforationen in der Schiene kein stabilisierender Steg mehr stehen blieb. Für solche Fälle wäre eine stärkere und/oder starre Positionierungsschiene hilfreich gewesen, um eine Angulation des Messinstrumentes zu verhindern.

5.1.8 Untersuchungsgegenstand: Der natürliche Zahn

Den Anforderungen an eine Studienteilnahme entsprechend wurden nur Messungen an unbehandelten Zähnen untersucht. Der natürliche Zahn ist polychromatisch, der optische Eindruck eines Zahnes ist nicht das Ergebnis einer einzigen Farbe, sondern eines Farbspiels. Das Gerät misst die Zahnfarbe auf einer Fläche von circa 5 mm². Diese Fläche entspricht etwa fünf Prozent der Frontfläche eines durchschnittlichen mittleren Frontzahns (129). Gemessen wurde das mittlere Drittel des Zahnes, welches Studien zufolge die Gesamtzahnfarbe des Zahnes am besten repräsentiert (130). Das inzisale Drittel ist transluzent und wird durch den Hintergrund und das zervikale Drittel durch Streustrahlung der Gingiva beeinflusst (131). Gegenstand der Untersuchung waren sämtliche Zähne in dem Frontbereich (13-23 und 33-43). Die Studie soll damit einen umfassenden Überblick zur Reproduzierbarkeit von Farbmessungen im Ober- und Unterkiefer an Schneide- und Eckzähnen geben.

5.1.9 Umgebungsfaktoren

Zu Beginn der Untersuchungsreihe fand unmittelbar vor der ersten Farbbestimmung eine professionelle Zahnreinigung statt, um extrinsische Verfärbungen und Beläge zu entfernen (132, 133). Bei jedem weiteren Termin wurde geprüft, ob die zu messenden Zähne frei von Belag waren. So sollten möglichst vergleichbare Messbedingungen über den Messzeitraum von sechs Monaten erreicht werden. Es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass geringfügige Verfärbungen der Zähne beispielsweise durch Kaffee die Reproduzierbarkeit beeinflussten.

Die Lichtverhältnisse im Untersuchungsraum betragen konstant 6500K und 1000lux (CIE-Norm Tageslichtbeleuchtungsstandard) (134), unbeschadet dessen, dass digitale Messgeräte wie das Easyshade V von der Umgebungsbeleuchtung unaffektiert bleiben sollen (79, 80). Allerdings hat sich in Studien gezeigt, dass eine Unabhängigkeit von der äußeren Beleuchtung nicht immer gegeben ist (95, 135, 136). Mit den gleichmäßigen Lichtverhältnissen sollten die vorliegenden Messungen von der Beleuchtung jedenfalls unbeeinflusst bleiben.

5.1.10 Statistische Auswertung

Die hohe Zahl der im Rahmen dieser Studie vorgenommenen Messungen liefert belastbare Daten zu der Qualität des VITA Easyshade V. Die Anzahl der Wiederholungen pro Durchlauf (mit und ohne Schiene) wurde zu Beginn mit drei Messungen pro Zahn festgelegt. Insgesamt erfolgten somit jeweils 576 einzelne photometrische Messungen an 57 Probanden und Probandinnen. Diese große Anzahl der Messungen lässt eine fundierte statistische Auswertung zur Reproduzierbarkeit zu.

Zur Untersuchung der ersten Nullhypothese wurden alle Werte, sowohl die Werte ohne als auch die Werte mit Schiene, ausgewertet. Zu den beiden weiteren Nullhypothesen sind nur noch die Werte mit Schiene in die Betrachtung einbezogen. Aus den Messungen ohne Schiene waren hierzu keine maßgeblichen weitergehenden Erkenntnisse zu erwarten.

Für die statistische Auswertung wurden Intraklassenkorrelationen verwendet (137, 138). Diverse Studien, die sich mit einer ähnlichen Fragestellung beschäftigten, griffen bereits darauf zurück (92, 103, 139, 140). So steht die vorliegende Studie in einer Folge dieser vorhergehenden Studien. Die alternativ zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit von digitalen Messgeräten in Betracht kommende „mean color difference from the mean“ (MCDM) nach Berns fand keine Berücksichtigung (81).

Ausgewertet wurden die Parameter L^* , a^* , b^* , C^* und h° . Eine Übersetzung in einen Referenzfarbschlüssel fand nicht statt, da die natürliche Zahnfarbe oftmals nicht exakt in Farbschlüsseln abgebildet ist (141-143). Um hieraus entstehende Fehler zu vermeiden, wurde auf eine Transferierung in Farbschlüsseläquivalente verzichtet.

5.1.11 Studienlage zu Bleaching und digitaler Reproduzierbarkeit

Ziel dieser Untersuchung war es, die Reproduzierbarkeit der Messungen mit dem VITA Easyshade V in vivo während und im Anschluss an eine Home-Bleaching-Behandlung zu untersuchen. Gerade für ein Bleaching ist die Verlässlichkeit von Messungen von Interesse, um den Verlauf und Erfolg der Behandlung an Hand von Messungen zu verfolgen und zu dokumentieren. Eine umfassende Studie, die die Leistung des verwendeten Messgerätes im Rahmen einer Bleaching-Behandlung untersucht, fehlt bisher.

Auffindbar ist lediglich eine 15 Jahre zurückliegende Untersuchung. Dort untersuchte Hoppe (103) im Rahmen einer in vivo-Bleaching-Behandlung die Reproduzierbarkeit von Messungen mit dem digitalen Spektralphotometer Shade Inspector® (Fa. Schütz Dental, Rosbach, Deutschland). Die Zähne wurden In-Office gebleicht; die elektronische Farbestimmung erfolgte ohne Positionierungshilfe. Untersucht wurde die Reproduzierbarkeit der Messungen zum Zeitpunkt null (vor dem Bleaching), nach 14 Tagen und nach sechs Monaten. Bei den dort untersuchten Farbparametern L^* , C^* und h° konnte eine – damals – als

gut bewertete Reproduzierbarkeit nachgewiesen werden. Zu beachten ist, dass diese Untersuchung inzwischen 15 Jahre zurückliegt und eine Verbesserung angesichts der allgemeinen technischen Fortschritte zu erwarten war. Dies sollte anhand des ausgewählten Spektralphotometers VITA Easysshade V gezeigt werden.

5.2. Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse der Studie zur Beantwortung der ersten Nullhypothese sind unter Punkt 4.1. in den Tabellen 1 bis 5 mit der Gegenüberstellung der Werte ohne versus mit Schiene und den zugehörigen p-Werten aufgelistet.

Unter den Punkten 4.2. und 4.3. sind die Ergebnisse zur zweiten und dritten Nullhypothese in den jeweiligen Tabellen dargestellt, gefolgt von einer graphischen Darstellung und Tabellen der Signifikanzen.

5.2.1 Einfluss einer Schiene auf die Reproduzierbarkeit

Aufgrund der Messergebnisse, die in den Tabellen 1 bis 5 aufgeführt sind, kann festgestellt werden, dass entgegen der ersten Nullhypothese ein Einfluss der Schiene auf die Reproduzierbarkeit besteht. Dabei ergaben sich Unterschiede zwischen den einzelnen Zahngruppen.

Die Oberkieferfrontzähne 12-22 zeigen in allen untersuchten Farbkoordinaten signifikant höhere Intraklassenkorrelationen bei der Verwendung einer Positionierungsschiene im Vergleich zur Freihandmessung.

Im Bereich der oberen Eckzähne führte eine Positionierungsschiene dagegen in allen Farbkoordinaten mit Ausnahme der Farbkoordinate a^* zu keiner signifikant höheren Reproduzierbarkeit. Bei den Oberkiefereckzähnen ließ die zentrale Positionsvorgabe aufgrund der ausgeprägten zentralen vestibulären Konvexität dieser Zähne wahrscheinlich nicht oder nicht immer eine bündige und ebene Auflage des Messkopfes zu. Dies dürfte zu einem erhöhten Kantenverlust geführt haben (68, 144). Auf Einzelheiten hierzu soll bei der Betrachtung der Zahngruppen unter Punkt 5.2.2 eingegangen werden. Die Position des Messkopfes im zweiten, freihändig durchgeführten Durchgang war nicht durch die Schiene vorgegeben und konnte - möglicherweise unbewusst - freihändig an eine Stelle der Zahnoberfläche gesetzt werden, die ein bündigeres Aufsetzen ermöglichte und damit den Kantenverlust minimierte.

Auch die Messergebnisse zu den Unterkieferfrontzähnen lassen erkennen, dass sich die Reproduzierbarkeit bei Anwendung einer Positionierungsschiene erhöht. Bei den Zähnen 31 und 41 wurden in den Koordinaten L^* , b^* , C^* und h° und bei den Zähnen 32 und 42 in den Farbkoordinaten b^* , C^* und h° Signifikanzen festgestellt. Zu den übrigen Farbkoordinaten hat sich bei den Frontzähnen im Unterkiefer keine signifikant höhere Reproduzierbarkeit ergeben. Hier könnte der positiv stabilisierende Einfluss der Schiene dadurch minimiert worden sein, dass die untersuchten Unterkieferfrontzähne teils schmaler als der Messkopf waren und sich dort die Perforationen in der Schiene überlappten. Reflexionen von Zahnzwischenräumen, der Gingiva oder der Zunge können so nicht ausgeschlossen werden. Auch bei den Eckzähnen

des Unterkiefers zeigte sich, und zwar im Gegensatz zu den Eckzähnen des Oberkiefers, ein signifikant positiver Einfluss der Schiene in den Farbkoordinaten a^* , b^* , C^* und h° .

5.2.1.1 Bisherige Studien

Bisher kamen Positionierungsschienen insbesondere zum Einsatz, um eine optimale Reposition des Messgeräts zwischen verschiedenen Messterminen zu gewährleisten (127, 145-147). Soweit sich frühere Untersuchungen mit dem Einfluss einer Positionierungsschiene auf die Messung als solche beschäftigt haben, kamen sie zu vergleichbaren Ergebnissen wie die vorliegende Studie.

Leibrock et al. (126) fanden heraus, dass Farbbestimmungen mit dem CastorTM-Farbmessgerät an Farbringzähnen oder an Zähnen von Patienten größere Schwankungen der L^* , a^* und b^* -Werte zeigten, und dass eine tiefgezogene Schiene als Justierhilfe eine einfache Möglichkeit bot, die Streuung der Messwerte zu reduzieren.

Den Einfluss verschiedener Positionierungshilfen auf die Farbbestimmung mit dem VITA Easyshade V evaluierten Santana et al. (128) in einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2024. Sie verglichen die Messungen mit blauen, rosa und transparenten Silikonmessschablonen sowie Bleachingsschienen miteinander. Als Referenz dienten die Werte der Freihandmessung. Es konnte dort kein signifikanter Unterschied in den Farbkoordinaten a^* und b^* im Vergleich der Messungen ohne und mit Schiene festgestellt werden. Es ergab sich jedoch ein positiver Effekt zur Helligkeitskoordinate L^* an den oberen zentralen Schneidezähnen, wenn eine Repositionierungshilfe verwendet wurde. Die Autoren führten diesen Helligkeitszuwachs auf die geringere Lichtstreuung bei Vorhandensein einer Schiene zurück. Die vorliegende Studie ergab keine Anhaltspunkte dafür, dass sich die Reproduzierbarkeit insbesondere bei den Messungen der Farbkoordinate L^* durch die hier verwendete durchsichtige Schiene allgemein verbessert hat. So ergab sich für die Koordinate L^* nur zu den Zähnen 11, 21 ; 12, 22 und 31, 41 eine signifikant höhere Reproduzierbarkeit mit Schiene.

Fernández Millán et al. (115) befassten sich mit der Reproduzierbarkeit an mittleren Oberkieferschneidezähnen und Oberkiefereckzähnen unter Anwendung des VITA Easyshade Compact IV. Bei ihrer Untersuchung des Zahnes 11 zeigten die Koordinaten L^* , a^* und b^* eine höhere Reproduzierbarkeit bei Verwendung einer Positionierungsschiene, während bei der Untersuchung des Zahnes 13 nur die Farbkoordinate L^* eine höhere Reproduzierbarkeit bei Verwendung einer Schiene aufwies. Für die Farbkoordinate b^* ergab sich dort kein signifikanter Effekt. Für die a^* -Koordinate stellten Fernández Millán et al. sogar fest, dass der Variationskoeffizient bei Verwendung von Positionierungshilfen im oberen Eckzahnbereich anstieg, während bei Freihandmessungen der umgekehrte Trend zu beobachten war. Dies steht im Gegensatz zu den vorliegenden Ergebnissen, wo zu den oberen Eckzähnen nur für

die Farbkoordinate a^* eine signifikant höhere Reproduzierbarkeit bei der Verwendung einer Positionierungsschiene festgestellt wurde. Die Ergebnisse stimmen mit Fernández Millán et al. allerdings insoweit überein, als bei Oberkieferfrontzähnen eine Positionierungsschiene zu höheren Reproduzierbarkeiten führt und dies bei Eckzähnen nicht grundsätzlich gilt. Bei den Oberkiefereckzähnen haben vorliegend die Freihandmessungen in den Farbkoordinaten L^* , b^* und C^* sogar höhere ICCs als die Messungen mit Schiene erzielt.

Hemming et al. (125) untersuchten 2015 ebenfalls den Einfluss von Positionierungshilfen. Sie verglichen Messungen zweier Anwender mit Jig, Positionierungsschiene und frei Hand an den mittleren Oberkieferschneidezähnen, den Oberkiefereckzähnen und -molaren. Die höchste Variabilität mit dem größten ΔE -Wert zeigte sich bei der Messung frei Hand an den Eckzähnen durch Anwender B mit einem ΔE -Wert von 6,39. Mit Schiene erreichte Anwender B einen ΔE -Wert von 2,37. Die geringste Variabilität mit ΔE von 1,59 ermittelten sie für die oberen mittleren Schneidezähne bei der Freihandmessung, allerdings ergab sich dort keine Signifikanz zu den Messungen mit Jig oder Positionierungsschiene. Die unterschiedlichen Werte erklären Hemming et al. mit der konvexen Bukkalfläche der Eckzähne im Vergleich zu denen der Molaren und Schneidezähne. Insgesamt schlussfolgerten sie, dass eine Positionierungsschiene für beide Anwender gut funktionierte. Als Nachteil von intraoralen Spektralphotometern sehen sie die Limitierung der hohen Reproduzierbarkeit auf ebene Flächen. Ein direkter Vergleich mit der vorliegenden Studie ist nicht möglich, da hier keine ΔE -Werte ermittelt wurden. Im Gegensatz zu den Ergebnissen von Hemming et al. steht jedoch, dass vorliegend eine Positionierungsschiene im Bereich der mittleren Oberkieferfrontzähne – wie im Übrigen auch bei den seitlichen oberen Schneidezähnen, die Hemming et al. nicht untersuchten - zu signifikant höheren Reproduzierbarkeiten gegenüber den Messungen frei Hand führte. Damit bestätigen die vorliegenden Ergebnisse deutlicher als die von Hemming et al. den Nutzen einer Positionierungsschiene.

5.2.1.2 Fazit

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Messungen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° mit Positionierungsschiene, und zwar im Bereich der Oberkieferfrontzähne 12 - 22 in allen Koordinaten und bei den weiteren untersuchten Zahngruppen zu jeweils einzelnen Koordinaten, reproduzierbarere Werte ergaben als die Freihandmessungen. Damit ist die erste Nullhypothese abzulehnen, welche lautet: „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen in den Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° innerhalb einer Zahngruppe bei den Messungen ohne versus mit Schiene“. Im praktischen Alltag dürfte es allerdings bei Verwendung des VITA Easyshade V ausreichen, eine digitale Farbbestimmung frei Hand durchzuführen, da die Werte durchweg eine hohe Reproduzierbarkeit von $\geq 0,95$

zeigten. So lassen sich der Aufwand und die Kosten vermeiden, die mit der Fertigung und dem Einsatz einer Schiene verbunden sind.

5.2.2 Reproduzierbarkeit bei unterschiedlichen Zahngruppen

Die zweite Nullhypothese lautet: „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei den Messungen verschiedener Zahngruppen.“ Aus den Tabellen 6 bis 10 und den Abbildungen 4 bis 8 gehen die Reproduzierbarkeiten für die einzelnen Zahngruppen bei Messungen mit Positionierungsschiene hervor. Die Intraklassenkorrelationen für die einzelnen Farbkoordinaten bewegen sich

- bei den oberen mittleren Schneidezähne von 0,988 bis 0,991,
- bei den seitlichen oberen Schneidezähnen von 0,984 bis 0,987,
- bei den Oberkiefer Eckzähnen von 0,966 bis 0,987,
- bei den mittleren Unterkieferfrontzähnen von 0,968 bis 0,984,
- bei den lateralen Unterkieferfrontzähnen von 0,958 bis 0,981 und
- bei den Unterkiefer Eckzähnen von 0,974 bis 0,986.

Die Reproduzierbarkeiten zu den einzelnen Zahngruppen sind also unterschiedlich, wenn auch nur in geringem Maße.

Die Tabellen 11 bis 16 zeigen sodann den Vergleich der Zahngruppen untereinander. Die dortigen aus den Reproduzierbarkeiten errechneten p-Werte sind zum Teil signifikant, zum Teil nicht signifikant.

5.2.2.1 Oberkieferfrontzähne

Nach den ermittelten Daten weisen die Messungen an den oberen mittleren Schneidezähnen bei Verwendung einer Positionierungsschiene signifikant höhere Intraklassenkorrelationen in allen untersuchten Farbkoordinaten als diejenigen an den übrigen gemessenen Zähnen auf. Auch die oberen seitlichen Schneidezähne zeigten überwiegend signifikante Ergebnisse im Vergleich zu den anderen Zahngruppen.

5.2.2.2 Übrige Zahngruppen

Für die übrigen Zahngruppen kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Es lassen sich lediglich einzelne Signifikanzen zu einzelnen Farbkoordinaten feststellen. So ergab sich eine Signifikanz für die oberen Eckzähne im Vergleich zu allen untersuchten Unterkieferzähnen in der Farbordinate a^* , für die mittleren unteren Schneidezähne im Vergleich zu den Zähnen 13 und 23 in den Koordinaten L^* , b^* und C^* sowie im Vergleich zu den Zähnen 32 und 42 in

den Koordinaten a^* , b^* und C^* . Für die lateralen unteren Schneidezähne errechnete sich nur eine Signifikanz im Vergleich zu den Zähnen 13 und 23 in der Koordinate L^* . Die Unterkiefereckzähne zeigten signifikant höhere ICCs im Vergleich zu den Zähnen 13 und 23 in den Koordinaten L^* , b^* , C^* und h° , im Vergleich zu den Zähnen 31 und 41 in der Koordinate a^* und im Vergleich zu den Zähnen 32 und 42 in den Koordinaten a^* , b^* , C^* und h° .

Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Oberkiefereckzähne und die seitlichen unteren Schneidezähne bei Verwendung einer Positionierungsschiene am schwierigsten zu messen sind; hier gab es die wenigsten Signifikanzen. Bei den unteren Eckzähnen war die Reproduzierbarkeit tendenziell höher als bei den oberen Eckzähnen. Die mittleren unteren Schneidezähne zeigten etwas höhere ICCs als die seitlichen unteren Schneidezähne. In diesen Ergebnisse spiegelt sich der zur ersten Nullhypothese ermittelte positive stabilisierende Effekt der Positionierungsschiene bei den Frontzähnen im Oberkiefer und an den unteren Eckzähnen wieder.

5.2.2.3 Erklärungsansätze für unterschiedliche Reproduzierbarkeiten bei den Zahngruppen

Die Unterschiede in der Reproduzierbarkeit zwischen den verschiedenen Zahngruppen könnten darauf zurückzuführen sein, dass die Messungen während einer Bleichbehandlung durchgeführt wurden und die damit einhergehende Farbveränderung die Reproduzierbarkeit beeinflusst hat. So wurden die größten ΔE -Werte nach einer Bleaching-Behandlung in der Studie von Bayadse (146) an Oberkiefereckzähnen ermittelt, für die sich in der vorliegenden Studie eine Signifikanz lediglich zu den untersuchten Unterkieferzähnen in der Farbkoordinate a^* ergeben hat. Auf die Reproduzierbarkeit zu den verschiedenen Messterminen soll unter Punkt 5.2.3 noch eingegangen werden.

Auch die besonders hohe Qualität des VITA Easyshade V könnte eine Ursache sein. Unterschiedliche Messergebnisse könnten durch Schwierigkeiten einer stabilen Fixierung in Verbindung mit kleinsten menschlichen Bewegungen bedingt sein. Diese sind umso ausgeprägter, je schwieriger eine stabile Fixierung der Messsonde auf dem Zahn ist. Unterstellt man auch nur minimale Bewegungen, wird ein gutes Messgerät bei Messungen an polychromen Zähnen aufgrund der Veränderung des Messpunkts keine identischen Ergebnisse liefern. Eine Studie aus dem Jahr 2015 von Hemming al. (125) führte Farbmessungen an typodont-Zähnen und extrahierten Zähnen durch; bei der Farbmessung an typodont-Zähnen zeigten sich geringere Variationen als bei natürlichen extrahierten Zähnen. In einer Untersuchung des VITA Easyshade Advance 4.0 von Knezović et al. (111) bewegten sich die Intraklassenkorrelationen für die in vivo-Messungen an dem Zahn 11 zwischen 0,858 und 0,971 und für in vitro-Messungen an Vitapan-Zähnen von 0,992 bis 0,994.

Dies unterstreicht die erhöhte Schwierigkeit der klinischen Messung. Eine Positionierungshilfe kann hier zur Fixierung der Messsonde beitragen. Der grundsätzlich positive Einfluss einer Schiene auf klinische Messungen wurde bereits oben unter Punkt 5.2.1 herausgearbeitet. Ob die vorliegend verwendete Schiene mit einer Dicke von 2 mm das Optimum darstellt, lässt sich allerdings nicht beurteilen. Vor dem Hintergrund, dass sich die hier festgestellten unterschiedlichen Reproduzierbarkeiten zu den Zahngruppen in dem für die Zahngruppen unterschiedlichen Einfluss der verwendeten Positionierungsschiene auf die Reproduzierbarkeit – wie unter Punkt 5.2.1 herausgearbeitet – spiegelt, könnte eine stabilere und stärkere als die verwendete Schiene möglicherweise den positiven Einfluss einer Schiene insbesondere bei den oberen Eckzähnen verstärken.

Schließlich können die Unterschiede in der Reproduzierbarkeit zwischen den verschiedenen Zahngruppen auf die unterschiedlichen Wölbungen der Zähne sowie die inhomogenen Farbverteilungen zurückzuführen sein, wie es schon Leibrock et al. schlussfolgerten (126). Ein enger Kontakt zwischen der Sondenspitze des Messgeräts und der Zahnoberfläche ist für eine genaue Zahnfarbbestimmung entscheidend (128). Ein flaches Aufsetzen der Sondenspitze auf einen Zahn ist aber erschwert, da die Zahnoberfläche nicht vollkommen eben ist (148). Chu beschrieb bereits 2003, dass eine gekrümmte Zahnoberfläche problematisch sein kann, da sie die gleichmäßige Lichtreflexion zum Spektralphotometer negativ beeinflussen kann (149). So könnte insbesondere der sogenannte Kantenverlust sich ausgewirkt haben, mit dem eine Streuung des reflektierten Lichts beschrieben wird. Ein unvollständiger Kontakt sowie die inhomogenen Oberflächen und die zweischichtige Zusammensetzung natürlicher Zähne aus Dentin und Schmelz können zu Kantenverlusten führen (68, 144, 150). Bolt et al. stellten fest, dass der Kantenverlust insbesondere bei der Verwendung von Messsonden mit kleinem Fenster eine Rolle spielt. Der Kantenverlust soll um den Faktor 0,7 reduziert werden können, wenn die Fenstergröße von 3mm auf 5mm vergrößert wird. Durch den Kantenverlust verschieben sich die L^* -, a^* - und b^* -Farbkoordinaten zum Grün und Blau hin und weisen eine geringere Helligkeit als die tatsächlichen Farbkoordinaten auf. Diese Verschiebungen werden durch den wellenlängenabhängigen Kantenverlust verursacht (144).

In der vorliegenden Studie deuten insbesondere die geringeren Intraklassenkorrelationen zu den Eckzähnen im Vergleich zu denjenigen der oberen Schneidezähne auf einen solchen merklichen Kantenverlust hin. Gerade bei den Eckzähnen ist ein planes Aufsetzen der Messsonde aufgrund der gewölbten Zahnoberfläche schwierig, während die flachen Schneidezähne im Oberkiefer ein bündiges Aufsetzen ermöglichen und hierdurch Streustrahlung minimiert wird. Die signifikant höhere Reproduzierbarkeit der Oberkieferfrontzähne, die die breitesten und flachsten vestibulären Flächen bieten, ist daraus zu erklären. Des Weiteren könnte die variierende Schmelzdicke von Oberkiefer Eckzähnen und Oberkieferfrontzähnen (151, 152) den Kantenverlust beeinflusst haben (68).

Mit Rücksicht auf den an die unterschiedlichen Zahnoberflächen anknüpfenden Erklärungsansatz wäre auf Grund des Umstandes, dass die seitlichen unteren Schneidezähne eine größere mesio-distale Breite als die mittleren haben (153), zu erwarten gewesen, dass die seitlichen unteren Frontzähne leichter und mit höherer Reproduzierbarkeit zu messen sind als die mittleren unteren Frontzähne. Die berechneten Werte zeigen jedoch das Gegenteil. Diese Ergebnisse könnten hier durch die Position des Zahnes im Zahnbogen oder die Winkelstellung zu seinen Nachbarzähnen beeinflusst sein. Grundsätzlich sollte bei Messungen von Unterkieferzähnen auch beachtet werden, dass eine zusätzliche Beweglichkeit durch den freibeweglichen Unterkiefer besteht.

5.2.2.4 Bisherige Studienlage

Karamouzos et al. (154) fanden in ihrer Studie über die Reproduzierbarkeit von Farbmessungen mit dem kontaktlos arbeitenden Spektralphotometer SpectroShade™ an Oberkieferzähnen (14- 24), mittleren Unterkieferfront- und Unterkiefereckzähnen, allerdings ohne Positionierungshilfe, die größten Farbunterschiede zwischen verschiedenen Messungen bei den oberen Prämolaren und bei den unteren mittleren Schneidezähnen. Bei den Prämolaren sehen die Autoren die Ursache in der gewölbten Oberfläche und dem damit verbundenen negativen Einfluss auf die Reflexion der Strahlung. Bei den unteren mittleren Schneidezähnen werden die Schwierigkeit, die relativ große Messsonde korrekt auf den Zähnen zu positionieren, und damit mögliche Bewegungen während des Messvorgangs als Schwachpunkt bewertet. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass sich die unteren Schneidezähne und gekrümmte Oberflächen weniger zuverlässig messen lassen. Die vorliegenden Ergebnisse aus der Anwendung des VITA Easyshade V unterstützen diese Annahmen. Allerdings erreichen bei Karamouzos et al. die Unterkiefereckzähne größere ΔE -Werte als die Oberkiefereckzähne (154), was nicht den vorliegenden Ergebnissen entspricht, da vorliegend die Reproduzierbarkeit der Messung an Unterkiefereckzähnen tendenziell höher war als an den Oberkiefereckzähnen.

Klotz et al. (150) resümieren in ihrer Studie dagegen, dass ihre Ergebnisse darauf hindeuteten, dass Schneidezähne und Prämolare vergleichbar gemessen werden könnten; Gleichwohl wird angemerkt, dass bei gewölbten fazialen Zahnoberflächen die Möglichkeit eines unvollständigen Kontakts zwischen der Sondenspitze des Geräts und den Zahnoberflächen während der Messung bei Prämolaren wahrscheinlicher als bei Schneidezähnen ist.

5.2.2.5 Fazit

Die vorliegenden Ergebnisse bestätigen die Ergebnisse vorhergehender Studien. Bei den stark gewölbten Oberkieferzähnen ergaben sich niedrigere und bei den oberen mittleren Schneidezähnen hohe Intraklassenkorrelationen, was vor allem auf den Kantenverlust-Effekt zurückzuführen sein dürfte. Die Reproduzierbarkeiten sind - trotz kleinerer Unterschiede zwischen den Zahngruppen - mit Intraklassenkorrelationen von 0,958 (Zähne 32, 42 in der Farbkoordinate a^*) bis 0,991 (Zähne 11, 21 in den Farbkoordinaten L^* , b^* , C^*) durchweg sehr hoch. Die Oberkieferfrontzähne 11 und 21 wiesen in allen untersuchten Farbkoordinaten die höchsten Werte auf. Die Nullhypothese 2 hat sich aufgrund der festgestellten Unterschiede nicht bestätigt.

5.2.3 Einfluss einer Bleaching-Behandlung auf die Reproduzierbarkeit

Die dritte Nullhypothese lautet: „Es gibt keinen Unterschied in den Intraklassenkorrelationen der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° bei den Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten im Verlauf einer Bleaching-Behandlung.“ Die Studie untersucht damit den Einfluss einer Bleaching-Behandlung auf die Reproduzierbarkeit von Farbmessungen. Betrachtet werden Messungen an acht verschiedenen Zeitpunkten vor ($t(0)$), während ($t(1)$ - $t(3)$) und nach der Behandlung ($t(4)$ - $t(7)$).

Aus den Ergebnissen unter 4.3. geht hervor, dass sich die Reproduzierbarkeit im zeitlichen Verlauf ändert. Die Ausgangsmessungen ($t(0)$) sowie die Messungen innerhalb der ersten Bleachingwoche ($t(1)$ - $t(3)$) weisen signifikant höhere Intraklassenkorrelationen in den untersuchten Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° auf als die Messungen nach Beendigung der Bleaching-Behandlung nach zwei Wochen bis sechs Monaten ($t(4)$ - $t(7)$) (Tabellen 22-29). Die Intraklassenkorrelationen der Koordinaten b^* und C^* nehmen dabei von Termin $t(3)$ (0,990) bis Termin $t(6)$ (0,981 und 0,980) ab und steigen zu Termin $t(7)$ (0,982 und 0,983) wieder an (Abb. 10, 11). Die Koordinate h° nimmt nach dem Zeitpunkt $t(3)$ (0,991- 0,969) kontinuierlich ab (Abb. 12). Die Intraklassenkorrelationen für die Farbkoordinate a^* zeigen hohe Werte von 0,986 bis 0,991 zu den anfänglichen Messungen und deutlich abgefallene Intraklassenkorrelationen mit Werten von 0,974 bis 0,979 zu den späteren Messungen (Abb. 9). Die Intraklassenkorrelationen der Koordinate L^* sind zu den Zeitpunkten $t(0)$ bis $t(4)$ fast identisch (0,982- 0,986). Zu den Zeitpunkten $t(5)$ und $t(7)$ sind sie mit 0,969 und 0,972 etwas geringer (Abb. 8). Als Ausreißer in der Betrachtung zeigt sich der Zeitpunkt $t(6)$ in der Farbkoordinate L^* (Abbildung 8). Der Wert von 0,926 liegt deutlich unter den für diese Farbkoordinate ermittelten Werten für die anderen Zeitpunkte.

Eine systemische Veränderung der Reproduzierbarkeit nach einer zweiwöchigen Bleichbehandlung lässt sich somit anhand der vorliegenden Daten nicht ausschließen. Es kommen unterschiedliche Gründe in Betracht, die die Reproduzierbarkeit derart beeinflusst haben.

Zu nennen sind farbige Lebensmittel. Es ist möglich, dass sich Farbpigmente post-Bleaching vermehrt im Schmelz einlagern und die Heterogenität verstärken. Getränke wie Cola, Rotwein und Tee bewirken eine signifikante Änderung der Farbe nach einer Bleaching-Behandlung (155), was in Zusammenhang mit den signifikant höheren Intraklassenkorrelationen zu den ersten vier Messzeitpunkten gegenüber denjenigen nach Beendigung der Bleaching-Behandlung nach zwei Wochen bis sechs Monaten stehen könnte. Wriedt et al. (156) fanden heraus, dass der Konsum bestimmter farbiger Lebensmittel sich selbst auf die Farbe von kieferorthopädischen Brackets auswirken kann.

Zum anderen kann es im Rahmen der Bleaching-Behandlung zu chemischen Umbauprozessen im Zahn kommen, die mit Verschiebung des Absorptionsspektrums einhergehen (37, 44, 45). Sofern die Veränderung der Reproduzierbarkeiten in Zusammenhang mit den Umbauveränderungen beim Bleaching stehen, sollten sich nach Abschluss des Bleachingprozesses wieder erhöhte Reproduzierbarkeiten zeigen. Wann der Bleachingprozess im behandelten Zahn abgeschlossen ist, lässt sich nicht genau bestimmen. Studien zeigten, dass der Bleachingeffekt nicht langfristig konstant bleibt und sich die Zahnfarbe im Laufe der Zeit wieder ändert (157, 158). Auch aus Nebenwirkungen der Behandlung, wie Porositäten und tiefere Schmelzrillen (159-168), können sich Auswirkungen ergeben.

Eine Studie aus dem Jahr 2009 von Hoppe (103) befasste sich mit der Reproduzierbarkeit von Messwerten mit einem digitalen Messgerät im Rahmen einer Bleachingstudie, die In-Office durchgeführt wurde. Das Hauptaugenmerk bei dieser Studie lag auf dem Vergleich der Reproduzierbarkeiten visueller und elektronischer Zahnfarbbestimmung. Die Reproduzierbarkeiten wurden zu drei Zeitpunkten (Baseline, nach 14 Tagen, nach sechs Monaten) ermittelt. Gemessen wurden die Zähne 14-24 ohne Positionierungshilfe in jeweils drei Segmenten (gingivales Drittel, mittleres Drittel und zervikales Drittel) vier Mal pro Termin. Signifikanzen zwischen den Reproduzierbarkeiten wurden nicht berechnet. Aufgrund der ausgeprägten Unterschiede zur vorliegenden Studie (In-Office-Bleaching versus Home-Bleaching, ohne Positionierungsschiene versus mit Positionierungsschiene und Messung in drei Segmenten versus zentrale Messung) ist ein Vergleich mit den vorliegenden Ergebnissen schwierig. Eine genaue Betrachtung der Daten zeigt jedoch, dass auch dort die ICCs im Laufe der Untersuchung tendenziell abnahmen. Die Farbkoordinate L^* hatte zu Beginn der Untersuchung einen ICC von 0,79, nach 14 Tagen 0,72 und nach sechs Monaten einen ICC von 0,73. Für die Koordinate C^* lag der ICC zu Beginn bei 0,73, nach 14 Tagen bei 0,63 und

nach sechs Monaten bei 0,58. Auch wenn diese Studie anders konzipiert war, unterstützt sie die Hypothese, dass es durch eine Bleichbehandlung zu einer Veränderung der Reproduzierbarkeit kommt. Die Reproduzierbarkeiten in der vorliegenden Studie fielen ausnahmslos wesentlich höher aus. Die ICCs bewegen sich hier bei den acht Terminen in den fünf Koordinaten zwischen 0,991 und 0,926.

5.2.3.1 Fazit

Die Messergebnisse zeigen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit zu allen Terminen. Gleichwohl gibt es statistisch signifikante Unterschiede im Verlauf der Studie, weshalb auch die dritte Nullhypothese zu verneinen ist.

5.2.4 Reproduzierbarkeit bei Anwendung des VITA Easyshade V

Die Ergebnisse ergänzen frühere Untersuchungen zur Qualität der VITA Easyshade Baureihe. Die vorliegende Untersuchung hat nunmehr in einer breit angelegten Studie gezeigt, dass das VITA Easyshade V durchgehend zuverlässig misst. Es haben sich bei allen Messungen mit und ohne Schiene, zu allen Zahngruppen - im Verlauf einer Bleaching-Behandlung - hohe Reproduzierbarkeiten ergeben. Insgesamt liegen alle Intraklassenkorrelationen über 0,9. Bereits Olms et al. (110) wiesen nach, dass das Easyshade unabhängig von Kalibrierungshäufigkeit und Umgebungslicht für die wissenschaftliche Dokumentation der L^{*}-, a^{*}-, b^{*}- Daten geeignet ist. Die Messungen wurden an einem Keramik- und Kunststoffprobekörper bei wechselnden Hintergründen und Umgebungsbeleuchtungen getestet.

In vivo- und in vitro-Messungen mithilfe des VITA Easyshade Advance 4.0 durch Knezovic et al. (111) ergaben ICCs für die in vivo-Messungen des Zahnes 11 an zehn Probanden jeweils zweimal von 0,858 bis 0,971 und für zweimalige in vitro Messungen von Vitapan shade tabs von 0,992 und 0,994.

Corciolani et al. (112) verglichen das VITA Easyshade mit einem Laborspektralphotometer und schlussfolgerten, dass beide Geräte „exzellente“ Ergebnisse hinsichtlich der Reproduzierbarkeit an Keramikpräparaten lieferten.

Die Studie von Lagouvardos et al. (96) evaluierte die Reproduzierbarkeit der Farbmessgeräte ShadeEye NCC und VITA Easyshade. Die ICCs für die Parameter L^{*}, a^{*} und b^{*} reichten von 0,693 bis 0,929, was die Autoren als „ausgezeichnet bis perfekt“ bezeichneten. Der Vergleich zwischen den Geräten ergab, dass das Easyshade für den Parameter L^{*} eine signifikant höhere Reproduzierbarkeit auswies.

Klotz et. al (102) kommen in einer Studie aus dem Jahr 2018 für das Vorgängermodell Easyshade Advance 4.0 und das in der vorliegenden Studie verwendete Easyshade V zu dem Ergebnis, dass beide Geräte exzellente Reproduzierbarkeiten an Farbringzähnen des 3D-Masters lieferten. Die maximale Abweichung der Koordinaten a^* und b^* für beide Geräte wird mit 0.0 und für die Koordinate L^* mit 0.1 angegeben.

In einer aktuellen Studie aus dem Jahr 2024 von Hampé-Kautz et al. (113) wurden drei intraorale Spektralphotometer unter klinischen Bedingungen verglichen, das VITA Easyshade V, das VITA Easyshade IV und den Rayplicker (Borea, Limoges, France). Das VITA Easyshade V zeigte Reproduzierbarkeiten mit den Intraklassenkorrelationen zu L^* von 0.95, C^* von 0.99 und h° von 0.93. Rayplicker und das Easyshade V sind laut der Studie zuverlässige Geräte zur Messung von CIELCh-Parametern.

Auch im Vergleich mit intraoralen Scannern in einer Studie von Huang et al. (114) schnitt das VITA Easyshade V zur Reproduzierbarkeit mit einem Fleiss' kappa-Wert von 0.95 gut ab.

6. Zusammenfassung

In der vorliegenden Studie wurde die Reproduzierbarkeit der Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° unter Verwendung des digitalen Spektralphotometers VITA Easyshade V der Firma VITA Zahnfabrik (Bad Säckingen, Deutschland) im Rahmen einer Bleachingstudie untersucht, und zwar im Vergleich der Reproduzierbarkeit

- ohne versus mit Positionierungsschiene,
- zwischen den einzelnen Zahngruppen und
- zwischen den einzelnen Messterminen im Verlauf einer Bleaching-Behandlung.

Anwendung fand das Bleaching-Produkt „Phillips Zoom! DayWhite“. Die digitalen Zahnfarbenbestimmungen erfolgten an insgesamt acht verschiedenen Zeitpunkten und zwar vor, während und nach der Bleaching-Behandlung. Gemessen wurden sowohl die oberen als auch die unteren Front- und Eckzähne (Zähne 13-23 und 33-43), und zwar ohne und mit einer Positionierungsschiene. In jedem Messdurchlauf wurde jeder Zahn dreimal ohne das Anheben des Messkopfes gemessen. Aus den drei Messungen konnten die Werte für die Berechnung der Intraklassenkorrelationen ermittelt werden. Insgesamt wurden über 30.000 einzelne photometrische Messungen an 57 Probanden und Probandinnen durchgeführt.

Der Vergleich der Ergebnisse der Messungen ohne versus mit Positionierungsschiene ergab, dass an den Oberkieferschneidezähne 12-22 signifikant höhere Reproduzierbarkeiten in den untersuchten Farbkoordinaten L^* , a^* , b^* , C^* und h° unter Verwendung einer Positionierungsschiene gemessen wurden. Für die anderen Zahngruppen konnte dies nur teilweise nachgewiesen werden. Alle Intraklassenkorrelationen, auch diejenigen zu Messungen ohne Schiene, wiesen sehr hohe Werte mit $>0,95$ auf, weshalb eine Positionierungsschiene für den klinischen Alltag nicht notwendig erscheint.

Die Auswertung der Messwerte im Hinblick auf die verschiedenen Zahngruppen zeigte, dass die mittleren Oberkieferfrontzähne signifikant höhere Reproduzierbarkeiten als die übrigen Zahngruppen in allen untersuchten Farbkoordinaten aufwiesen. Die Ergebnisse für die lateralen Oberkieferschneidezähne sind ähnlich signifikant. Insgesamt bewegten sich die ICCs zwischen den Werten von 0,958 und 0,991 und sind somit in allen Zahngruppen hoch.

Beim Vergleich der Ergebnisse zu den einzelnen Messzeitpunkten erwies sich die Reproduzierbarkeit an den Terminen $t(0)$ - $t(3)$ als signifikant besser im Vergleich zu den übrigen Terminen $t(4)$, $t(5)$, $t(6)$ und $t(7)$. Die im Verlauf der Studie abnehmende Reproduzierbarkeit deutet darauf hin, dass bei der Bleaching-Behandlung auftretende Veränderungen in der Zahnhartsubstanz auftreten, die die Farbbestimmung mit digitalen Messgeräten beeinflussen. Die Intraklassenkorrelationen der einzelnen Messzeitpunkte liegen zwischen dem Höchstwert von 0,991 und dem niedrigsten Wert von 0,926. Auch bei letzterem handelt es sich noch um einen guten Wert, der die hohe Messpräzision des VITA Easyshade V unterstreicht.

7. Literaturverzeichnis

1. Tin-Oo MM, Saddki N, Hassan N. Factors influencing patient satisfaction with dental appearance and treatments they desire to improve aesthetics. *BMC Oral Health*. 2011; 11: p. 6.
2. Dutra A, Frary J, Wise R. Higher-order needs drive new growth in mature consumer markets. *Journal of Business Strategy*. 2004; 25(5): p. 26-34.
3. Watts A, Addy M. Tooth discolouration and staining: a review of the literature. *Br Dent J*. 2001; 190(6): p. 309-316.
4. Browning WD. Use of shade guides for color measurement in tooth-bleaching studies. *J Esthet Restor Dent*. 2003; 15 Suppl 1: p. 13-20.
5. Martin V. Reproduzierbarkeit und Reliabilität von digitalen intraoralen Spektrophotometern-eine experimentelle Untersuchung (Dissertation). Leipzig: Universität; 2019.
6. Chang JY, Chen WC, Huang TK, Wang JC, Fu PS, Chen JH, et al. Evaluating the accuracy of tooth color measurement by combining the Munsell color system and dental colorimeter. *Kaohsiung J Med Sci*. 2012; 28(9): p. 490-494.
7. 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): p. 1084-1104.
8. Alnusayri MO, Sghaireen MG, Mathew M, Alzarea B, Bandela V, Sghaireen MG. Shade selection in esthetic dentistry: A review. *Cureus*. 2022; 14(3).
9. Berns RS. *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. 4. New York: John Wiley & Sons; 2019 p. 1-5.
10. Gegenfurtner KR. Farbwahrnehmung und ihre Störungen. In: Karnath H-O, Thier P, editors. *Kognitive Neurowissenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2012. p. 45-52.
11. Berns RS. *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. 4. New York: John Wiley & Sons; 2019. p. 1-16.
12. Berns RS. *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. 4. New York: John Wiley & Sons; 2019. p. 157-168.
13. Berns RS. *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. 4. New York: John Wiley & Sons; 2019. p. 39-50.
14. Deutsches Institut für Normung, DIN EN ISO/CIE 11664-4:2020-03, Farbmeterik - Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbraum (ISO/CIE 11664-4:2019).
15. Baltzer A. Physikalisches Farbsystem und menschlicher Farbeindruck. *Digital Dental News*. 2007: p. 14-19.
16. Lehmann KM, Devigus A, Igiel C, Wentaschek S, Azar MS, Scheller H. Repeatability of color-measuring devices. *Eur J Esthet Dent*. 2011; 6(4): p. 428-435.

17. Andres Baltzer VK-J. Die Bestimmung der Zahnfarbe. 2004; 30(7): p. 726-740.
18. Paravina RD, Powers JM. Esthetic color training in dentistry. St. Louis: Mosby; 2004.
19. Lehmann KM, Devigus A, Igiel C, Weyhrauch M, Schmidtmann I, Wentaschek S, et al. Are dental color measuring devices CIE compliant? Eur J Esthet Dent. 2012; 7(3): p. 324-333.
20. Pecho OE, Perez MM, Ghinea R, Della Bona A. Lightness, chroma and hue differences on visual shade matching. Dent Mater. 2016; 32(11): p. 1362-1373.
21. Perez Mdel M, Ghinea R, Herrera LJ, Ionescu AM, Pomares H, Pulgar R, et al. Dental ceramics: a CIEDE2000 acceptability thresholds for lightness, chroma and hue differences. J Dent. 2011; 39 Suppl 3: p. e37-44.
22. Igiel C, Weyhrauch M, Wentaschek S, Scheller H, Lehmann KM. Dental color matching: A comparison between visual and instrumental methods. Dent Mater J. 2016; 35(1): p. 63-69.
23. Chu SJ, Trushkowsky RD, Paravina RD. Dental color matching instruments and systems. Review of clinical and research aspects. J Dent. 2010; 38 Suppl 2: p. e2-16.
24. Li Y. Stain removal and whitening by baking soda dentifrice: A review of literature. The Journal of the American Dental Association. 2017; 148(11, Supplement): p. 20-26.
25. Winter R. Visualizing the natural dentition. J Esthet Dent. 1993; 5(3): p. 102-117.
26. Carey CM. Tooth whitening: what we now know. J Evid Based Dent Pract. 2014; 14 Suppl: p. 70-76.
27. Joiner A, Jones NM, Raven SJ. Investigation of Factors Influencing Stain Formation Utilizing an in Situ Model. Advances in Dental Research. 1995; 9(4): p. 471-476.
28. Nathoo SA. THE CHEMISTRY AND MECHANISMS OF EXTRINSIC AND INTRINSIC DISCOLORATION. The Journal of the American Dental Association. 1997; 128: p. 6S-10S.
29. Hattab FN, Qudeimat MA, al-Rimawi HS. Dental discoloration: an overview. J Esthet Dent. 1999; 11(6): p. 291-310.
30. Addy M, Moran J. Mechanisms of Stain Formation on Teeth, in Particular Associated with Metal Ions and Antiseptics. Advances in Dental Research. 1995; 9(4): p. 450-456.
31. Joiner A, Hopkinson I, Deng Y, Westland S. A review of tooth colour and whiteness. J Dent. 2008; 36 Suppl 1: p. 2-7.
32. Epple M, Meyer F, Enax J. A Critical Review of Modern Concepts for Teeth Whitening. Dent J (Basel). 2019; 7(3).
33. Zantner C, Kielbassa A. Wie wirksam sind Weißmacher-Zahnpasten? Oralprophylaxe. 2002; 24(1): p. 23-29.
34. Cogo E, Sibilla P, Turrini R. Zahnbleaching: Wege zum Erfolg. Berlin: Quintessenz-Verlag. 2013; 3: p. 16-19.

35. Hosdurga R. Extrinsic stains and management: A new insight. *J Acad Indus Res.* 2013; 1: p. 465-442.
36. Ehrenfeld M, Gängler P, Hoffmann T, Schwenzer N, Willershausen B. *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie.* Stuttgart: Georg Thieme Verlag; 2010. p. 76-79.
37. Dahl J, Pallesen U. Tooth bleaching—a critical review of the biological aspects. *Critical Reviews in Oral Biology & Medicine.* 2003; 14(4): p. 292-304.
38. Goldstein RE. How to treat Intrinsic Stain. *Dimensions of Dental Hygiene.* 2007; 5(5): p. 22-23.
39. Manuel ST, Abhishek P, Kundabala M. Etiology of tooth discoloration- a review. *Nigerian Dental Journal.* 2010; 18(2): p. 56-63.
40. Hellwig E, Klimek J, Attin T. *Einführung in die Zahnerhaltung: Prüfungswissen Kariologie, Endodontologie und Parodontologie; mit 60 Tabellen.* Köln: Deutscher Ärzteverlag; 2009. p. 161-163; 469-471.
41. Klimscha J, Holly M. Endodontie und Ästhetik. *Stomatologie.* 2012; 109(7): p. 1-2.
42. Joiner A. The bleaching of teeth: a review of the literature. *J Dent.* 2006; 34(7): p. 412-419.
43. Nathoo S, Stewart B, Petrone ME, Chaknis P, Zhang YP, DeVizio W, et al. Comparative clinical investigation of the tooth whitening efficacy of two tooth whitening gels. *The Journal of clinical dentistry.* 2003; 14(3): p. 64-69.
44. Alqahtani MQ. Tooth-bleaching procedures and their controversial effects: A literature review. *Saudi Dent J.* 2014; 26(2): p. 33-46.
45. Fearon J. Tooth whitening: concepts and controversies. *J Ir Dent Assoc.* 2007; 53(3): p. 132-140.
46. Rotstein I, Walton RE. Bleaching discolored teeth: internal and external. *Endodontics: Principles and Practice.* 2008; 391: p. 385-400.
47. Kirsten J. Update Bleaching: was, wer - und vor allem wie? *der junge zahnarzt.* 2019; 10(4): p. 38-41.
48. Ziebolz D, Reus M, Knösel M. Farbstabilität verschiedener Bleichverfahren—Was kann man mit externen Bleichmitteln langfristig erreichen? *ZWR-Das Deutsche Zahnärzteblatt.* 2010; 119(03): p. 104-109.
49. Zantner C, Beheim-Schwarzbach N, Neumann K, Kielbassa AM. Surface microhardness of enamel after different home bleaching procedures. *Dental Materials.* 2007; 23(2): p. 243-250.
50. Kihn PW. Vital Tooth Whitening. *Dental Clinics of North America.* 2007; 51(2): p. 319-331.
51. Sulieman M. An overview of bleaching techniques: 2. Night Guard Vital Bleaching and non-vital bleaching. *Dental update.* 2005; 32(1): p. 39-46.

52. Haywood VB, Heymann HO. Nightguard vital bleaching. *Quintessence Int.* 1989; 20(3): p. 173-176.
53. Löbel C. Bleichtherapien im Überblick ZWP Online; 28.02.2011 [24.02.2023:[Available from: <https://www.zwp-online.info/fachgebiete/cosmetic-dentistry/bleaching/bleichtherapien-im-ueberblick>.
54. Hasson H, Ismail AI, Neiva G. Home-based chemically-induced whitening of teeth in adults. *Cochrane Database Syst Rev.* 2006; (4): p. Cd006202.
55. Alonso de la Peña V, López Ratón M. Randomized clinical trial on the efficacy and safety of four professional at-home tooth whitening gels. *Oper Dent.* 2014; 39(2): p. 136-143.
56. Sulieman MA. An overview of tooth-bleaching techniques: chemistry, safety and efficacy. *Periodontol 2000.* 2008; 48: p. 148-169.
57. Powell LV, Bales DJ. Tooth bleaching: its effect on oral tissues. *The Journal of the American Dental Association.* 1991; 122(11): p. 50-54.
58. Kashima-Tanaka M, Tsujimoto Y, Kawamoto K, Senda N, Ito K, Yamazaki M. Generation of free radicals and/or active oxygen by light or laser irradiation of hydrogen peroxide or sodium hypochlorite. *Journal of Endodontics.* 2003; 29(2): p. 141-143.
59. Marson FC, Sensi LG, Vieira LC, Araújo E. Clinical evaluation of in-office dental bleaching treatments with and without the use of light-activation sources. *Oper Dent.* 2008; 33(1): p. 15-22.
60. Buchalla W, Attin T. External bleaching therapy with activation by heat, light or laser-- a systematic review. *Dent Mater.* 2007; 23(5): p. 586-596.
61. Kugel G. Over-the-counter tooth-whitening systems. *Compendium of continuing education in dentistry (Jamesburg, NJ: 1995).* 2003; 24(4A): p. 376-382.
62. Naidu AS, Bennani V, Brunton J, Brunton P. Over-the-Counter Tooth Whitening Agents: A Review of Literature. *Braz Dent J.* 2020; 31(3): p. 221-235.
63. Zimmerli B, Jeger F, Lussi A. Bleaching of nonvital teeth. A clinically relevant literature review. *Schweiz Monatsschr Zahnmed.* 2010; 120(4): p. 306-320.
64. Habibi Y, Habibi E, Klotz A-L, Hassel A, Zenthöfer A. Die Bestimmung der Zahnfarbe--ein praxisorientiertes Update. *ZWR-Das Deutsche Zahnärzteblatt.* 2018; 127(05): p. 214-220.
65. Bhat V, Prasad DK, Sood S, Bhat A. Role of colors in prosthodontics: application of color science in restorative dentistry. *Indian J Dent Res.* 2011; 22(6): p. 804-809.
66. Joiner A. Tooth colour: a review of the literature. *J Dent.* 2004; 32 Suppl 1: p. 3-12.
67. Paravina RD. New shade guide for tooth whitening monitoring: visual assessment. *J Prosthet Dent.* 2008; 99(3): p. 178-184.
68. Van der Burgt T, Ten Bosch J, Borsboom P, Kortsmid W. A comparison of new and conventional methods for quantification of tooth color. *The Journal of prosthetic dentistry.* 1990; 63(2): p. 155-162.

69. Dudea D, Gasparik C, Botos A, Alb F, Irimie A, Paravina RD. Influence of background/surrounding area on accuracy of visual color matching. *Clin Oral Investig*. 2016; 20(6): p. 1167-1173.
70. Sproull RC. Color matching in dentistry. Part III. Color control. *The Journal of prosthetic dentistry*. 1974; 31(2): p. 146-154.
71. Gásparik C, Tofan A, Culic B, Badea M, Dudea D. Influence of light source and clinical experience on shade matching. *Clujul Med*. 2014; 87(1): p. 30-33.
72. Culpepper WD. A comparative study of shade-matching procedures. *The Journal of prosthetic dentistry*. 1970; 24(2): p. 166-173.
73. Donahue JL, Goodkind RJ, Schwabacher WB, Aeppli DP. Shade color discrimination by men and women. *The Journal of prosthetic dentistry*. 1991; 65(5): p. 699-703.
74. Jarad F, Russell M, Moss B. The use of digital imaging for colour matching and communication in restorative dentistry. *British dental journal*. 2005; 199(1): p. 43-49.
75. Judeh A, Al-Wahadni A. A comparison between conventional visual and spectrophotometric methods for shade selection. *Quintessence Int*. 2009; 40(9): p. e69-79.
76. Yuan JC, Brewer JD, Monaco EA, Jr., Davis EL. Defining a natural tooth color space based on a 3-dimensional shade system. *J Prosthet Dent*. 2007; 98(2): p. 110-119.
77. Berns RS. *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. New York: John Wiley & Sons; 2019. p. 119-121.
78. K.M.Lehmann CI, H. Scheller. Die nächste Generation der Farbbestimmung: digitale Farbbestimmungssysteme. *ZWR-Das Deutsche Zahnärzteblatt*. 2012; 121: p. 410-417.
79. Posavec I, Prpić V, Zlatarić DK. Influence of light conditions and light sources on clinical measurement of natural teeth color using VITA Easyshade Advance 4, 0® spectrophotometer. Pilot study. *Acta Stomatologica Croatica*. 2016; 50(4): p. 337.
80. Horn DJ, Bulan-Brady J, Hicks ML. Sphere spectrophotometer versus human evaluation of tooth shade. *J Endod*. 1998; 24(12): p. 786-790.
81. Berns RS. *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. 4. New York: John Wiley & Sons; 2019. p. 124-127.
82. Özat PB, Tuncel İ, Eroğlu E. Repeatability and reliability of human eye in visual shade selection. *J Oral Rehabil*. 2013; 40(12): p. 958-964.
83. Igiel C, Lehmann KM, Ghinea R, Weyhrauch M, Hangx Y, Scheller H, et al. Reliability of visual and instrumental color matching. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2017; 29(5): p. 303-308.
84. Hammad IA. Intrarater repeatability of shade selections with two shade guides. *J Prosthet Dent*. 2003; 89(1): p. 50-53.
85. Li Q, Yu H, Wang Y. In vivo spectroradiometric evaluation of colour matching errors among five shade guides. *Journal of oral rehabilitation*. 2009; 36(1): p. 65-70.

86. Pubmed. 30.07.2023 [Available from: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/>].
87. Da Silva JD, Park SE, Weber H-P, Ishikawa-Nagai S. Clinical performance of a newly developed spectrophotometric system on tooth color reproduction. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2008; 99(5): p. 361-368.
88. Gehrkea P, Riekeberg U, Fackler O, Dhond G. Comparison of In Vivo Visual, Spectrophotometric and Colorimetric Shade Determination of Teeth and Implant-supported Crowns Vergleichsstudie zur visuellen, spektrofotometrischen und kolorimetrischen Farb. *Int J Comput Dent*. 2009; 12: p. 247-263.
89. Alsaleh S, Labban M, AlHariri M, Tashkandi E. Evaluation of self shade matching ability of dental students using visual and instrumental means. *J Dent*. 2012; 40 Suppl 1: p. e82-87.
90. Bahannan SA. Shade matching quality among dental students using visual and instrumental methods. *Journal of dentistry*. 2014; 42(1): p. 48-52.
91. Lehmann KM, Igiel C, Schmidtman I, Scheller H. Four color-measuring devices compared with a spectrophotometric reference system. *J Dent*. 2010; 38 Suppl 2: p. e65-70.
92. Llana C, Lozano E, Amengual J, Forner L. Reliability of two color selection devices in matching and measuring tooth color. *J Contemp Dent Pract*. 2011; 12(1): p. 19-23.
93. Kim-Pusateri S, Brewer JD, Davis EL, Wee AG. Reliability and accuracy of four dental shade-matching devices. *J Prosthet Dent*. 2009; 101(3): p. 193-199.
94. 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): p. 2309-2318.
95. Sarafianou A, Kamposiora P, Papavasiliou G, Goula H. Matching repeatability and interdevice agreement of 2 intraoral spectrophotometers. *J Prosthet Dent*. 2012; 107(3): p. 178-185.
96. Lagouvardos PE, Fougia AG, Diamantopoulou SA, Polyzois GL. Repeatability and interdevice reliability of two portable color selection devices in matching and measuring tooth color. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2009; 101(1): p. 40-45.
97. Khashayar G, Dozic A, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Data comparison between two dental spectrophotometers. *Oper Dent*. 2012; 37(1): p. 12-20.
98. Kim HK. Evaluation of the repeatability and matching accuracy between two identical intraoral spectrophotometers: an in vivo and in vitro study. *J Adv Prosthodont*. 2018; 10(3): p. 252-258.
99. Dozić A, Kleverlaan CJ, El-Zohairy A, Feilzer AJ, Khashayar G. Performance of five commercially available tooth color-measuring devices. *Journal of Prosthodontics*. 2007; 16(2): p. 93-100.
100. Dunn WJ, Murchison DF, Broome JC. Esthetics: patients' perceptions of dental attractiveness. *J Prosthodont*. 1996; 5(3): p. 166-171.

101. Haiderer B, Glockner K. Farbverteilung permanenter, natürlicher Dentition an 500 Patienten der Grazer Zahnklinik. *Stomatologie*. 2012; 109(3): p. 23-26.
102. Klotz AL, Habibi Y, Corcodel N, Rammelsberg P, Hassel AJ, Zenthöfer A. Laboratory and clinical reliability of two spectrophotometers. *J Esthet Restor Dent*. 2022; 34(2): p. 369-373.
103. Hoppe S. Vergleich der Reproduzierbarkeit visueller und elektronischer Zahnfarbbestimmung anhand einer Bleichtherapie (Dissertation). Greifswald: Universität; 2009.
104. Witzel T. Klinische Untersuchung computergestützter Zahnfarbbestimmung im Vergleich zu visueller Abmusterung durch das menschliche Auge (Dissertation). Würzburg: Universität; 2004.
105. Bundeszahnärztekammer. Zähnebleichen (Bleaching) ist eine zahnärztliche Leistung 2014 [02.04.2020:[Available from: <https://www.bzaek.de/service/positionen-statements/einzelansicht/zaehnebleichen-bleaching-ist-eine-zahnaerztliche-leistung.html>].
106. Oberlandesgericht. Frankfurt2012 [Available from: openjur 2012, 52729.
107. Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30.November 2009 über kosmetische Mittel [
108. Anhang III/Nr.12 zu Verordnung (EG) Nr. 1223/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30.November 2009 über kosmetische Mittel [
109. Lilaj B, Dauti R, Agis H, Schmid-Schwap M, Franz A, Kanz F, et al. Comparison of Bleaching Products With Up to 6% and With More Than 6% Hydrogen Peroxide: Whitening Efficacy Using BI and WI (D) and Side Effects - An in vitro Study. *Front Physiol*. 2019; 10: p. 919.
110. Setz J, Ol C, Arnold C. Einflüsse von Umgebungsparametern auf die Reproduzierbarkeit intraoraler Farbmessungen mit dem Spektrophotometer Vita Easyshade. *KVM - Der Medizinverlag*. 2009; 64(10): p. 0-0.
111. Knezović D, Zlatarić D, Illeš I, Alajbeg M, Žagar. In Vivo and in Vitro Evaluations of Repeatability and Accuracy of VITA Easyshade® Advance 4.0 Dental Shade-Matching Device. *Acta Stomatol Croat*. 2015; 49(2): p. 112-118.
112. Corciolani G, Vichi A. Repeatability of colour reading with a clinical and a laboratory spectrophotometer. *International Dentistry South Africa*. 2006; 8(5): p. 62-70.
113. Hampé-Kautz V, Roman T, Schwob T, Cournault B, Etienne O. In-vivo repeatability of three intra-oral spectrophotometers. *J Esthet Restor Dent*. 2024; 36(3): p. 520-526.
114. Huang M, Wang Y, Sun Y, Zhou Y, Liu Y, Ye H. The accuracies of three intraoral scanners with regard to shade determination: An in vitro study. *Journal of Prosthodontics*. 2023; 32(5): p. e111-e117.
115. Fernández Millán D, Gallas Torreira M, Alonso de la Peña V. Using a repositioning splint to determine reproducibility in the color registers of a dental spectrophotometer. *J Esthet Restor Dent*. 2020; 32(1): p. 19-25.

116. Blum SL, Horn M, Olms C. A comparison of intraoral spectrophotometers—Are there user-specific differences? *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2018; 30(5): p. 442-448.
117. Crespo PC, Córdova AK, Palacios A, Astudillo D, Delgado B. Variability in tooth color selection by different spectrophotometers: a systematic review. *The Open Dentistry Journal*. 2022; 16(1).
118. Crespo PC, Córdova AK, Palacios A, Astudillo D, Delgado B. Variability in tooth color selection by different spectrophotometers: a systematic review unter „Conclusion“. *The Open Dentistry Journal*. 2022; 16(1).
119. VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG - VITA Easyshade V Gebrauchsanweisung. 2022 [Available from: <https://www.vita-zahnfabrik.com/de/VITA-Easyshade-V-67617.html>].
120. Øilo M. Repeatability of electronic shade determination and the influence of differences in patient's sitting position. *Eur J Prosthodont Restor Dent*. 2010; 18(4): p. 171-175.
121. Olms C, Martin V. Reproduzierbarkeit und Reliabilität intraoraler Spektrophotometer. *Deutsche Zahnärztliche Zeitung*. 2019; 74: p. 102-111.
122. Browning WD, Chan DC, Blalock JS, Brackett MG. A comparison of human raters and an intra-oral spectrophotometer. *Oper Dent*. 2009; 34(3): p. 337-343.
123. Kim-Pusateri S, Brewer JD, Dunford RG, Wee AG. In vitro model to evaluate reliability and accuracy of a dental shade-matching instrument. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2007; 98(5): p. 353-358.
124. Douglas RD. Precision of in vivo colorimetric assessments of teeth. *The Journal of prosthetic dentistry*. 1997; 77(5): p. 464-470.
125. Hemming M, Kwon SR, Qian F. Repeatability in Color Measurements of a Spectrophotometer using Different Positioning Devices. *The Journal of Contemporary Dental Practice*. 2015; 16(12): p. 933-938.
126. Leibrock A, Rosentritt M, Behr M, Güray N, Handel G. Einflüsse unterschiedlicher Meßparameter auf die metrische Farbbestimmung mit dem Spektralfarbmeßgerät Castor. *Dtsch Zahnärztl*. 1995; (1995): p. 50.
127. Ontiveros JC, Paravina RD. Color change of vital teeth exposed to bleaching performed with and without supplementary light. *Journal of dentistry*. 2009; 37(11): p. 840-847.
128. Santana TR, Silva PFD, Santana MLC, Mattos C, Faria ESAL. Influence of repositioning guides' color and usage on precision in tooth color measurement with a clinical spectrophotometer. *J Appl Oral Sci*. 2024; 32: p. e20230348.
129. vgl. Buchmeier H. Visueller und elektronischer Vergleich der Farbmuster des VITA Toothguide 3D-MASTER® und Bleachedguide 3D-MASTER® (Dissertation). Mainz: Universität; 2023.
130. Goodkind RJ, Schwabacher WB. Use of a fiber-optic colorimeter for in vivo color measurements of 2830 anterior teeth. *The Journal of prosthetic dentistry*. 1987; 58(5): p. 535-542.

131. Hasegawa A, Ikeda I, Kawaguchi S. Color and translucency of in vivo natural central incisors. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2000; 83(4): p. 418-423.
132. Macpherson L, Stephen K, Joiner A, Schäfer F, Huntington E. Comparison of a conventional and modified tooth stain index. *Journal of clinical periodontology*. 2000; 27(11): p. 854-859.
133. Joiner A, Pickles M, Matheson J, Weader E, Noblet L, Huntington E. Whitening toothpastes: effects on tooth stain and enamel. *International dental journal*. 2002; 52: p. 424-430.
134. Berns RS. *Billmeyer and Saltzman's principles of color technology*. 4. New York: John Wiley & Sons; 2019. p. 1-30.
135. Pirvulescu I, Faur A, Jivanescu A. Influence of Different Illuminants on Spectrophotometric Tooth Color Determination. *J Clin Med Res*. 2022; 4(3): p. 1-9.
136. Revilla-León M, Methani MM, Özcan M. Impact of the ambient light illuminance conditions on the shade matching capabilities of an intraoral scanner. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 2021; 33(6): p. 906-912.
137. Koo TK, Li MY. A Guideline of Selecting and Reporting Intraclass Correlation Coefficients for Reliability Research. *J Chiropr Med*. 2016; 15(2): p. 155-163.
138. Yen M, Lo L-H. Examining test-retest reliability: an intra-class correlation approach. *Nursing research*. 2002; 51(1): p. 59-62.
139. Staedt H, Mally E, Scheller H, Wentaschek S, Kämmerer PW, Kasaj A, et al. The reproducibility of electronic color measurements of the marginal gingiva. *Clinical Oral Investigations*. 2021; 25(1): p. 145-150.
140. Ratzmann A, Welk A, Hoppe S, Fanghaenel J, Schwahn C. New insights in the reproducibility of visual and electronic tooth color assessment for dental practice. *Head Face Med*. 2020; 16(1): p. 37.
141. Browning WD, Contreras-Bulnes R, Brackett MG, Brackett WW. Color differences: polymerized composite and corresponding Vitapan Classical shade tab. *J Dent*. 2009; 37 Suppl 1: p. e34-39.
142. MILLER LL. Shade matching. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 1993; 5(4): p. 143-153.
143. Miller L. Organizing color in dentistry. *Journal of the American Dental Association* (1939). 1987: p. 26E-40E.
144. Bolt RA, Bosch JJ, Coops JC. Influence of window size in small-window colour measurement, particularly of teeth. *Phys Med Biol*. 1994; 39(7): p. 1133-1142.
145. Olms C, Setz JM. The repeatability of digital shade measurement--a clinical study. *Clin Oral Investig*. 2013; 17(4): p. 1161-1166.
146. Bayadse M. Evaluation der Aufhellungseffektivität von Perfect Bleach Office+ der Firma VOCO: eine in-vivo Untersuchung (Dissertation). Mainz: Universität; 2018.

147. Shimada K, Kakehashi Y, Matsumura H, Tanoue N. In vivo quantitative evaluation of tooth color with hand-held colorimeter and custom template. *J Prosthet Dent.* 2004; 91(4): p. 389-391.
148. Smith RN, Karmo M, Russell J, Brook AH. The variability of the curvature of the labial surface of the upper anterior teeth along the facial axis of the clinical crown. *Arch Oral Biol.* 2007; 52(11): p. 1037-1042.
149. Chu SJ. Use of a reflectance spectrophotometer in evaluating shade change resulting from tooth-whitening products. *J Esthet Restor Dent.* 2003; 15 Suppl 1: p. S42-48.
150. Klotz AL, Habibi Y, Hassel AJ, Rammelsberg P, Zenthöfer A. How reliable and accurate is the shade determination of premolars by spectrophotometry? *Clin Oral Investig.* 2020; 24(4): p. 1439-1444.
151. Akli E, Araujo EA, Kim KB, McCray JF, Hudson MJ. Enamel thickness of maxillary canines evaluated with microcomputed tomography scans. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2020; 158(3): p. 391-399.
152. Harris EF, Hicks JD. A radiographic assessment of enamel thickness in human maxillary incisors. *Arch Oral Biol.* 1998; 43(10): p. 825-831.
153. Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. *Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde; mit 34 Tabellen.* Köln: Deutscher Ärzteverlag; 2009. p. 20.
154. Karamouzos A, Papadopoulos MA, Kolokithas G, Athanasiou AE. Precision of in vivo spectrophotometric colour evaluation of natural teeth. *J Oral Rehabil.* 2007; 34(8): p. 613-621.
155. Karadas M, Seven N. The effect of different drinks on tooth color after home bleaching. *Eur J Dent.* 2014; 8(2): p. 249-253.
156. Wriedt S, Schepke U, Wehrbein H. The discoloring effects of food on the color stability of esthetic brackets--an in-vitro study. *J Orofac Orthop.* 2007; 68(4): p. 308-320.
157. Wiegand A, Drebenstedt S, Roos M, Magalhães AC, Attin T. 12-Month color stability of enamel, dentine, and enamel–dentine samples after bleaching. *Clinical oral investigations.* 2008; 12: p. 303-310.
158. Matis BA, Cochran MA, Franco M, Al-Ammar W, Eckert GJ, Stropes M. Eight in-office tooth whitening systems evaluated in vivo: a pilot study. *Oper Dent.* 2007; 32(4): p. 322-327.
159. Abouassi T, Wolkewitz M, Hahn P. Effect of carbamide peroxide and hydrogen peroxide on enamel surface: an in vitro study. *Clinical oral investigations.* 2011; 15(5): p. 673-680.
160. Azrak B, Callaway A, Kurth P, Willershausen B. Influence of bleaching agents on surface roughness of sound or eroded dental enamel specimens. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry.* 2010; 22(6): p. 391-399.
161. Ben-Amar A, Liberman R, Gorfil C, Bernstein Y. Effect of mouthguard bleaching on enamel surface. *American Journal of Dentistry.* 1995; 8(1): p. 29-32.

162. Bitter NC. A scanning electron microscopy study of the effect of bleaching agents on enamel: a preliminary report. *The Journal of prosthetic dentistry*. 1992; 67(6): p. 852-855.
163. Bitter NC. A scanning electron microscope study of the long-term effect of bleaching agents on the enamel surface in vivo. *General Dentistry*. 1998; 46(1): p. 84-88.
164. Hegedüs C, Bistey T, Flora-Nagy E, Keszthelyi G, Jenei A. An atomic force microscopy study on the effect of bleaching agents on enamel surface. *Journal of dentistry*. 1999; 27(7): p. 509-515.
165. Josey AL, Meyers IA, Romaniuk K, Symons AL. The effect of a vital bleaching technique on enamel surface morphology and the bonding of composite resin to enamel. *J Oral Rehabil*. 1996; 23(4): p. 244-250.
166. Sa Y, Sun L, Wang Z, Ma X, Liang S, Xing W, et al. Effects of two in-office bleaching agents with different pH on the structure of human enamel: an in situ and in vitro study. *Operative dentistry*. 2013; 38(1): p. 100-110.
167. Titley KC, Torneck CD, Ruse ND. The effect of carbamide-peroxide gel on the shear bond strength of a microfil resin to bovine enamel. *J Dent Res*. 1992; 71(1): p. 20-24.
168. Xu B, Li Q, Wang Y. Effects of pH values of hydrogen peroxide bleaching agents on enamel surface properties. *Oper Dent*. 2011; 36(5): p. 554-562.

8. Anhang



UNIVERSITÄTS**medizin.**
MAINZ

Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde
Universitätsmedizin Mainz
Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
Univ.-Prof. Dr. H. Scheller

Informationsschrift

Ermittlung der Effektivität des Home-Bleachings mit Hilfe des elektronischen Farbestimmungsgeräts Easyshade V

Sehr geehrte Probandinnen und Probanden,

im Folgenden werden Sie über die Ziele der Studie informiert. Wenn Sie an einer Teilnahme interessiert sind, wenden Sie sich bitte an eine der unten aufgeführten Doktorandinnen.

Die ästhetische Wirkung der Zähne hängt in erster Linie von der Zahnfarbe ab. Hier zeigen Studien aus Großbritannien, dass 28% und in den USA sogar 34% der Erwachsenen mit dem farblichen Erscheinungsbild ihrer Zähne unzufrieden sind. Als unkompliziertes ästhetisches Verfahren ist deshalb das Zahnbleichen (Bleaching) sehr beliebt. Unter zahnärztlicher Aufsicht und bei richtiger Anwendung ist das Bleichen gesundheitlich unbedenklich und bietet eine sichere Möglichkeit, die Zähne aufzuhellen.

Ziel dieser Studie ist es, den Einfluss des Home-Bleachings auf die Farbkoordinaten Helligkeit, Sättigung und Farbton der Zähne zu ermitteln. Dabei kommt ein Bleichsystem von Philips zum Einsatz (Philips ZOOM DayWhitePhilips Oral Healthcare, 22100 Bothell-Everett Hwy, Bothell, WA 98021-3003, US).

Im Rahmen der Studie und für ein optimales ästhetisches Ergebnis ist es essenziell, dass während der Anwendung auf farbintensive Speisen und Getränke verzichtet wird. Dazu zählen beispielsweise Kaffee, Tee, Rotwein, Nikotin, Curry oder Traubensaft.

Vorgehensweise:

Im ersten Termin werden die Probanden untersucht und geprüft, ob sie für den Einschluss in die Studie geeignet sind. Bei Eignung wird ein Abdruck genommen, damit sind Situationsmodelle des Ober- und Unterkiefers zu erstellen. Diese Situationsmodelle dienen zum einen der Herstellung einer sogenannten "Positionierungsschiene" und zum anderen der Herstellung der Bleachingschiene.

Im Folgenden wird eine professionelle Zahnreinigung durchgeführt, bei der die oberflächlichen Verunreinigungen, Ablagerungen und Zahnstein entfernt werden. Es folgt die erste Bleachingeinheit gemeinsam. Für ein optimales Ergebnis sollte 14 Tage die Schiene täglich zwischen 30-90 Minuten getragen werden.

Bei den Nachsorgeterminen wird die Zahnfarbe anhand der Positionierungsschiene elektronisch bestimmt. Die Behandler sorgen für eine genaue Positionierung des Messgerätes an jedem Zahn. Zusätzlich zur elektronischen Zahnfarbenbestimmung wird ein visueller Zahnfarbenabgleich mit einem Farbschlüssel (VITA Bleachedguide) durchgeführt. Insgesamt werden die Zahnfarben acht mal, in insgesamt sieben Sitzungen bestimmt:

- 1) unmittelbar vor der ersten Bleichsitzung, spätestens 3 Tage nach der professionellen Zahnreinigung
- 2) unmittelbar nach der ersten Bleichsitzung, nicht später als 30 Minuten nach Abschluss der ersten Bleichsitzung
- 3) nach 2 Tagen
- 4) nach 7 Tagen
- 5) nach 14 Tagen
- 6) nach 1 Monat
- 7) nach 2 Monaten
- 8) nach 6 Monaten

Nebenwirkungen:

Beim Bleichen der Zähne mit 6% Wasserstoffperoxid kann während der Behandlung kurzzeitig eine Heiß-/Kälteempfindlichkeit auftreten. Die Empfindlichkeit verschwindet typischerweise innerhalb weniger Tage nach dem Ende der Behandlung oder der Unterbrechung der Therapie. Bei Kontakt mit den Schleimhäuten, den Augen oder der Haut kann es zu Reizungen kommen. Die übermäßige Einnahme des Bleichgels kann Sodbrennen oder Übelkeit verursachen. Bei übermäßigen Schmerzen beenden Sie das Bleichen und wenden Sie sich an uns.

Haftung:

Vorsorglich werden Sie darauf hingewiesen, dass es keine Versicherung für nicht schuldhaftige Schäden gibt, die im Zusammenhang mit der Studie auftreten können. Die Versicherung wird daher nur dann für Schäden aufkommen, wenn der behandelnde Zahnarzt oder ein anderer Mitarbeiter des Prüfzentrums wegen schuldhaften Fehlverhaltens verurteilt wird. Auch Reiseunfälle sind nicht versichert.

Umgang mit Ihren persönlichen Daten:

Personenbezogene Daten werden zunächst in Originaldokumenten festgehalten. Die für die Untersuchung relevanten Daten werden in einem separaten Dokumentationsblatt pseudonymisiert behandelt (Pseudonymisierung bedeutet Verschlüsselung der Daten ohne Zuordnung, die Zuordnung der Daten zu einer Person ist nur möglich, wenn der Schlüssel verwendet wird, mit dem die Daten pseudonymisiert wurden).

Auch die statistische Auswertung basiert auf pseudonymisierten Daten. Die Weitergabe an Dritte (IMBEI- Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik), einschließlich der Veröffentlichung, erfolgt in anonymisierter Form, d.h. die Daten können nicht einer bestimmten Person zugeordnet werden. Die Studie wird unter Einhaltung der ärztlichen Schweigepflicht und der Bestimmungen des Bundesdatenschutzgesetzes durchgeführt.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können Ihre Einwilligung jederzeit ohne Angabe von Gründen und ohne Nachteile für Sie widerrufen. Bei Austritt aus der Studie können bereits erhobene Daten auf Ihren Wunsch vernichtet oder anonymisiert werden. Beim Austritt aus der Studie können Sie entscheiden, ob Sie mit der Auswertung des Materials oder Ihrer Daten einverstanden sind oder nicht. Wenn Sie Ihre Entscheidung zu einem späteren Zeitpunkt ändern möchten, wenden Sie sich bitte an den Studienarzt. Die Daten werden 10 Jahre nach der Erhebung vollständig gelöscht.

Einverständniserklärung

Ermittlung der Effektivität des Home-Bleachings mit Hilfe des elektronischen Farbestimmungsgeräts Easyshade V

an der Studie teilzunehmen

Ich erkläre mich bereit, an der oben genannten Studie teilzunehmen. In einem Einzelgespräch wurde ich ausführlich und umfassend über Art, Bedeutung, Risiken und Konsequenzen der Studie informiert. Alle meine Fragen wurden zufriedenstellend beantwortet, ich kann jederzeit neue Fragen stellen. Ich habe auch den Text der Studieninformation gelesen und verstanden. Ich hatte viel Zeit, mich zu entscheiden. Ich bin mir bewusst, dass ich meine Einwilligung zur Teilnahme an der Studie jederzeit und ohne Angabe von Gründen (mündlich oder schriftlich) zurückziehen kann, ohne dass mir daraus Nachteile entstehen.

Ich bin damit einverstanden, dass meine studienbezogenen Gesundheitsdaten pseudonymisiert (d.h. verschlüsselt ohne Angaben von Name, Adresse, Initialen o.ä.) erhoben, auf Datenträgern gespeichert und durch den Auftraggeber der Studie ausgewertet werden. Die Weitergabe an Dritte (IMBEI- Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik), einschließlich der Veröffentlichung, erfolgt ausschließlich in anonymisierter Form, d.h. die Daten können nicht meiner Person zugeordnet werden.

Ich habe eine Kopie der Studieninformation und der Einwilligungserklärung erhalten, gelesen und verstanden.

Ort / Datum Name in Druckbuchstaben

Unterschrift des Patienten

Ich habe das Aufklärungsgespräch geführt und die Zustimmung des Teilnehmers eingeholt.

Ort / Datum Unterschrift des Behandlers

9. Tabellarischer Lebenslauf