

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

**Visueller und elektronischer Vergleich der Farbmuster des VITA Toothguide
3D-MASTER® und Bleachedguide 3D-MASTER®**

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

Vorgelegt von

Hannah Buchmeier
aus Hannover

Mainz, 2023

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. U. Förstermann

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 11.08.2023

Meinen Eltern und Großeltern in Liebe und Dankbarkeit

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	III
1. Einleitung	1
2. Literaturübersicht	3
2.1. Was ist Farbe?	3
2.1.1. Physikalische Aspekte	3
2.1.2. Physiologische Aspekte des Farbsehens	4
2.2. Farbsysteme	5
2.2.1. Das Farbsystem nach Munsell	6
2.2.2. CIE-Farbsysteme	7
2.2.3. CIEDE2000 Farbdifferenzformel	8
2.3. Interpretation des Farbabstandes (ΔE)	9
2.4. Farbbestimmung in der Zahnmedizin	10
2.4.1. Der visuelle Farbabgleich	10
2.4.2. VITA Farbskalen	10
2.4.3. Einflüsse auf die visuelle Zahnfarbbestimmung	12
2.5. Die instrumentelle Farbbestimmung	14
2.5.1. Easyshade® V	14
2.6. Ziel der Arbeit	15
3. Material und Methode	17
3.1. Probanden	17
3.2. Rahmenbedingungen und Materialien	17
3.3. Durchführung der visuellen Zuordnung	19
3.4. Messung der Koordinaten der Farbmuster	20
3.5. Auswertung	21
3.6. Statistische Methoden	22
4. Ergebnisse	26
4.1. Deskriptive Statistik	26
4.2. Messdaten des Easyshade® V im Testmodus	28
4.3. Zuordnungen der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben zu den Toothguide 3D- MASTER® Farben	29
4.4. Variation der Zuordnung	30
4.4.1. Unterschiede der Zuordnungen zwischen den Durchgängen	30
4.4.2. Herfindahl-Indices der Zuordnungen	30
4.5. Validität	32
4.5.1. Validität der Easyshade® V Farbangabe im Testmodus	32
4.5.2. Validität der Blechindex Angabe des Easyshade im Testmodus	34

4.6. Reliabilität	35
4.6.1. Intrarater-Reliabilität.....	35
4.6.2. Intrarater-Reliabilität nach Probandengruppen	37
4.6.3. Interrater-Reliabilität der einzelnen Durchgänge.....	38
4.7. Gibt es ein Hauptauswahlkriterium?	38
4.7.1. Multiple Lineare Regressionsmodelle	38
4.7.2. Vergleich der Zuordnungen in Bezug auf Farbton, Sättigung und Helligkeit	42
4.7.3. Korrelation zwischen Bleached-Index des Toothguide 3D-MASTER® und Auswahl der Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe	44
4.7.4. Bleached-Index: Multiples lineares Regressionsmodell.....	44
5. Diskussion.....	46
5.1. Methodendiskussion	46
5.1.1. Studiendesign	46
5.1.2. Visuelle Zuordnung	46
5.1.3. Instrumentelle Farbbestimmung.....	49
5.2. Ergebnisdiskussion.....	51
5.2.1. Zuordnung der Farbpaare	51
5.2.2. Validität der Messungen.....	53
5.2.3. Reliabilität.....	54
5.2.4. Einfluss der Farbkomponenten Helligkeit, Sättigung und Farbton	56
5.2.5. Gibt es ein Kriterium für die Auswahl der zugeordneten Bleachedguide 3D-MASTER® Farben?	59
5.2.6. Korrelieren der Bleached-Index und die Auswahl der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben?	60
6. Zusammenfassung	61
Literaturverzeichnis	63
Abbildungsverzeichnis	71
Tabellenverzeichnis	72
Anhang.....	73
Danksagung	85
Lebenslauf.....	86

Abkürzungsverzeichnis

3DM	VITA Toothguide 3D-MASTER®
ADA	American Dental Association
a*	CIE-Lab a* Koordinaten, Rot-Grün-Parameter
a'	CIEDE2000 a' Koordinaten, Rot-Grün-Parameter
AT	50/50 %-Akzeptanzschwelle
BLG	VITA Bleachedguide 3D-MASTER®
BI	Bleached-Index
b*	CIE-Lab b* Koordinaten, Gelb-Blau-Parameter
b'	CIEDE2000 b' Koordinaten, Gelb-Blau-Parameter
C* _{ab}	CIE-Lab Sättigung
C'	CIEDE2000 Sättigung
\bar{C}'	Arithmetisches Mittel der CIEDE2000 Sättigung von zwei Farbstimuli
CIE	Commission Internationale de l'Éclairage
CIE-Lab	Farbraum
CIEDE2000	Farbabstandsformel
CTM	Complete Tooth Measuring
DGZMK	Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
DIN	Deutsches Institut für Normung
ES	Easyshade® V
G	Schaltfunktion bei der Änderung von a*
h'	CIEDE2000 Farbtonwinkel
h _{ab}	CIE-Lab Farbtonwinkel
\bar{h}'	Arithmetisches Mittel der CIEDE2000 Farbtonwinkel von zwei Farbstimuli
HHI	Herfindahl-Index
ISO	International Organization for Standardization
K _L	Korrekturparameter für die Wahrnehmung der Helligkeit

K_C	Korrekturparameter für die Wahrnehmung der Sättigung
K_H	Korrekturparameter für die Wahrnehmung des Farbtons
L^*	CIE-Lab Helligkeit
L'	CIEDE2000 Helligkeit
\bar{L}'	Arithmetisches Mittel der CIEDE2000 Helligkeit von zwei Farbstimuli
M	Mittelwert
Max	Maximum
Min	Minimum
Me	Median
PT	50/50 %-Wahrnehmbarkeitsschwelle
R_C	Sättigungsabhängigkeit der Rotationsfunktion
R_T	Rotationsfunktion
S_C	Gewichtungsfunktion der Sättigung
S_H	Gewichtungsfunktion des Farbtons
S_L	Gewichtungsfunktion der Helligkeit
SM	Spot Measurement
SD	Standardabweichung
T	T-Funktion für Farbton-Gewichtung
TR	Technical Report
UV	Ultraviolett
$\Delta C'$	CIEDE2000 Sättigungsdifferenz
ΔE_{00}	CIEDE2000 Gesamtfarbdifferenz
ΔE_{ab}	CIE-Lab euklidische Gesamtfarbdifferenz
$\Delta H'$	CIEDE2000 Farbtondifferenz
$\Delta h'$	CIEDE2000 Farbtonwinkeldifferenz
$\Delta L'$	CIEDE2000 Helligkeitsdifferenz
$\Delta \theta$	Farbtonabhängigkeit der Rotationsfunktion

1. Einleitung

Gesunde, natürlich aussehende, aber auch helle Zähne sind immer mehr ein Ausdruck von Erfolg, Jugend, Attraktivität und Gesundheit. Patienten fordern heutzutage nicht nur die medizinisch bestmögliche Versorgung, sondern sind auch hinsichtlich der Ästhetik sehr anspruchsvoll [1]. Daher ist die ästhetische Zahnmedizin als Spezialisierung nicht mehr wegzudenken. Neben der Behandlung von Kiefer- und Zahnfehlstellungen sowie Rezessionen der Gingiva gehört auch die Zahnfarbe zu den wichtigen Aspekten der ästhetischen Zahnmedizin. Die Auswahl und Einstellung der korrekten Zahnfarbe ist damit ein wichtiger Faktor für die Patientenzufriedenheit. Um die gewünschte Zahnfarbe zu erreichen, können prothetische, konservierende und auch kosmetische zahnaufhellende Methoden verwendet werden. Unabdingbar für ein zufriedenstellendes Ergebnis ist eine möglichst exakte Zahnfarbnahme [2]. Zur Farbbestimmung stehen die visuelle und die elektronische Farbnahme zur Verfügung. Die visuelle Farbnahme mit industriell hergestellten Farbschlüsseln ist derzeit der Goldstandard. Weltweit werden der VITA classical® Farbschlüssel und der Toothguide 3D-MASTER® (beide VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co.KG, Bad Säckingen) am häufigsten verwendet [3, 4]. Der Toothguide 3D-MASTER® deckt jedoch die Farbvielfalt von menschlichen Zähnen im Vergleich umfassender ab und steigert damit den Erfolg einer korrekten Zahnfarbestimmung [5]. Des Weiteren wird dieser in jüngerer Zeit vermehrt bei der zahnärztlichen Ausbildung eingesetzt [6]. Die Zahnfarben des Toothguide 3D-MASTER® sind gleichmäßig in einem dreidimensionalen Farbraum angeordnet und decken die Parameter Helligkeit (L^*), Sättigung (C^*) und Farbton (h°) ab. Entsprechend der Lage im Farbraum sind die einzelnen Farbmusterzähne innerhalb des Farbrings angeordnet [7]. Neben der Bestimmung der Zahnfarbe für zahntechnische und zahnärztliche Restaurationen werden Farbringe ebenfalls bei Bleaching-Vorgängen zur Dokumentation des Behandlungsergebnisses und der Kommunikation mit dem Patienten verwendet. Da die dreidimensionale Anordnung des Toothguide 3D-MASTER® für diese Anwendung unpraktisch ist sowie die meisten anderen Farbschlüssel bei ihrer Farbauswahl nicht den Bereich für aufgehellte Zähne abdecken, wurden für die Beurteilung heller Zahnfarben spezielle Farbschlüssel entwickelt. Einer dieser Farbschlüssel ist der linear angeordnete Bleachedguide 3D-MASTER® der VITA Zahnfabrik H. Rauter und GmbH & Co. KG. Die Auswahl der Farbmusterzähne beruht auf den gleichen drei Parametern (Helligkeit, Sättigung, Farbton) wie bei dem Toothguide 3D-MASTER® [8]. Die Bezeichnungen der Farben sind zum einen als kategoriale Farbangaben gemäß des 3D-MASTER® Systems sowie als Bleached-Index angegeben. Mithilfe dieses Index kann die Veränderung der Farbe numerisch beschrieben werden, indem die Differenz zwischen Ausgangs- und Endfarbenindex gebildet wird. Bei der Farbauswahl in der Praxis und bei der Kommunikation mit dem zahntechnischen Labor

kommt jedoch eher der 3D-MASTER® Farbring zum Einsatz, da auch viele Restaurationsmaterialien an dieses System angepasst sind. Mit der instrumentellen Farbestimmungsmethode lassen sich diese Parameter für die jeweilige Zahnfarbe erfassen. Hierzu kann beispielsweise das spektrophotometrische Farbbestimmungssystem VITA Easyshade® V genutzt werden [9]. Die Farbbestimmung mit Spektrophotometern ist im Vergleich mit der visuellen Methode unabhängiger von den Umgebungsparametern und dem Betrachter. Studien zeigen eine hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Messungen [10-13]. Der Easyshade der Firma VITA Zahnfabrik H.Rauter GmbH & Co. KG ist in der Lage, die gemessene Farbe sowohl als VITA classical Wert, Toothguide 3D-MASTER® Bezeichnung und errechnete Mischfarben anzugeben. Zusätzlich können sowohl der Bleached-Index gemäß der American Dental Association als auch die Farbkoordinaten (a^* , b^* , L^* , C^* , h°) angezeigt werden. Um die elektronische Farbnahme immer weiter zu verbessern, strebt die Farbmeterik eine Objektivierung der Farbwahrnehmung sowie die numerische Bewertung der wahrgenommenen Farbunterschiede an [14]. Dazu wurden in den letzten Jahren auch die Messmethoden und Berechnungen der Farbunterschiede fortwährend verbessert. Die aktuellste Formel ist die CIEDE2000 [15, 16]. Zusätzlich zur instrumentellen Messung wird immer noch die visuelle Methode empfohlen, um ein optimales Ergebnis zu erzielen [17, 18]. Um Farbmuster bei der Farbbestimmung zu vergleichen, wurden bereits diverse Farbskalen im Hinblick auf ihre Verlässlichkeit und Reproduzierbarkeit untersucht. Meist diente eine elektronische Messung als Referenzkriterium [5, 19-21]. Ein direkter visueller und elektronischer Vergleich im Hinblick auf die Wahrnehmung von Bleached-Farben zweier Farbmusterringe des gleichen Systems wurde bisher nicht durchgeführt. Ziel dieser explorativen Arbeit ist daher der visuelle und instrumentelle Vergleich dieser beiden Farbringe: Es wird untersucht, inwieweit die einzelnen Farbmuster des Toothguide 3D-MASTER® und des Bleachedguide®-Systems als deckungsgleich empfunden werden.

Nullhypothese

Es gibt keinen Zusammenhang zwischen den Toothguide 3D-MASTER® Farben und den zugeordneten Bleachedguide®-Farben.

2. Literaturübersicht

2.1. Was ist Farbe?

Laut Definition ist Farbe die „mit dem Auge wahrnehmbare Erscheinungsweise der Dinge, die auf der verschiedenartigen Reflexion und Absorption von Licht beruht“ [22].

2.1.1. Physikalische Aspekte

Farbe kann nur in Gegenwart von Licht wahrgenommen werden [23]. Die Ausbreitung des Lichts im Raum lässt sich als Welle beschreiben. Trifft Licht auf Materie, lassen sich die daraus resultierenden Phänomene besser verstehen und erklären, wenn man sich das Licht als einen Strom von Energiepaketen (Photonen) vorstellt. Diese beiden Arten des Lichts werden unter dem Begriff Welle-Teilchen-Dualismus beschrieben [14]. Im Folgenden wird zur besseren Lesbarkeit immer nur von Licht als Welle gesprochen. Sichtbares Licht besteht aus elektromagnetischen Strahlen mit Wellenlängen (Energie) zwischen 380 und 760 Nanometer (nm) (Abb. 1). Diese werden von den Sinneszellen im Auge detektiert und die visuelle Information über das Gesehene an das Gehirn übermittelt. Erst dort wird dem Menschen diese Nervenerregung als Farbe bewusst [24, 25]. Dabei entspricht einer bestimmten Wellenlänge/Frequenz ein bestimmter Farbton [26].

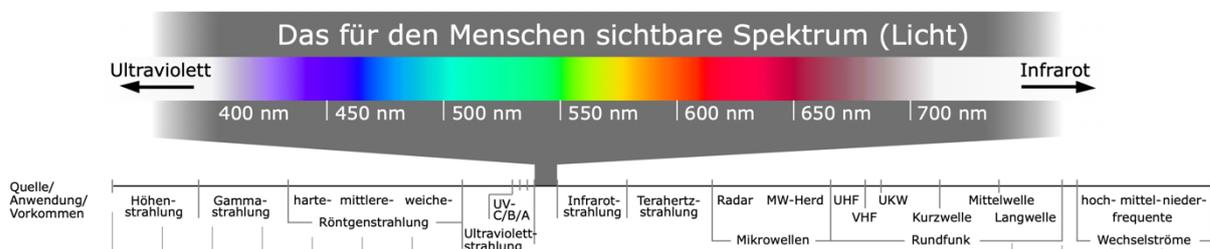


Abb. 1: Übersicht des elektromagnetischen Spektrums [27].

Die elektromagnetischen Wellen unterliegen den physikalischen Gesetzen der Streuung, Absorption, Interferenz und Brechung an Gegenständen unterschiedlichen Materials [24]. Dabei sind Streuung und Absorption die Hauptwechselwirkungen des Lichts beim Auftreffen und Durchlaufen von Gewebe und Biomaterialien [28]. Je nachdem, welche Wellenlängen reflektiert oder absorbiert werden, entsteht ein anderer Farbeindruck [26]. Bei vollständiger Absorption erscheint der Gegenstand „schwarz“. Werden alle Wellen reflektiert, entsteht der Farbeindruck „Weiß“. Welcher Anteil des Lichts reflektiert wird, ist abhängig von der Zusammensetzung des angeleuchteten Gegenstandes, sprich der Dichte, der molekularen Struktur und der Oberfläche [29]. Die Wahrnehmung von Farben an sich ist jedoch kein rein physikalisches Phänomen, sondern eher das Resultat der kognitiven Prozesse unseres Gehirns [14].

2.1.2. Physiologische Aspekte des Farbsehens

Das Sehen ist der wichtigste Fernsinn des Menschen. Der adäquate Reiz für das Sehen sind elektromagnetische Wellen im Bereich von 400 nm bis 750 nm. Außerhalb dieses Bereiches ist die Strahlung für uns Menschen nicht sichtbar, kann aber Auswirkungen auf den Körper haben [14, 30, 31]. Fällt Licht in das Auge, durchläuft es den sogenannten dioptrischen Apparat bis zur Netzhaut. Beim Durchlaufen von Kornea (Hornhaut), den beiden mit Kammerwasser gefüllten Augenkammern, der Augenlinse umgeben von der Linsenkapsel und dem Glaskörper wird das Licht im Sinne einer Sammellinse mehrfach gebrochen (Abb. 2). Es entsteht ein verkleinertes und umgekehrtes Bild [32].

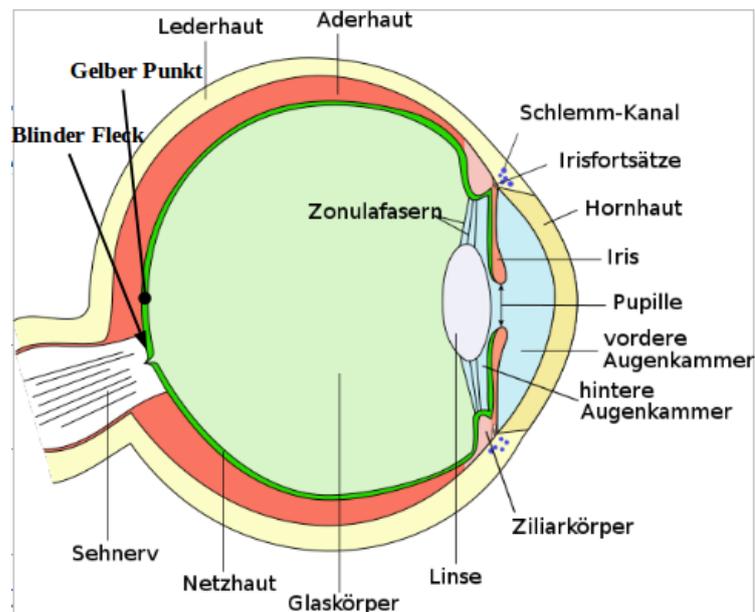


Abb. 2: Längsschnitt durch den Augapfel [33].

Der Aufbau der Netzhaut ist sehr komplex. Es gibt bis zu 60 verschiedene Nervenzelltypen. Der inverse Aufbau der Netzhaut hat zur Folge, dass das Licht erst alle Schichten durchlaufen muss, bis es auf die Rezeptoren trifft. Im Anschluss wird eine Kaskade der Informationsweitergabe ausgelöst, die im Gehirn zu einer Wahrnehmung umgewandelt wird. Es wird zwischen verschiedenen Arten des Sehens anhand der Leuchtdichte, bei der die beiden Photorezeptortypen (Stäbchen und Zapfen) auf der Netzhaut angesprochen werden (Duplizitätstheorie des Sehens), differenziert. Beim skotopischen Sehen, auch Nachtsehen genannt, sind die lichtempfindlicheren Stäbchen aktiv. Zapfen sind lichtunempfindlicher als Stäbchen und benötigen für eine Reaktion eine ausreichende Beleuchtungsstärke. Daher sind sie vor allem am Tag für das phototropische Sehen verantwortlich. Es können Farben und auch Hell-Dunkel Kontraste nebeneinanderliegender Objekte wahrgenommen werden [30, 32]. Das Auge ist im grün-gelben Wellenlängenbereich am empfindlichsten. Bei der Anpassung (Adaption) des Auges an helles Umgebungslicht (z. B. Sonnenschein) liegt das Absorptionsmaximum bei 555 nm, beim Dämmerungssehen (z. B. Mondschein) ist das Maximum in den

kürzeren Wellenlängenbereich verschoben (510 nm) [14]. An dieser unterschiedlichen Spezialisierung ist erkennbar, dass Lichtquelle und Helligkeit eine wichtige Rolle beim Farbsehen spielen [30, 32]. Die circa 120 Millionen Stäbchen und die etwa sechs Millionen Zapfen sind gegensätzlich auf der Netzhaut angeordnet. Die Rezeptordichte der Zapfen ist um die Fovea centralis, eine kleine Einsenkung am hinteren Pol des Auges, mit $140000/\text{mm}^2$ am höchsten. Hier ist meist auch der Schnittpunkt der optischen Achse des Auges mit der Netzhaut und somit bei Tag die Stelle des schärfsten Sehens [34]. Der Bereich hat einen Durchmesser von circa 1,5 mm. Stäbchen befinden sich vermehrt in der Peripherie und um den Austrittspunkt des Nervus opticus. Es gibt drei verschiedene Zapfentypen. Licht in einem bestimmten Wellenlängenbereich löst beim entsprechenden Zapfen einen stärkeren Reiz aus als bei den übrigen. Je nachdem, wie stark die unterschiedlichen Zapfentypen gereizt werden, entsteht ein Absorptionmuster, welches im nachgeschalteten Sehsystem verrechnet wird und so die Information über die Wellenlänge und somit über die wahrgenommene Farbe entsteht. Diesen Vorgang der Umwandlung eines Lichtreizes in ein elektrisches Signal wird als Phototransduktion bezeichnet [30, 32, 34, 35]. Nachdem die erste Signalverarbeitung innerhalb der Retina stattgefunden hat, schließen sich die Axone der Ganglien zum Nervus opticus zusammen und verlassen über die Papilla nervi optici („blinder Fleck“) zusammen mit Arteria und Vena centralis den Bulbus. Erst die Verarbeitung im Gehirn ermöglicht die Benennung der Farbe und die Verbindung mit dem limbischen System gibt den Farben eine emotionale Bedeutung. Um eine optimale optische Wahrnehmung der Oberflächenfarbe und der Farbkontraste sowie die bestmögliche Objekterkennung zu erreichen, ist die koordinierte Zusammenarbeit aller Hirnareale vonnöten [36]. In die physiologischen Prozesse kann der Mensch nicht willentlich eingreifen, jedoch ist es durch reflexive Prozesse möglich, unvollständige visuelle Informationen mit Erfahrungen und den daraus resultierenden Informationen zu ergänzen. Wir haben also ein Farbgedächtnis und verbinden bestimmte Gegenstände mit einer bestimmten Farbe, an die wir uns erinnern können [37].

2.2. Farbsysteme

Mit der systematischen Ordnung von Farben beschäftigt sich die Farblehre. Dazu gehören die Erforschung der Entstehung des Farbreizes, Prinzipien der Farbmischung, Gliederung der Farben in mathematischen Systemen und die Farbvalenzmetrik [25]. Die Farbmetrik oder auch Kolorimetrie versucht, die verschiedenen Farbempfindungen unterschiedlicher Menschen zu quantifizieren und vergleichbar zu machen [14].

2.2.1. Das Farbsystem nach Munsell

Das bis heute am weitesten verbreitete Farbsystem entwickelte der amerikanische Maler Albert Munsell, welches er zuerst als Farbkugel, später im Jahr 1915 als dreidimensionalen Farbraum (Abb. 3) veröffentlichte. Ihm war dabei der als gleichmäßig empfundene Farbabstand und nicht die rein physikalische Einteilung wichtig. Den Stamm des Farbaumes stellen die verschiedenen Graustufen von Weiß bis Schwarz in elf Schritten dar. Diese Abstufung wird als Helligkeit (Value) beschrieben und reicht von 10 ideales Weiß bis 0 ideales Schwarz. Um die Achse liegt ein horizontaler Ring, der aus 40 im empfindungsgemäß gleichen Abstand angeordneten Farben besteht. Zunächst ordnete Munsell die fünf Grundfarben (Hue) Rot, Gelb, Grün, Blau und Purpur im als gleichmäßig empfundenen Abstand um die Achse. Er unterteilte diesen Kreis aus den Grundfarben weiter, indem er jeweils fünf Mischfarben aus den jeweils benachbarten Grundfarben hinzufügte, sodass schließlich ein vierzigteiliger Farbkreis entstand. Der Abstand des Kreises zum „Stamm“ bestimmt die Sättigung/Intensität (Chroma). Je näher der Kreis zu den Graustufen liegt, desto geringer ist die Sättigung und umgekehrt. Chroma 0 würde so farblos bzw. grau bedeuten. Die zehn Hauptfarben sind als Chroma Stufe 5 eingestuft. Durch die Einteilung der Farben auf der Grundlage der menschlichen Wahrnehmung ist der Munsell-Farbkörper nicht symmetrisch. Die Sättigung (Chroma) ist nicht für alle Farbtöne gleich verteilt. Gelbe Nuancen und Unterschiede werden im hellen Bereich stärker wahrgenommen als beispielsweise blaue. Im Gegensatz dazu können bei blauen Farbtönen im dunkleren Bereich mehr Abstufungen der Sättigung wahrgenommen werden. Mit den drei Werten für Hue, Chroma und Value lassen sich Farben genau beschreiben [38-40].

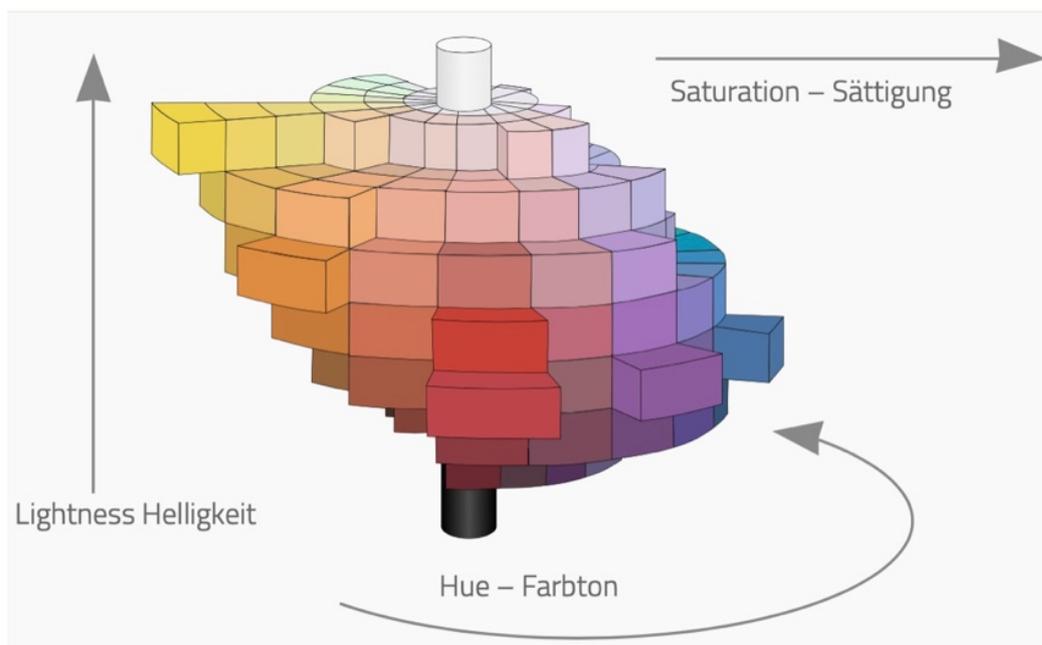


Abb. 3: Der Munsell-Farbkreis entsprechend der Wahrnehmung des menschliche Auges [41].

2.2.2. CIE-Farbsysteme

Die Farbwahrnehmung eines Gegenstandes ist abhängig von dessen Oberflächenstruktur, der Lichtquelle und auch vom Betrachter [28]. Obwohl das Auge sehr sensitiv ist und gut zwischen Farben differenzieren kann, ist es nicht in der Lage einen quantitativen Abstand von Farbunterschieden anzugeben [42]. Um die Kommunikation über Farbe zu vereinfachen und auch Differenzen zwischen Farben mit standardisierten Werten angeben zu können, wurden verschiedene Systeme entwickelt. Das 1976 von der Internationalen Beleuchtungskommission vorgestellte dreidimensionale CIE $L^*a^*b^*$ -System setzte sich durch. Seit Juli 2011 ist dieses Farbmodell in der EN ISO 11664-4. „Farbmetrik-Teil 4: CIE 1976 $L^*a^*b^*$ Farbraum“ genormt [16]. Es deckt alle vom menschlichen Auge wahrnehmbaren Farben ab [43]. Dabei handelt es sich um ein modifiziertes kartesisches Koordinatensystem (Abb. 4a), indem der Farbraum als modifiziert sphärischer Kubus dargestellt wird [28]. Die vertikale Achse L^* korreliert mit der Wahrnehmung der Helligkeit und reicht von idealem Weiß ($L^* = 100$) bis zu idealem Schwarz ($L^* = 0$). Sie steht senkrecht auf der transversalen und sagittalen Achse. Die transversale Achse reicht von Grün ($a^* = -128$) bis Rot ($a^* = +127$). Die sagittale Achse spannt sich zwischen den Farben Gelb ($b^* = +127$) und Blau ($b^* = -128$) auf. Bei den Farben auf einer Achse handelt es sich jeweils um Gegenfarben und sie können nicht gleichzeitig bei einer Farbstimulation wahrgenommen werden [44]. Der Wert 0 von a^* und b^* entspricht einer achromatischen Wahrnehmung wie Grau, Schwarz und Weiß. Der maximale Wert ist abhängig von den physikalischen Eigenschaften des Materials [28, 39]. Für jede Farbe kann so ein genauer Ort im Koordinatensystem definiert werden. Damit ist es auch möglich, den Abstand zweier Farben geometrisch zu messen und zu errechnen. Dabei wird der euklidische Gesamtfarbabstand ΔE_{ab} zwischen zwei Farben $(L^*, a^*, b^*)_x$, $(L^*, a^*, b^*)_y$ wie folgt berechnet [16]:

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

Eine Abwandlung dieses Schemas ist das im polaren Koordinatensystem beschriebene CIE $L^*C^*h^\circ$ -System (Abb. 4b). Der L^* -Wert für die Helligkeit wird aus dem CIE $L^*a^*b^*$ -System übernommen. Anstelle der a^* - und b^* -Werte werden der Farbtonwinkel (Hue) h° und der Abstand zum Ursprung (Chroma) verwendet. Da die Farbverteilung in beiden Farbräumen gleich ist, können die polaren Koordinaten C^* und h° wie folgt berechnet werden [45]:

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

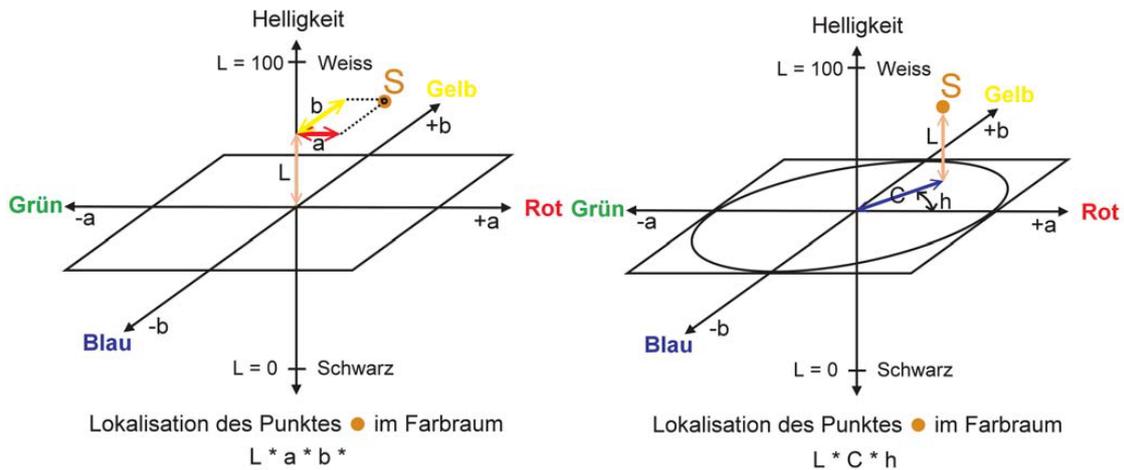


Abb. 4: a) $L^*a^*b^*$ -Farbraum und b) $L^*C^*h^\circ$ -Farbraum [45].

2.2.3. CIEDE2000 Farbdifferenzformel

Ein gleichmäßiger, nahezu uniformer Abstand zwischen Farben wie beim CIE $L^*a^*b^*$ -Farbraum entspricht nicht den wirklich wahrnehmbaren Differenzen zwischen Farbstimulationen. Deshalb wurde die Farbdifferenzformel zur Berechnung von ΔE_{ab} modifiziert und weiterentwickelt: Die CIEDE2000 Farbdifferenzformel wurde im Jahr 2001 von der CIE veröffentlicht und ist damit die modernste mathematische Farbdifferenzformel [46]. Die Formel beruht auf experimentellen Farbdifferenzdaten und wurde erstmals von Luo, Cui und Rigg beschrieben [47]. Diese ist deutlich komplizierter und berücksichtigt auch die $L^*C^*h^\circ$ -Koordinaten [28]. Die CIEDE2000 Formel verbessert die Korrelation zwischen der mathematischen Beschreibung des Farbabstandes im CIE $L^*a^*b^*$ -Farbraum und dem wahrgenommenen Abstand, wie er der menschlichen Empfindung entspricht [46]. So stimmt die CIEDE2000 Formel in 95 % der Fälle mit der visuellen Empfindung überein und die CIE $L^*a^*b^*$ nur in 75 % der Fälle [48]. Diese verbesserte Annäherung an die Empfindung wird ermöglicht durch Korrektur-Variablen, welche die Wahrnehmung der Farbe abhängig von ihrer Helligkeit (Lightness), ihrer Sättigung (Chroma) und ihrem Farbton (Hue) sowie der Wechselwirkung zwischen Sättigung und Farbton widerspiegeln [46].

Da die Formel auf dem CIE $L^*a^*b^*$ -Farbraum basiert, lassen sich auch deren Koordinaten L^* , a^* und b^* für die CIEDE2000 Formel verwenden. Um sie für die endgültige Formel nutzen zu können, müssen diese in L^* , C^* und h° Koordinaten umgewandelt werden. Beispielsweise wird die a^* -Achse um einen Skalierungsfaktor verändert, um die Farbabstände bei Neutralfarben (grauer Bereich) zu verbessern. Des Weiteren sorgt die Rotationsfunktion für eine verbesserte Gleichabständigkeit im blauen Bereich [47]. Die Gewichtungsfunktionen (S_L , S_C , S_H) korrigieren die Änderungen der Sensitivität des visuellen Systems bei der Veränderung der Location des zu vergleichenden Farbpaares innerhalb des CIE $L^*a^*b^*$ -Farbraumes [49]. Die Parameter K_L ,

K_C und K_H wurden eingefügt, um Änderungen der Sensitivität des Betrachters in Bezug auf Helligkeit, Farbton und Sättigung zu kompensieren [49, 50].

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

In der Literatur wird jedoch noch häufig die CIE L*a*b*-Differenzformel verwendet. Auch die DIN ISO/TR 2864 für Farbschlüssel in der Zahnmedizin nimmt hierauf Bezug [28, 51-54]. Dabei zeigen neuere Studien, dass die CIEDE2000 Formel die Farbwahrnehmung von Probanden besser widerspiegelt und für Studien im zahnmedizinischen Bereich verwendet werden sollte [52, 55]. Deshalb wird auch in der vorliegenden Studie zusätzlich die CIEDE2000 Farbdifferenzformel verwendet. Aufgrund der anspruchsvollen und komplizierten Formel wurde in dieser Arbeit das von Sharma, Wu und Dalal bereitgestellte Programm für Excel zur Berechnung verwendet [15].

2.3. Interpretation des Farbabstandes (ΔE)

Es lässt sich zwischen der Wahrnehmungs- und der Akzeptanzschwelle für eine Farbdifferenz unterscheiden. Wahrnehmungsschwelle bedeutet, dass bei dieser Farbdifferenz (ΔE) 50 % der Probanden den Farbunterschied zwischen zwei Proben wahrgenommen haben und 50 % nicht. Akzeptanzschwelle bedeutet, dass 50 % der Probanden die Farbkombination als passend akzeptiert haben und 50 % nicht [54]. Häufig werden auch die Begriffe 50/50 %-Wahrnehmbarkeitsschwelle (PT) bzw. 50/50 %-Annehmbarkeitsschwelle (AT) verwendet. Hierzu gibt es eine Reihe von Studien, welche Paravina et al. in einem Review zusammenfassten. Es ergaben sich folgende Werte für ΔE (CIE L*a*b*/CIEDE2000) [56]:

Tab. 1: Übereinstimmung von Farben anhand der Farbdifferenzen [28, 56, 57].

Qualität der Übereinstimmung	ΔE_{ab}	ΔE_{00}
Sehr gut, Wert liegt unterhalb PT	$\leq 1,2$	$\leq 0,8$
Akzeptabel, Werte liegen zwischen PT und AT	$> 1,2 \leq 2,7$	$0,8 \leq 1,8$
Moderat, nicht übereinstimmende Werte liegen oberhalb AT	$> 2,7 \leq 5,4$	$> 1,8 \leq 3,6$
Klar nicht übereinstimmend	$> 5,4 \leq 8,1$	$> 3,6 \leq 5,4$
Extrem nicht übereinstimmend	$> 8,1$	$> 5,4$

2.4. Farbbestimmung in der Zahnmedizin

Der Erfolg von restaurativen und prothetischen zahnärztlichen Versorgungsmöglichkeiten hängt zu einem wesentlichen Teil von einer exakten Farbbestimmung ab. Dazu stehen die visuelle und die instrumentelle Farbnahme als Methoden zur Verfügung. Die visuelle Auswahl der Zahnfarbe mit industriell hergestellten Farbmustern ist heutzutage der Goldstandard [58]. Die Farbbestimmung mit optoelektronischen Geräten soll Einflüsse durch die Umgebung oder den Behandler auf ein Minimum reduzieren und so genauere und reproduzierbare Ergebnisse liefern.

2.4.1. Der visuelle Farbvergleich

Die visuelle Zahnfarbbestimmung erfolgt mithilfe von standardisierten Farbmusterringen und Farbmusterstäbchen. Die Farbmuster sind meist aus Kunststoff oder Keramik gefertigt und gleichen in Form und Größe einem mittleren oberen Schneidezahn. Die Farbmuster eines Farbring sind, je nach Hersteller, unterschiedlich angeordnet. Sie lassen sich einzeln entnehmen und entsprechend am Zahn ausrichten [59]. Die zur Verfügung stehenden Farbmuster decken den gesamten Zahnfarbraum nicht vollständig ab. Aufgrund der großen Variation der menschlichen Zahnfarbe kann also immer nur näherungsweise eine Farbe einem Zahn zugeordnet werden [60-64].

2.4.2. VITA Farbskalen



Abb.5: VITA classical® Farbring.

da sich bei jedem Schritt die Auswahlmöglichkeiten verringern. Durch die uniforme Anordnung der Farben im ganzen Zahnfarbraum und ihre dementsprechende mathematische Definition lassen sich Zwischenfarben für die Helligkeitsstufen und die Farbintensität über Verbindungsgeraden zwischen den Ursprungsfarben exakt bestimmen [7, 18, 26, 28, 65, 68]. Eine Weiterentwicklung in der VITA 3D-MASTER® Farbringfamilie war der VITA Bleachedguide 3D-MASTER® (Abb. 7), der speziell für die Planung und Kontrolle bei Bleaching-Prozessen entwickelt und dafür auch von der American Dental Association (ADA) anerkannt wurde. Er besteht aus 15 Farbmustern und ist nach den Grundsätzen des Toothguide 3D-MASTER® aufgebaut. Die Farbmuster sind nach den 29 definierten Farbhelligkeitsstufen der ADA geordnet. Für alle Muster wurde der mittlere neutrale Farbton (M) gewählt. Um eine bessere Kommunikation zwischen Patient und Zahnarzt zu ermöglichen, wurde zusätzlich zu den normalen Toothguide 3D-MASTER® Farbbezeichnungen eine numerische Bezeichnung hinzugefügt (1-29) [28].



Abb. 7: VITA Bleachedguide 3D-MASTER®.

2.4.3. Einflüsse auf die visuelle Zahnfarbbestimmung

Für die klinische visuelle Zahnfarbbestimmung sollten bestimmte Bedingungen eingehalten werden, um Einflüsse der Umgebung so gering wie möglich zu halten. Als Lichtquelle ist eine Tageslichtlampe (D65) zu wählen, die im 45° Winkel zur Oberfläche des Zahns auszurichten ist [62, 65, 70]. Um Kontrastphänomene zu vermeiden, ist ein neutraler grauer Hintergrund zu bevorzugen. Daher sollten die intensive Farbgebung von Bildern und Möbeln, der Kleidung vom Zahnarzt oder Zahntechniker und Patienten sowie starkes Make-up von Patientinnen (v. a. Lippenstift) vermieden werden. Zur Vorbeugung von Ermüdung sollte die Betrachtungsdauer maximal fünf bis sieben Sekunden betragen. Vor einer erneuten Abmusterung sollte eine Pause von mindestens zehn Sekunden eingehalten werden [62]. Als weiterer Einfluss ausgehend von der Beleuchtung ist das Phänomen der Metamerie zu nennen, welches auch

bei zahnärztlichen Restaurationen eine wichtige Rolle spielt [62, 71]. Die Metamerie ist ein Effekt, bei dem einerseits unterschiedliche Lichtquellen mit verschiedenen Spektren (Wellenlängen) den gleichen Farbreiz eines angeleuchteten Objekts auslösen können. Andererseits können zwei Objekte mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften unter einer spektralspezifischen Lichtquelle als gleich wahrgenommen werden und unter Licht mit einer anderen Zusammensetzung der Wellenlängen differente Farbvalenzen auslösen [72].

Die betrachterabhängigen Faktoren sind vielfältig und individuell. Alter, Erfahrung, Ermüdung der Augen, Stimmung, Sehvermögen und Farbsehschwächen, Medikamente, Blickwinkel, Erkrankungen, Geschlecht und die verwendete Farbskala spielen eine Rolle [26, 28, 73]. Daher ist die visuelle Farbbestimmung als sehr subjektiv anzusehen.

2.5. Die instrumentelle Farbbestimmung

Das Ziel der instrumentellen Farbbestimmung in der Zahnmedizin ist, die Subjektivität des Betrachters, den störenden Einfluss der Umgebung (z. B. Lichtverhältnisse) oder Unzulänglichkeiten der Farbmusterskalen auszuschalten, um eine exakte und vor allem reproduzierbare Farbbestimmung zu erreichen [74, 75]. Dazu versuchen die Farbbestimmungssysteme das menschliche Auge zu imitieren und gleichzeitig optische Täuschungen auszuschalten [26, 28]. Es können Spektralphotometer [10, 76], Kolorimeter [76], Spektralradiometer [77], digitale Kameras [10, 19, 28, 78] und Intraoralscanner [20] zur Zahnfarbbestimmung verwendet werden. Zudem können Farbmessgeräte in Flächen- und Punktmessgeräte unterschieden werden. Durch eine optische Blendenöffnung wird die Messfläche von Punktmessgeräten auf circa 3 mm² begrenzt [26]. Der Messkopf des Easyshade V hat einen Messkopfdurchmesser von 5mm. Der eigentliche Messfleck hat einen Durchmesser von 2,5mm. Dies entspricht einer effektiven Messfläche von 4,9 mm² [79]. Im Vergleich dazu beträgt die Fläche eines durchschnittlichen oberen mittleren Frontzahns 80-100 mm². Die Farbbestimmung erfolgt also nur auf einer kleinen Fläche. Flächenmessgeräte hingegen messen die gesamte vestibuläre Oberfläche des Zahns [26].

2.5.1. Easyshade® V



Abb. 8: VITA Easyshade® V auf der Ladestation mit integriertem Kalibrierblockhalter.

Der in dieser Arbeit verwendete VITA Easyshade® V (Abb. 8) ist ein Spektralphotometer in Form eines Punktmessgeräts. Vom Gerät ausgesendetes standardisiertes Licht trifft auf das

Objekt und wird reflektiert. Dieser Anteil (Remissionsspektrum) wird gemessen, analysiert und anschließend mit dem Wellenlängenspektrum vorgegebener Referenzfarben verglichen. Die Farbe mit der größten Übereinstimmung wird in der Benennung des ausgewählten Farbring-systems ausgegeben [44, 80, 81]. Der VITA Easyshade[®] V ist das neueste Modell der VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG [82]. Dabei handelt es sich um eines der populärsten portablen Punktmessgeräte zur Bestimmung der Zahnfarbe, die in der Zahnarztpraxis sowie im zahntechnischen Labor zum Einsatz kommen [28].

Für die unterschiedlichen Anwendungsbereiche des Easyshade gibt es verschiedene Farbmessmodi, unter anderem die Grundfarbenbestimmung. Dabei wird die Farbe durch eine einzelne Messung ermittelt. Die gemessenen Zahnfarben können im 3D-MASTER[®] oder Classical-Schema angezeigt werden. Außerdem ist eine Anzeige des Bleached-Index gemäß der American Dental Association der gemessenen Farbe möglich.

In der vorliegenden Arbeit wurde der Trainingsmodus verwendet. Der Modus dient dem Erlernen der Handhabung des Messgeräts. In der Bedienungsanleitung für den VITA Easyshade[®] V wird darauf hingewiesen, dass „das Messen anderer Farbringe oder anderer Farbmuster zu abweichenden Ergebnissen führen kann“. Aufgrund der geringen Far-bunterschiede und der natürlichen Farbvariationen der Farbmuster ist es bei einigen Farben schon bei geringen Änderungen des Messvorgangs möglich, dass eine andere nächstgele-gene „Nachbarfarbe“ angezeigt wird. Eine Messung von Farbmustern ist nur im Trainingsmo-dus möglich, da alle Messdaten vom Messmodus beeinflusst werden [9].

Der Easyshade[®] V wurde im Laufe der letzten Jahre in einigen Studien mit anderen (dentalen) Farbmessgeräten verglichen. Die Reproduzierbarkeit wurde in den meisten Studien als gut bis sehr gut bewertet [11, 83-85]. Außerdem dienten die Messungen mit dem Easyshade[®] V in verschiedenen Studien als Referenz bei der Zahnfarbbestimmung [84, 85]. Aus diesem Grund werden auch in der vorliegenden Studie die instrumentellen Referenzmessungen mit dem Easyshade[®] V durchgeführt. Es ist wichtig zu beachten, dass die Reproduzierbarkeit von Mes-sergebnissen ein Maß für die Genauigkeit und Verlässlichkeit der Methode ist. Die Gültigkeit des Messergebnisses ist davon jedoch unabhängig [35, 86].

2.6. Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit soll überprüft werden, inwiefern die 29 Farbmuster der beiden Farbschlüssel Toothguide 3D-MASTER[®] (21 Muster) und Bleachedguide 3D-MASTER[®] (sieben Muster) visu-ell einander zugeordnet werden, d. h. werden einzelne Farbmuster der beiden Farbschlüs-selsysteme von den Probanden häufiger einander zugeordnet als andere Farbmuster? Es soll für jede Toothguide 3D-MASTER[®] Farbe eine korrespondierende Bleachedguide 3D-MAS-TER[®] Farbe benannt werden. Gleiche Farben wurden zuvor aussortiert. Des Weiteren sollen

die Farbmuster mit dem digitalen Farbbestimmungssystem Easyshade® V untersucht und mit der visuellen Auswahl verglichen werden.

Die Nullhypothese lautet, dass kein Zusammenhang zwischen den Toothguide 3D-MASTER® Farben und der jeweils zugeordneten Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe besteht

Zur Beantwortung der Zielfragestellung und da es sich um eine explorative Studie handelt, sollen weitere Aspekte mithilfe statistischer Analyse untersucht werden:

- 1) Welche Toothguide 3D-MASTER® Farben wurden welchen Bleachedguide-Farben wie oft zugeordnet? Gab es Farben, die eindeutiger zugeordnet wurden als andere? Welche Koordinatenabstände und Gesamtfarbabstände ergaben sich aus dieser Zuordnung? Welche der zugeordneten Farbpaare waren nach DIN ISO/TR 28642 akzeptabel?
- 2) Überprüfung der Validität der Messungen im Testmodus: Stimmen die gemessenen kategorialen Farben und der Bleached-Index mit den Farb- und Indexangaben des Herstellers überein?
- 3) Wie hoch war die Interrater-Reliabilität in Abhängigkeit von Durchgang, Geschlecht, Alter und Brille?
- 4) Gibt es ein Kriterium für die Auswahl der zugeordneten Bleachedguide Farbe? Korreliert der Bleached-Index des Toothguide 3D-MASTER® mit der Auswahl der Bleachedguide Farbe? Wie hängt der gemessene Bleached-Index mit den Koordinaten der Toothguide 3D-MASTER® Farben zusammen?

3. Material und Methode

3.1. Probanden

Alle Probanden dieser Studie waren approbierte Zahnärzte. Durch persönliche Anfragen in der Klinik und den Polikliniken für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten wurden die Teilnehmer der Studie rekrutiert. Die Aufklärung über Inhalt und Ablauf der Studie erfolgte mündlich und schriftlich. Informationen zu der Studie und Einverständniserklärung wurden den Probanden schriftlich oder, falls gewünscht, per E-Mail ausgehändigt. Durch die persönlichen Anfragen konnten vorab die Einschlusskriterien überprüft werden:

- a. Approbierter Zahnarzt/Zahnärztin
- b. Farbsehtüchtigkeit von Proband/in bestätigt

Ausschlusskriterien waren:

- a. Kein approbierter Zahnarzt/Zahnärztin
- b. Farbsehuntüchtigkeit von Proband/in angegeben

Keine Approbation als Zahnarzt oder Zahnärztin sowie die Angabe der Probanden, sie seien farbuntüchtig, führten zum Ausschluss von der Studie. Die Tabelle für die visuelle Zuordnung wurde von der Doktorandin ausgefüllt. Dabei wurden Alter, Geschlecht und ggf. das Tragen einer Brille notiert. Diese musste zu jedem Termin getragen werden. Des Weiteren wurde jedem Probanden eine Nummer zugewiesen und auf dem Auswertungsbogen notiert. In einer separaten Liste wurden diese Nummern den Namen der Probanden durch die Doktorandin zugeordnet. Die Anzahl der Probanden betrug 52. Er ergab sich folgende Probandenkonstellation: 31 weibliche Probanden und 21 männliche Probanden, davon 16 Brillenträger.

Tab. 2: Altersverteilung der Probanden.

Alter	Anzahl der Probanden
< 25	3
25-29	22
30-34	20
> 35	7

3.2. Rahmenbedingungen und Materialien

Die Studie (Antragsnummer: 2020-15225) wurde seitens der Ethikkommission der Landesärztekammer Rheinland-Pfalz genehmigt. Die Probanden saßen an einem höhenverstellbaren Stuhl mit einem Abstand von circa 50 cm zur Tischoberfläche unter einer Tageslichtlampe mit einer Farbtemperatur von 5000 Kelvin. Die Beleuchtungsstärke am Ort der Betrachtung lag

bei ca. 2000 Lux. Die verwendete Tageslichtlampe war mit einer Neigung von 45 Grad zur im neutralen Grau gestrichenen Wand ausgerichtet. Der Tisch war mit neutral grauem Karton in der Gesamtgröße 40 cm x 25 cm ausgelegt. Einfallendes Licht von draußen wurde mit einem Verdunkelungsrollo ausgeschlossen. Wochentage und Tageszeiten der Durchgänge variierten sowohl unter den verschiedenen Probanden als auch bei den einzelnen Probanden.

Tab. 3: Materialien zur Studiendurchführung.

Instrumente und Geräte	Hersteller
VITA Easyshade® V Seriennummer: H50387 100-240 Volt	VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland
Tageslichtlampe Color Control Professional 5000 Maße: 100 x 70 cm Lichttemperatur: 5000 Kelvin Beleuchtungsstärke: 2000 Lux	Just Normlicht, Weilheim, Deutschland
VITA Toothguide 3D-MASTER®	VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland
VITA Bleachedguide 3D-MASTER®	VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland
2 Graukarten 18%iges Grau jeweils 20 cm x 25 cm	Ares Foto, Tübingen, Deutschland
Instrumentenringe grau, lila	Henry Schein Dental Deutschland GmbH, Langen, Deutschland
Notebook Asus F553SA-XX124T	ASUSTeK COMPUTER INC., Taipeh, Taiwan
MacBook Pro® 2018	Apple Inc., Cupertino, USA
Helper-Software	VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland
Excel®	Microsoft Corporation, Redmond, USA

Word®	Microsoft Corporation, Redmond, USA
EndNote™ X9.3.2	Clarivate Analytics™, London, Großbritannien
SPSS® Statistics Version 27	IBM Deutschland GmbH, Ehningen, Deutschland
R Studio® Version 1.4.1106	R-Tools Technology Inc., Richmond Hill, Kanada

3.3. Durchführung der visuellen Zuordnung

Der Toothguide 3D-MASTER® und der Bleachedguide 3D-MASTER® waren beide original verpackt und unterlagen keiner Vorauswahl. Die Farbschlüsselzähne mit Haltestiften wurden aus den Halterungen gelöst. Farben, die sowohl beim Toothguide 3D-MASTER® als auch beim Bleachedguide 3D-MASTER® vorkommen, wurden aussortiert: 0M1, 1M1, 1M2, 2M2, 3M2, 4M2, 5M2, 5M3. Die auf den Haltestiften eingravierten Farbmusterbezeichnungen wurden mit je zwei Instrumentenringen aus Kunststoff abgedeckt. Dabei wurden die Farbmuster des Bleachedguide 3D-MASTER® mit grauen, die des Toothguide 3D-MASTER® zur Unterscheidung mit dunkellila Ringen versehen. Die Farbschlüsselzähne wurden so in zwei separate Schüssel aufgeteilt, wobei es innerhalb der Schüssel keine Sortierung gab. Die Probanden bekamen die Aufgabe, die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbmusterzähne den Toothguide 3D-MASTER® Farbmusterzähnen zuzuordnen, je nachdem, was sie als ähnlich empfanden. Es musste jeder Toothguide 3D-MASTER® Farbe eine Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe zugeordnet werden. Die Toothguide 3D-MASTER® Farben durften nicht untereinander verglichen werden. Die zugeordneten Muster sollten in Gruppen zusammengelegt werden (Abb. 9).

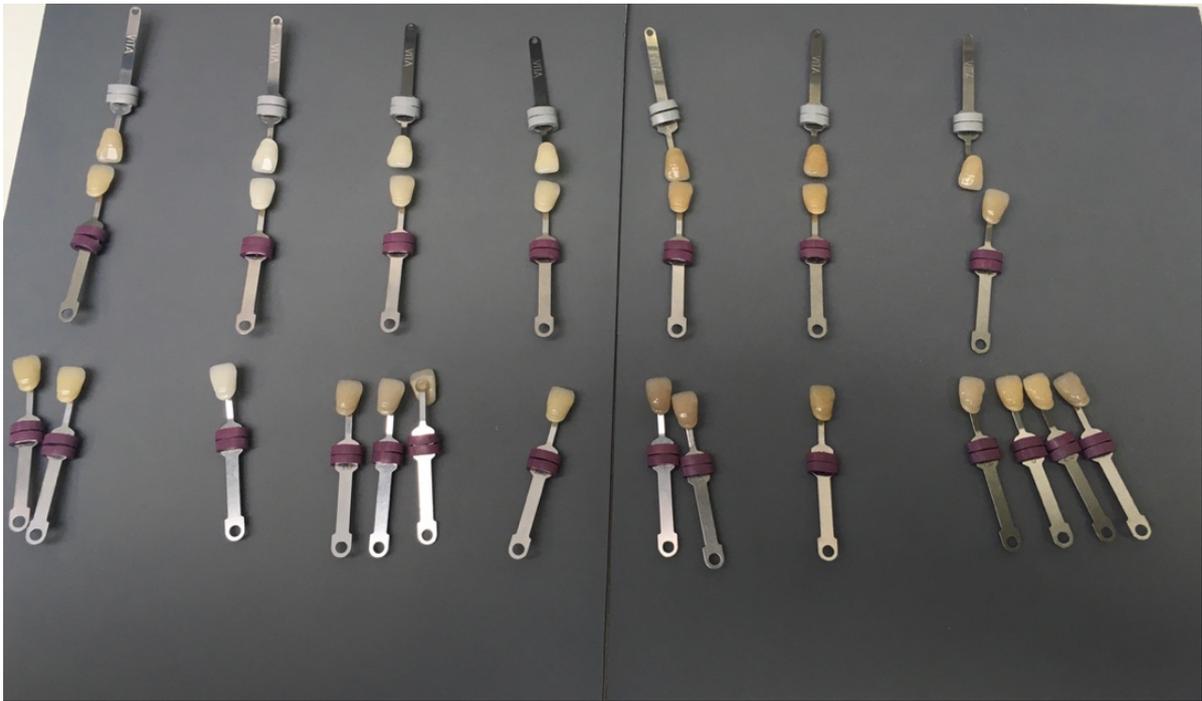


Abb. 9: Beispiel einer Zuordnung durch einen Probanden. Im oberen Bildabschnitt sind die grau markierten Bleachedguide 3D-MASTER® Farbmuster zu sehen, darunter die zugeordneten Toothguide 3D-MASTER® Farbmuster.

Im Anschluss wurden von der Doktorandin die Ergebnisse in die Zuordnungstabelle eingetragen. Diese Zuordnung wurde pro Proband dreimal im Abstand von mindestens einer Woche durchgeführt.

3.4. Messung der Koordinaten der Farbmuster

Das Spektralphotometer Easyshade® V wurde als standardisiertes Messgerät zur Erfassung der Farbkoordinaten der Farbschlüsselzähne eingesetzt. Die Messungen wurden unter den gleichen Versuchsbedingungen durchgeführt wie die visuelle Zuordnung durch die Probanden. Um stets die gleiche Position zur Messung auf den einzelnen Farbmusterzähnen gewährleisten zu können, wurde eine 2 mm dicke durchsichtige Repositionierungsschiene für die Farbmusterzähne hergestellt. Die Farbmuster und die Repositionierungshilfe wurden am Haltestift auf der grauen Unterlage fixiert und der Messkopf aufgesetzt (Abb.10). Es erfolgten zehn Messungen hintereinander im Trainingsmodus. Vor jedem Muster wurde der Easyshade® V erneut kalibriert.

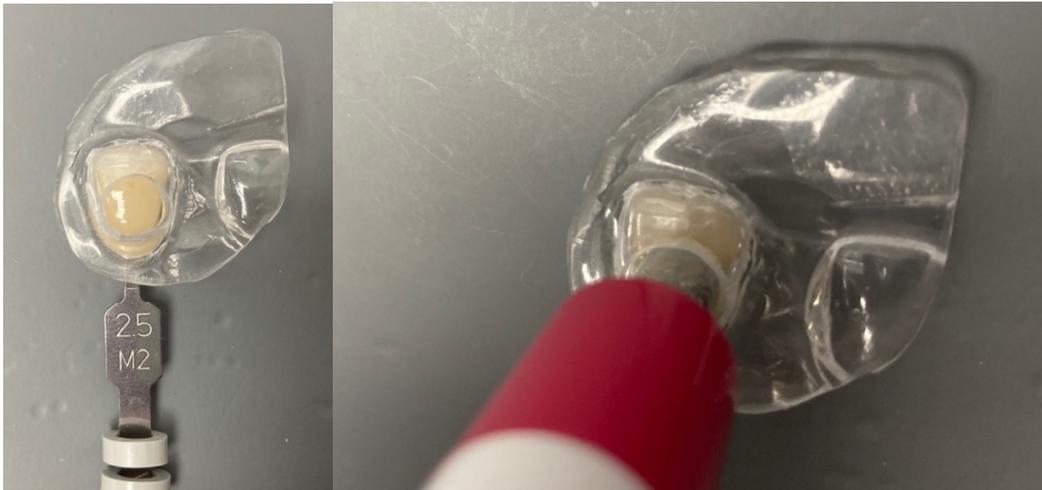


Abb.10: 10a) Repositionierungsschiene mit Aussparung im mittleren Drittel des Farbmusters (links), 10b) Repositionierungsschiene mit aufgesetztem Messkopf (rechts).

Die Messdaten wurden per Bluetooth in die Helper-Software übertragen. Eine Ausgabe der Messergebnisse des Easyshade® V im Trainingsmodus erfolgt normalerweise nur auf dem Easyshade® V in den kategorialen Farbangaben des Toothguide 3D-MASTER® oder VITA classical® Farbrings. Um jedoch auch hier die Farbkoordinaten angezeigt zu bekommen, wurde der Easyshade® V, der in dieser Studie genutzt wurde, seitens der VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG dafür freigeschaltet. So konnten auch im Trainingsmodus über die Helper-Software Daten gesammelt werden. Diese wurden anschließend in eine Excel®-Tabelle übertragen.

3.5. Auswertung

Für die Daten der visuellen Zuordnung wurde eine Excel-Tabelle mit den folgenden Kriterien erstellt:

- Probanden-ID
- Durchgang
- Geschlecht
- Altersklasse
- Toothguide 3D-MASTER® Farbe
- Zugeordnete Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe

Die schriftlich festgehaltenen Daten der einzelnen Probanden wurden in diese Tabelle übertragen und anschließend statistisch ausgewertet.

Auswertung der Koordinaten

Die gemessenen Koordinaten und Bleached-Indices wurden ebenfalls in die oben genannte Excel-Tabelle übertragen. Mit der Farbdifferenzformel CIEDE2000 [47] wurden die

Unterschiede zwischen den Farbpaaren errechnet. Zur Berechnung wurde eine von Sharma, Wu und Dalal erstellte Excel-Funktion genutzt [15].

Dabei wurden die Parameter wie folgt eingestellt:

- Gewichtung der Parameter K_L (Korrekturparameter für die Wahrnehmung der Helligkeit), K_C (Korrekturparameter für die Wahrnehmung der Sättigung) und K_H (Korrekturparameter für die Wahrnehmung des Farbtons) im Verhältnis 2:1:1
- Rotations-Term (R_T) = 0

Die Frage nach der Akzeptanz der Zuordnung orientierte sich an den Kriterien, die in der DIN ISO/TR 28642 angegeben sind [87]. Für ΔE_{00} galten die korrespondierenden PT- (50/50 %-Wahrnehmbarkeitsschwelle) und AT- (50/50 %-Annehmbarkeitsschwelle) Werte nach Paravina et al. [56]. Zur Übersichtlichkeit wurden die Gesamtfarbdifferenzwerte mit hochgestellten Buchstaben (A-C) gekennzeichnet.

Wie gut die Akzeptanz des euklidischen Gesamtfarbabstands (ΔE_{ab}) und des Farbabstands nach CIEDE2000 (ΔE_{00}) zwischen den zugeordneten Farbpaaren ist, wurde wie folgt codiert (Tab. 4 und Tab. 5):

Tab. 4: Akzeptanz der Zuordnung nach DIN ISO/TR 28642 [87].

A	$\Delta E_{ab} < 1,2$	Sehr gute Farbkompatibilität; $\Delta E_{ab} < PT$
B	$\Delta E_{ab} = 1,2-2,7$	Annehmbare Kompatibilität; $\Delta E_{ab} = PT - AT$
C	$\Delta E_{ab} > 2,7$	Nicht annehmbare Kompatibilität; $\Delta E_{ab} > AT$

Tab. 5: Akzeptanz der Zuordnung nach Paravina et al. [56].

A	$\Delta E_{00} < 0,8$	Sehr gute Farbkompatibilität; $\Delta E_{00} < PT$
B	$\Delta E_{00} = 0,8-1,8$	Annehmbare Kompatibilität; $\Delta E_{00} = PT - AT$
C	$\Delta E_{00} > 1,8$	Nicht annehmbare Kompatibilität; $\Delta E_{00} > AT$

3.6. Statistische Methoden

Die erhobenen Daten der Messungen mit dem Easyshade[®] V und die Daten der Probanden wurden zunächst händisch in Tabellen eingetragen und anschließend mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel[®] für Mac 2019 Version 16.48 erfasst und konvertiert, um die Verarbeitung mit dem Statistikprogramm SPSS[®] Version 27.0 zu ermöglichen.

Deskriptive Statistik

Die Daten wurden mittels deskriptiver Statistik (Mittelwert und Standardabweichung der Messwerte sowie absolute und relative Häufigkeiten der Zuordnungen) dargestellt. Grafiken wurden mit IBM SPSS® 27.0 und Tabellen mit Microsoft Word® für Mac erstellt.

Verteilung der Zuordnung

Die Verteilung der Zuordnung wurde mittels Kreuztabelle und anschließender Monte-Carlo-Simulation (Kontingenzintervall 99 %) auf Unabhängigkeit überprüft. Normalerweise wäre hier der exakte Test nach Fischer das Mittel der Wahl. Dieser benötigt jedoch bei größeren Stichproben eine enorme Rechen- und Speicherkapazität. Ein approximatives Verfahren wie der Chi-Quadrat-Test ist aufgrund einer erwarteten Häufigkeit geringer als 5 für einzelne Spalten/Zeilen nicht indiziert [88]. Um zu überprüfen bei welcher Toothguide 3D-MASTER® Farbe die Probanden am wenigsten/am meisten bei ihrer Zuordnung variierten, wurde der Herfindahl-Index (HHI) angewendet. Dabei handelt es sich um ein Konzentrationsmaß, welches misst, wie gleichmäßig bzw. ungleichmäßig eine Merkmalsausprägung verteilt ist [89].

Validität der Messungen mit dem Easysshade® V

Es wurde die Validität der kategorialen Farbannahmen sowohl des Bleachedguide 3D-MASTER® als auch des Toothguide 3D-MASTER® überprüft. Dabei wurde die Angabe des Herstellers auf den Farbmusterzähnen als „wahrer“ Wert angesehen [18]. Der angegebene Bleached-Index wurde ebenfalls auf Validität überprüft.

Reliabilität

Des Weiteren erfolgte die Bestimmung der Intrarater-Reliabilität, also die Übereinstimmung der Reproduzierbarkeit der Farbzuordnung eines Probanden zwischen den jeweiligen Durchgängen sowie über alle Durchgänge hinweg. Für die Übereinstimmung zwischen dem ersten und zweiten sowie dem zweiten und dritten Durchgang wurde Cohens Kappa als Maß für die Intrarater-Reliabilität verwendet [90]. Zwischen allen drei Durchgängen wurde Fleiss' Kappa verwendet. Für die Interrater-Reliabilität, also die Übereinstimmung zwischen allen Probanden über die einzelnen Durchgänge sowie über alle Durchgänge, wurde ebenfalls Fleiss' Kappa als Maß verwendet [91]. Für beide Kappa-Werte (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$) gilt: Der Grad der Übereinstimmung wird nach der Systematisierung nach Landis und Koch eingeschätzt [92]. Die Fleiss' Kappa-Werte der einzelnen Probanden über alle Durchgänge hinweg wurden des Weiteren für die Untersuchung der Reproduzierbarkeit der Zuordnung in Bezug auf Geschlecht, Alter und das Tragen einer Brille verwendet. Mit dem t-Test für unabhängige Stichproben wurden die Gruppen auf Unterschiede überprüft (Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$).

Unterschiede der Zuordnung bei gleicher Helligkeit/Sättigung/Farbton

Um zu überprüfen, ob es einen Unterschied zwischen der visuellen Zuordnung von Toothguide 3D-MASTER® Farben mit der gleichen Helligkeitsstufe und dem gleichen Chroma bei unterschiedlichem Farbton gibt, wurden die Kontingenztafeln der Zuordnung mit dem exakten Test nach Fischer auf Unabhängigkeit überprüft (Signifikanzniveau von 0,05). Gleiche Tests erfolgten auch für Farben mit gleicher Helligkeitsstufe, gleichem Farbton und unterschiedlichem Chroma-Wert. Für die Analyse der unterschiedlichen Helligkeitswerte bei gleichem Farbton und gleichem Chroma wurde die Monte-Carlo-Simulation verwendet [88]. Cramers V nach Cohen und zitiert nach Ellis dienten als Maß des Zusammenhangs [93, 94].

Multiples Lineares Regressionsmodell zur Erklärung der Auswahl der Toothguide 3D-MASTER® Koordinaten durch die Koordinaten des Bleachedguide 3D-MASTER®

Um den Einfluss der gemessenen Variablen (Koordinaten) auf die Auswahl und Zuordnung der Farbmuster darzustellen, eignet sich die multivariable lineare Regression als statistische Analyseverfahren. Die multivariable lineare Regression dient der Analyse und Beschreibung des gleichzeitigen Einflusses mehrerer unabhängiger Variablen auf ein davon abhängiges Merkmal. Dabei wurde davon ausgegangen, dass dieser Einfluss linear ist und die Variablen quantitativ und stetig sind [95]. Das Bestimmtheitsmaß R^2 gibt an, welcher Anteil der Varianz der abhängigen Variablen durch die unabhängigen Variablen erklärt werden kann. Bei einem R^2 -Wert von null würde das lineare Modell nicht zu den Daten passen. Bei mehreren Variablen ist es sinnvoll, das korrigierte R^2 zu betrachten, da automatisch R^2 mit jeder zusätzlichen Variablen ansteigt. Um diesem Automatismus entgegenzuwirken wird R^2 korrigiert [96].

Das Ziel ist ein robustes Regressionsmodell, welches die Zielvariable so gut wie möglich erklärt. Für ein solches Modell sollten nur die unabhängigen Variablen miteinbezogen werden, welche einen bestimmten Anteil an der Zielvariablen erklären. Dieser Prozess wird Variablenselektion genannt. Es gibt verschiedene Methoden der Variablenselektion. In der vorliegenden Arbeit wurde die Rückwärtsselektion angewendet [96]. Als Koordinaten wurden L^* , C^* und h° ausgewählt, da diese sich konkreter auf die Fragestellung beziehen als die b^* - und a^* -Koordinate. Da in dieser Studie keine der Koordinaten von den Probanden separat betrachtet werden kann, sollten auch bei einer vorliegenden Multikollinearität alle drei Koordinaten für das Regressionsmodell verwendet werden. Daher wird in dieser Arbeit auch nicht konkret auf Multikollinearität getestet. Um die Zusammenhänge der Variablen übersichtlich grafisch darzustellen, bietet sich für jede Kombination eine bivariate Heatmap der Regressionskoeffizienten an [95]. Bei der bivariaten Heatmap handelt es sich um die grafisch farbcodierte Darstellung der Interaktionen zweier Eigenschaften. Das Ausmaß des Zusammenhangs wird durch verschiedene Farben gekennzeichnet [97].

Korrelation zwischen Bleached-Indices des Toothguide 3D-MASTER® und der Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben

Die Prüfung auf Korrelation zwischen den gemessenen Bleached-Indices des Toothguide 3D-MASTER® und der Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben erfolgte, da es sich um ordinalskalierte Werte handelt, mit der Spearman'schen Rangkorrelationsanalyse mit zweiseitigem Test auf Signifikanz ($\alpha = 0,05$) [95]. Auch für das Modell zur Erklärung des Bleached-Index mithilfe der Toothguide 3D-MASTER® Koordinaten wurde die multiple lineare Regression verwendet.

4. Ergebnisse

4.1. Deskriptive Statistik

Geschlechterverteilung der Probanden

Von den befragten Probanden sind 40,6 % (n = 21) Männer und 59,4 % (n = 31) Frauen.

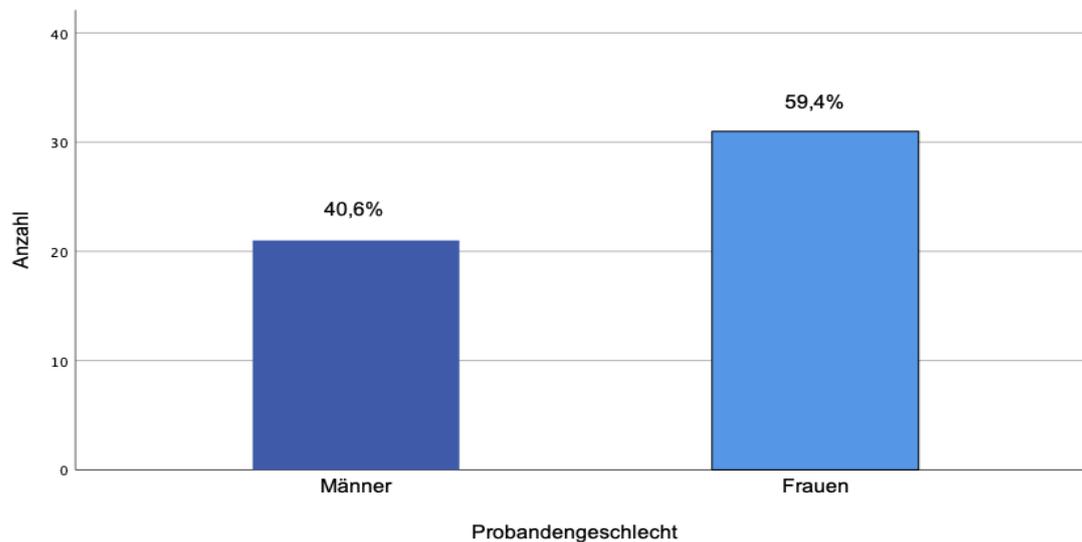


Abb. 11: Verteilung der Probandengeschlechter.

Altersverteilung der Probanden

Zum Zeitpunkt der Durchführung des ersten Durchgangs der Zuordnung war der jüngste Proband 24 und der älteste 64 Jahre alt. Der Schwerpunkt der Altersverteilung liegt auf den 25- bis 34-Jährigen. Je einmal trat ein Alter über 40 bzw. über 60 Jahre auf.

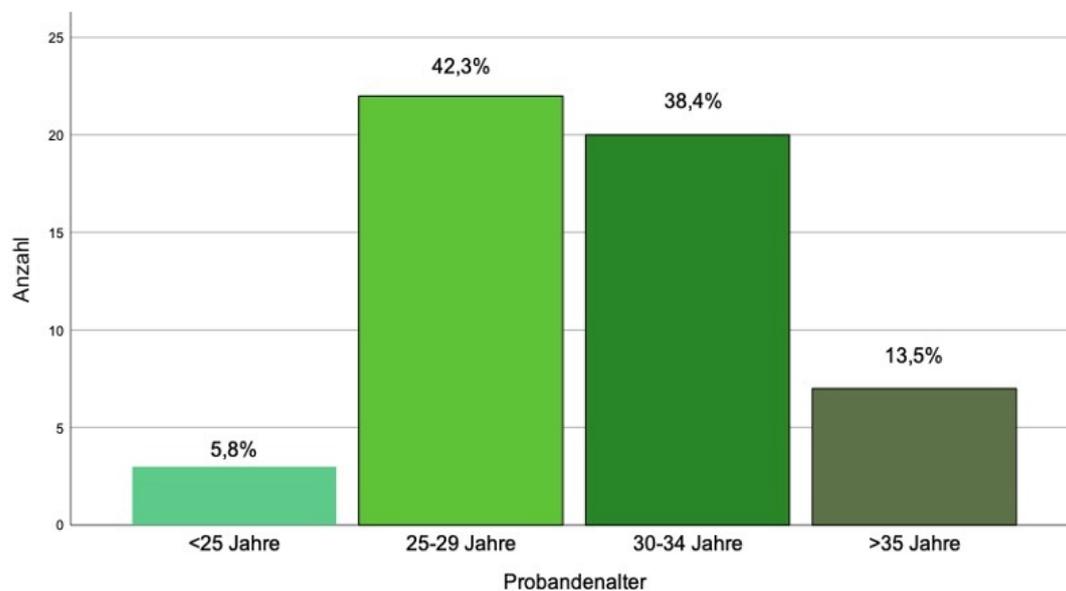


Abb. 12: Verteilung der Altersklassen der Probanden.

Anteil von Brillenträgern

Von 52 Probanden trugen 36 (69,2 %) keine Brille. 16 Probanden (30,8 %) trugen während der Durchführung der Zuordnungen eine Brille.

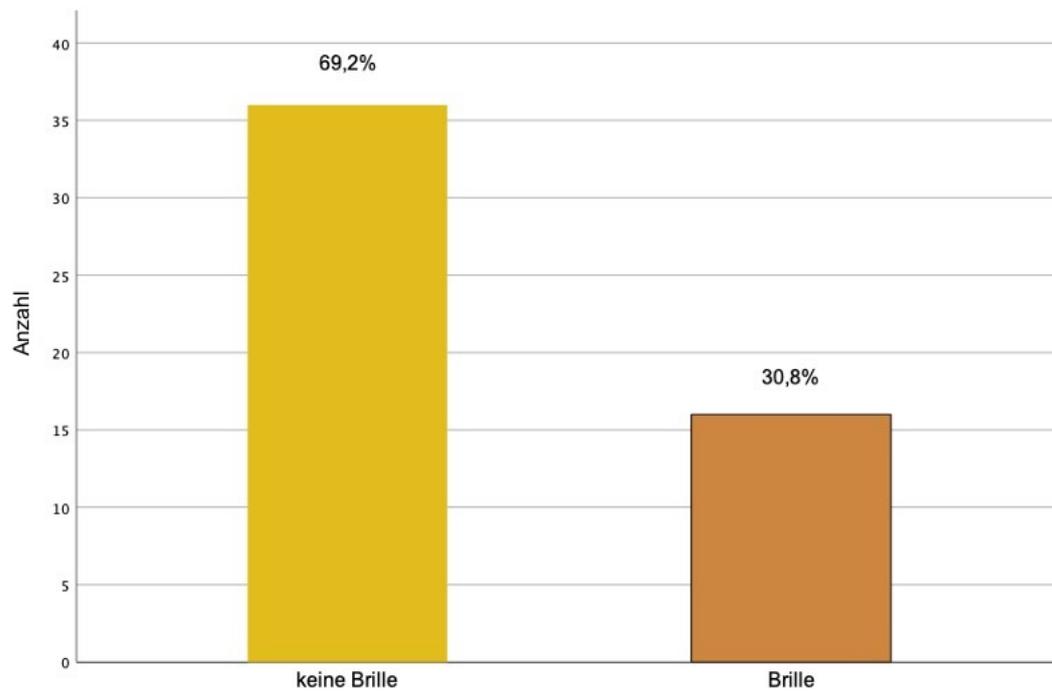


Abb. 13: Anteil der Brillenträger und Nicht-Brillenträger in der gesamten Probandengruppe.

4.2. Messdaten des Easyshade® V im Testmodus

Tab. 6.1: Daten des Easyshade® V. Mittelwert (M) mit Standardabweichung (SD) nach zehn Messungen pro Zahnfarbmuster des Toothguide 3D-MASTER®.

	M L*	SD L*	M C*	SD C*	M h°	SD h°	M a*	SD a*	M b*	SD b*
0M2	87,3	0,7	8,8	0,1	88,5	0,1	0,2	0,0	8,8	0,1
0M3	87,9	0,2	10,8	0,1	89,5	0,0	0,1	0,0	10,8	0,1
2M1	78,4	0,3	13,3	0,3	87,8	0,1	0,5	0,0	13,3	0,3
2L1,5	77,8	0,4	17,3	0,2	89,6	0,1	0,1	0,0	17,3	0,2
2R1,5	78,6	0,3	16,2	0,1	86,8	0,1	0,9	0,0	16,2	0,1
2L2,5	79,3	1,0	23,6	1,1	89,6	0,3	0,2	0,1	23,6	1,1
2R2,5	78,3	0,2	22,8	0,2	86,6	0,1	1,4	0,0	22,8	0,2
2M3	78,5	0,2	25,5	0,2	87,7	0,1	1,0	0,0	25,5	0,2
3M1	73,3	0,2	15,4	0,1	85,1	0,0	1,3	0,0	15,4	0,1
3L1,5	72,2	0,4	19,5	0,3	86,6	0,0	1,2	0,0	19,5	0,2
3R1,5	73,3	0,4	17,9	0,2	83,5	0,0	2,0	0,0	17,8	0,2
3L2,5	72,8	0,3	25,3	0,8	86,6	0,4	1,5	0,2	25,3	0,8
3R2,5	73,6	0,2	26,3	0,2	83,2	0,1	3,1	0,1	26,1	0,2
3M3	73,7	0,4	28,9	0,1	84,5	0,0	2,8	0,0	28,8	0,1
4M1	68,0	0,5	16,4	0,4	82,8	0,1	2,1	0,1	16,3	0,4
4L1,5	67,9	0,1	20,9	0,2	84,6	0,1	2,0	0,0	20,8	0,2
4R1,5	67,8	0,4	19,8	0,2	81,3	0,1	3,0	0,1	19,6	0,2
4L2,5	68,9	0,2	28,5	1,1	83,9	0,6	3,0	0,4	28,4	1,0
4R2,5	68,9	0,2	28,4	0,2	80,9	0,2	4,5	0,1	28,1	0,2
4M3	68,8	0,1	31,4	0,2	82,0	0,0	4,3	0,0	31,1	0,2
5M1	62,7	0,3	18,4	0,3	80,8	0,1	3,0	0,0	18,2	0,3

Tab. 6.2: Daten des Easyshade® V. Mittelwert (M) mit Standardabweichung (SD) nach zehn Messungen pro Zahnfarbmuster des Bleachedguide 3D-MASTER®.

	M L*	SD L*	M C*	SD C*	M h°	SD h°	M a*	SD a*	M b*	SD b*
0,5M1	89,0	0,3	11,1	0,1	89,9	0,0	0,0	0,0	11,1	0,1
1M1,5	82,0	0,2	15,6	0,0	89,7	0,0	0,1	0,0	15,6	0,0
1,5M2	81,3	0,4	18,8	0,2	88,7	0,1	0,4	0,0	18,8	0,2
2,5M2	76,6	0,1	19,0	0,7	86,8	0,1	1,0	0,1	18,9	0,7
3,5M2	71,9	0,2	23,8	0,1	83,9	0,0	2,5	0,0	23,7	0,1
4,5M2	66,1	0,0	25,7	0,0	80,9	0,0	4,1	0,0	25,4	0,0
5M2,5	64,9	0,1	32,4	0,1	79,3	0,0	6,0	0,0	31,8	0,1

4.3. Zuordnungen der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben zu den Toothguide 3D-MASTER® Farben

Im Anhang werden alle Toothguide 3D-MASTER® Farben und ihre zugeordneten Bleachedguide 3D-MASTER® Farben tabellarisch dargestellt. In Klammern ist der relative Anteil der Zuordnung über alle Durchgänge angegeben. Es werden die Koordinatendifferenzen sowohl nach dem CIE L*a*b*-Farbsystem als auch nach CIEDE 2000 berechnet. Des Weiteren gibt der hochgestellte Buchstabe (A - C) an, wie gut die Akzeptanz des euklidischen Gesamtfarbabstands (ΔE_{ab}) und des Farbabstands nach CIEDE2000 (ΔE_{00}) ist.

Nach den Kriterien der DIN-Norm ISO/TR 2864 und den Werten von Paravina et al. [57] sind folgende zugeordnete Farbpaare als akzeptabel ($E\Delta < 50/50$ %-Annehmbarkeitsschwelle) anzusehen (Tab. 7):

Tab. 7: Akzeptable zugeordnete Farbpaare nach DIN ISO/TR 2864 und nach Paravina et al. [57].

ΔE_{ab}	ΔE_{00}
0M3/0,5M1	0M2/0,5M1
2L1,5/2,5M2	0M3/0,5M1
3L2,5/3,5M2	2L1,5/0,5M1; 2L1,5/1M1,5; 2L1,5/2,5M2
	2R1,5/1M1,5; R1,5/1,M2; 2R1,5/2,5M2
	3L1,5/2,5M2
	3L2,5/3,5M2
	3R1,5/2,5M2
	3R2,5/3,5M2
	4R2,5/4,5M2

Von 147 möglichen Zuordnungen wurden 79 Farbpaare gebildet. Von diesen Zuordnungen waren 3,8 % (n = 3) nach ISO/TR 28642 akzeptabel ($\Delta E_{ab} < 2,7$). Eine akzeptable Farbzuordnung ist ein Farbabstand gleich oder unterhalb der 50/50 %-Annehmbarkeitsschwelle (s. Kap. 2.3.) [54]. Die Bleachedguide 3D-MASTER® Farben der akzeptablen Zuordnungen waren 0,5M1, 2,5M2 und 3,5M2. Gemäß den Maßstäben nach Paravina et al. waren 16,5 % (n = 13) akzeptabel ($\Delta E_{00} < 1,8$) [57]. Am häufigsten wurde die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe 2,5M2 mit 33,33 % (n = 4) zugeordnet. Die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe 5M2,5 zeigte bei keiner Differenzberechnung eine akzeptable Übereinstimmung.

4.4. Variation der Zuordnung

4.4.1. Unterschiede der Zuordnungen zwischen den Durchgängen

Tabelle 8 zeigt, dass der exakte Test nach Fischer auf Unabhängigkeit in keinem Fall signifikant ($p > 0,05$) ist. Dies bedeutet, dass es keinen statistischen Unterschied der Zuordnungen der Probanden über die jeweiligen Durchgänge gibt.

Tab. 8: Exakter Test nach Fischer auf Unabhängigkeit mit Signifikanzniveau $p = 0,05$.

1. Durchgang – 2. Durchgang	$p = 0,918$
1. Durchgang – 3. Durchgang	$p = 0,911$
2. Durchgang – 3. Durchgang	$p = 0,999$

4.4.2. Herfindahl-Indices der Zuordnungen

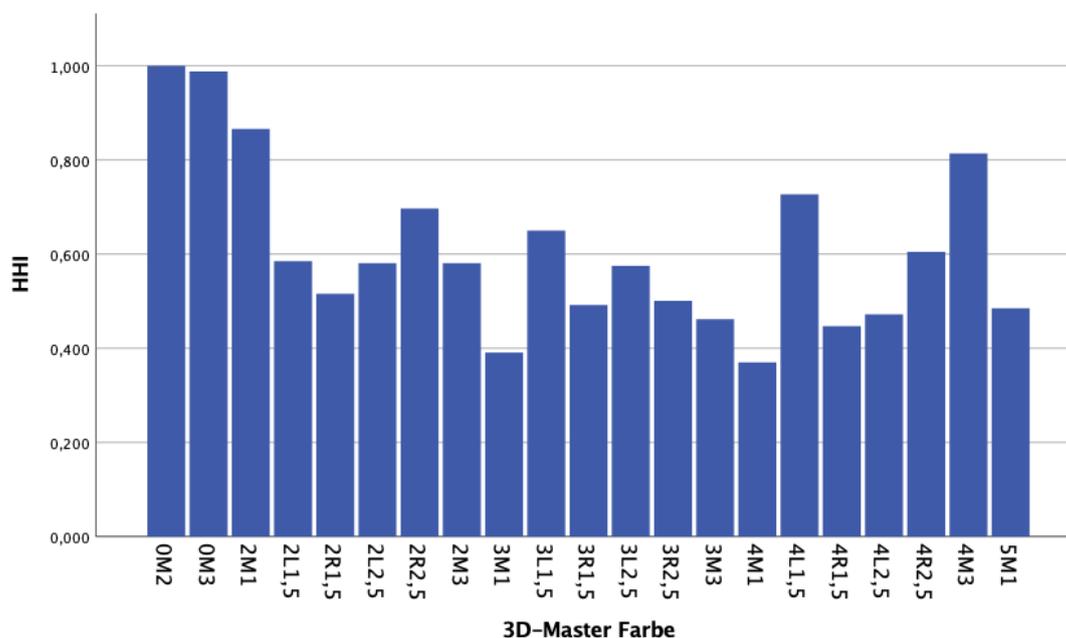


Abb. 14: Herfindahl-Index der Toothguide 3D-MASTER® Farben, Reihenfolge nach Herstellerangabe.

Mit dem Herfindahl-Index (HHI) wird gemessen, wie ungleichmäßig/gleichmäßig die Merkmalsausprägung verteilt ist. Ein Wert von 1 bedeutet, dass alle Probanden die gleiche Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe der Toothguide 3D-MASTER® Farbe zugeordnet haben. Je geringer der HHI, desto mehr variieren die Probanden in ihren Zuordnungen. Im niedrigsten Fall kann der HHI bei 0,14 liegen. Dies würde bedeuten, dass alle sieben Bleachedguide 3D-MASTER®-Farben gleichmäßig von den Probanden auf die einzelnen Toothguide 3D-MASTER®-Farben verteilt wurden. Lediglich der Toothguide 3D-MASTER® Farbe 0M2 haben alle Probanden die gleiche Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe zugeordnet (siehe Abb. 13). Zudem weisen die Farben 0M3 (0,988), 2M1 (0,866) und 4M3 (0,814) eine sehr geringe Variation

bei der Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben auf. 3M1 und 4M1 zeigen mit einem HHI von 0,391 bzw. 0,37 die größte Variation bei der Zuordnung (Abb. 14).

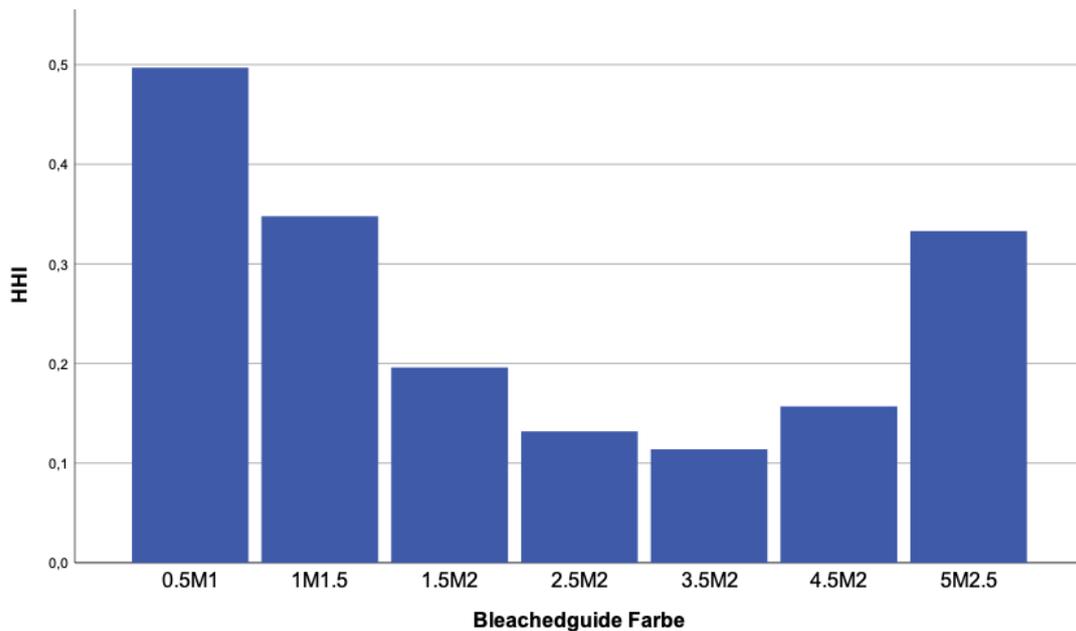


Abb. 15: Herfindahl-Index der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben, Reihenfolge nach Anordnung im Farbring.

Der HHI-Wert lag bei dieser Betrachtung zwischen 1 (die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe wurde einer einzigen Toothguide 3D-MASTER® Farbe zugewiesen) und 0,047 (die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe wurde auf alle 21 Toothguide 3D-MASTER® Farben gleichmäßig verteilt). Die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe 0,5M1 wurde am eindeutigsten verteilt (0,497). Es folgten in absteigender Reihenfolge 1M1,5 (0,348), 5M2,5 (0,333), 1,5M2 (0,196), 4,5M2 (0,157), 2,5M2 (0,132) und 3,5M2 (0,114). Die Anzahl der Zuordnungen ist in der Berechnung des HHI schon berücksichtigt. Am häufigsten verteilt wurden 3,5M2 mit 776 und 2,5M2 mit 748 Zuordnungen über alle drei Durchgänge hinweg. Des Weiteren wurden in aufsteigender Reihenfolge nach der Häufigkeit 1M1,5 (275), 5M2,5 (269), 0,5M1 (314), 1,5M2 (399) und 4,5M2 (495) zugeordnet (Abb. 15).

4.5. Validität

4.5.1. Validität der Easyshade® V Farbangabe im Testmodus

Tab. 9: Gemessene und angezeigte Farben des Easyshade® V bei zehn Messungen pro Farbe sowie Cohens Kappa als Grad der Übereinstimmung. Bleachedguide 3D-MASTER® oben, Toothguide 3D-MASTER® unten.

„Wahre“ Farbe	Farbe angezeigt	Anzahl	Mischfarbe angezeigt	Anzahl
0,5M1	0M3	10	0M3	10
1M1,5	1M2	10	1M1,5	10
1,5M2	1M2	10	1M2	10
2,5M2	2M2	8	2M2	8
	2R1,5	2	2,5M1,5	2
3,5M2	4M2	10	3,5M2	10
4,5M2	5M2	10	4,5M2	10
5M2,5	5M3	10	5M2,5	10
	$\kappa = 0,000$ ($p = 1,0$)		$\kappa = 0,527$ ($p = 0,001$)	

„Wahre“ Farbe	Farbe angezeigt	Anzahl	Mischfarbe angezeigt	Anzahl
0M2	0M2	10	0M2	10
0M3	0M3	10	0M3	10
2L1,5	2L1,5	10	2L1,5	10
2L2,5	2L2,5	10	1,5M2,5	8
			2L2,5	2
2M1	2M1	10	2M1	10
2M3	2M3	10	2M3	10
2R1,5	2R1,5	10	2M1,5	10
2R2,5	2R2,5	10	2R2,5	10
3L1,5	3L1,5	10	3L1,5	10
3L2,5	3L2,5	10	3L2,5	10
3M1	3M1	10	3M1	10
3M3	3M3	10	3M3	10
3R1,5	3R1,5	10	3R1,5	10
3R2,5	3R2,5	10	3R2,5	10
4L1,5	4L1,5	10	4L1,5	10
4L2,5	4L2,5	10	4L2,5	3
			4M2,5	3
			3,5M3	2
			4M3	2
4M1	4M1	10	4M1	10
4M3	4M3	10	4M3	10
4R1,5	4R1,5	10	4R1,5	10
4R2,5	4R2,5	10	4R2,5	10
5M1	5M1	10	5M1	10
	$\kappa = 1,0$ ($p = 0,0001$)		$\kappa = 0,876$ ($p = 0,0001$)	

Es fällt auf, dass die gemessene Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe auf der Hauptanzeige (Bildschirm des Easyshade® V) nicht mit der Farbe übereinstimmt, welche der Herstellerbezeichnung (Gravur der Haltestifte) entspricht. Die in der Helper-Software angezeigte Mischfarbe entsprach bei vier von sieben Farben der „richtigen“ Farbe: 1M1,5, 3,5M2, 4,5M2 und 5M2,5. Die Farbe 0,5M1 wurde sowohl in der Hauptanzeige als auch in der Mischfarbanzeige als 0M3 angezeigt. Für die Farbe 1,5M2 wurde in beiden Anzeigen über alle zehn Messungen hinweg 1M2 angezeigt. Die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe 2,5M2 wurde bei acht von zehn Messungen in beiden Anzeigen als 2M2 bezeichnet und zweimal in der Hauptanzeige als 2R1,5, während bei diesen Messungen als Mischfarbe 2,5M1,5 angezeigt wurde. Im Testmodus wird dem Behandler nur die kategoriale Farbe angezeigt. Unter der Annahme, dass die auf dem Farbmusterzahnhalter eingravierte Farbangabe die „wahre“ Farbe darstellt, waren 100 % der Messungen nicht korrekt. Bei der Anzeige der Mischfarbe stimmten 42,8 % nicht mit der Bezeichnung überein. Bei der Messung der Toothguide 3D-MASTER® Farben wurden alle Farben in der Hauptanzeige mit der richtigen Farbbezeichnung angezeigt. Die Farbe 2R1,5 wurde in den Mischfarben bei allen zehn Messungen als 2M1,5 angezeigt, die Farbe 2L2,5 wurde bei der Mischfarbe zweimal „korrekt“ und achtmal als 1,5M2,5 gemessen. Bei der Farbe 4L2,5 war die Anzeige der Mischfarbe sehr variabel: Jeweils dreimal wurden die Farben 4L2,5 und 4M2,5 sowie jeweils zweimal die Farben 3,5M2 und 4M3 angezeigt. Insgesamt lag die Quote der korrekt angezeigten/gemessenen Farbbezeichnungen bei der Mischfarbe bei 88,1 %. Als Maß für die Validität wurde Cohens Kappa herangezogen. Dabei wurden die vom Hersteller auf den Farbmustern angegebenen Farbbezeichnungen als „wahrer“ Wert betrachtet und mit den Messungen durch den Easyshade® V abgeglichen [18]. Dabei gilt für die Interpretation der Kappa-Werte: Der Grad der Übereinstimmung wird nach der Systematisierung nach Landis und Koch eingeschätzt [92].

Tab. 10: Der Grad der Übereinstimmung nach der Systematisierung nach Landis und Koch [92].

Kappa- Statistik	Stärke der Übereinstimmung
0,00 - 0,20	Gering
0,21 - 0,40	Ausreichend
0,41 - 0,60	Mäßig
0,61 - 0,8	Gut
0,81 - 1,00	Exzellente

Es wurde die angezeigte Farbe (Hauptanzeige) des Easyshade® V mit der von der Helper-Software angezeigten Mischfarbe verglichen. Schon bei der Betrachtung der „wahren“ Werte und der durch den Easyshade® V angegebenen Werte der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben ist deutlich zu sehen, dass keine Farbe korrekt angezeigt wurde. Entsprechend ist Cohens

Kappa nicht signifikant. Für den Vergleich zwischen den „wahren“ Werten und den durch die Software angezeigten Mischwerten ist Cohens Kappa mit $p = 0,001$ signifikant und zeigt mit einem Kappa-Wert von 0,527 einen mittleren Zusammenhang bzw. Validität. Für die Bleachedguide 3D-MASTER® Farben 0,5M2, 1,5M2 und 2,5M2 konnte auch bei dieser Messung nicht der „wahre“ Wert korrekt ermittelt werden. Bei der Farbmessung der Toothguide 3D-MASTER® Farben stimmen die gemessene Farbangebe und die Farbangebe des Herstellers bei allen Messungen überein. Der Cohens Kappa-Wert liegt daher auch bei 1,0 ($p = 0,001$). Für die Mischfarben wurde $\kappa = 0,876$ ($p = 0,0001$) ermittelt.

4.5.2. Validität der Bleichindex Angabe des Easyshade im Testmodus

Tab. 11: Bleached-Indices der Bleachedguide-Farben, Anzahl der jeweils gemessenen Werte sowie der zugehörige „wahre“ Wert nach der Angabe auf dem Farbring.

Farbe	Bleached-Index gemessen	Anzahl der Messungen	„Wahrer“ Wert
0,5M1	4	10	3
1M1,5	7	10	7
1,5M2	10	7	11
	9	3	
2,5M2	11	2	15
	10	1	
	14	1	
	13	6	
3,5M2	18	9	19
	19	1	
4,5M2	21	10	23
5M2,5	24	10	27

Die Validität der Bleached-Index-Werte kann nur anhand der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben ermittelt werden, da keine „wahren“ Bleached-Index-Werte für die Farben des Toothguide 3D-MASTER® bekannt sind. Cohens Kappa mit 0,136 ($p = 0,001$) zeigt nur einen schwachen Zusammenhang. Bis auf die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe 1M1,5 mit einem Bleached-Index von sieben wurde kein Bleached-Index „richtig“ gemessen. Die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe 2,5M2 wies die unterschiedlichsten Bleached-Indices auf, dabei zeigten sich Differenzen gemäß der ADA von vier bis eins zum „wahren“ Wert von 15.

4.6. Reliabilität

4.6.1. Intrarater-Reliabilität

Die Intrarater-Reliabilität wird in diesem Fall als Übereinstimmung der Farbzuordnungsergebnisse eines einzelnen Probanden zwischen den jeweiligen Durchgängen sowie über alle Durchgänge hinweg definiert. Für die Übereinstimmung zwischen dem 1. und 2. sowie dem 2. und 3. Durchgang wurde Cohens Kappa als Maß für die Intrarater-Reliabilität verwendet. Über alle drei Durchgänge hinweg wurde Fleiss-Kappa verwendet. Für beide Kappa-Werte gilt der Grad der Übereinstimmung nach der schon genannten Systematisierung nach Landis und Koch [92].

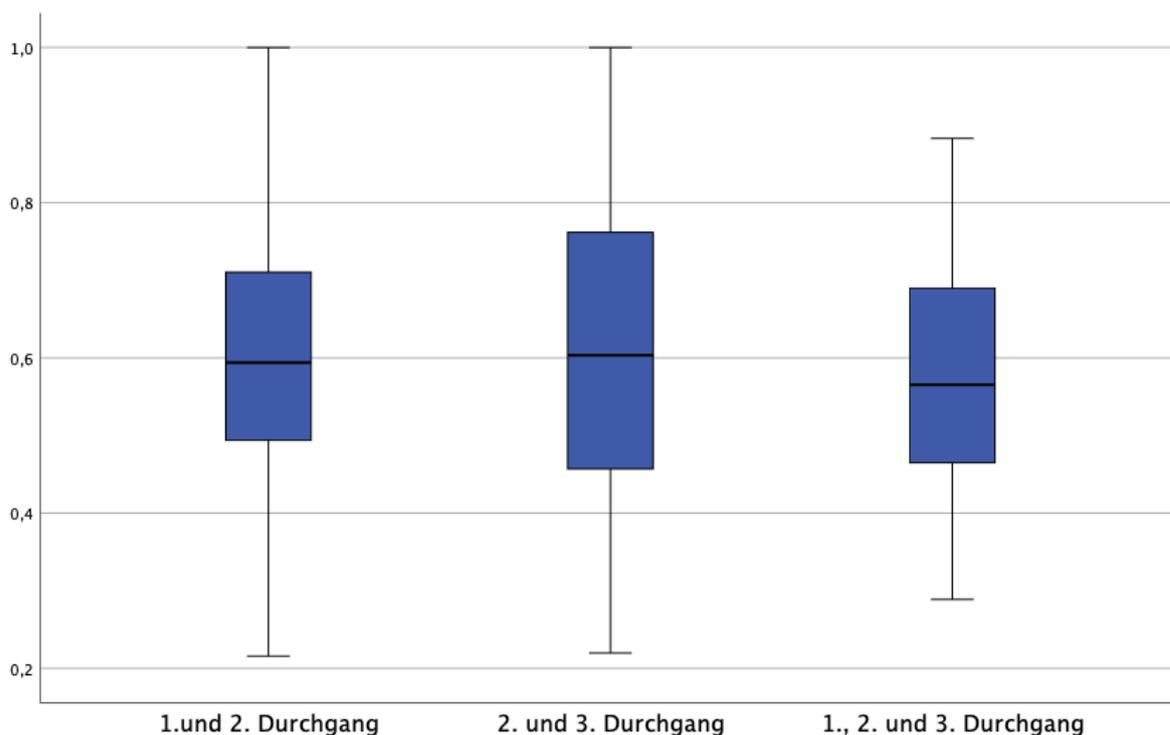


Abb. 16: Box-Whisker-Plots der Cohens Kappa-Werte einzelner Probanden zwischen dem 1. und 2. sowie dem 2. und 3. Durchgang. Fleiss' Kappa-Werte einzelner Probanden zwischen 1., 2. und 3. Durchgang. Die Kappa-Werte sind alle signifikant ($p < 0,05$).

Zwischen dem 1. und 2. Durchgang zeigte sich bei keinem Probanden eine geringe Übereinstimmung ($\kappa < 0,2$). Bei acht der 52 Probanden (15,4 %) lag der Kappa-Wert zwischen 0,21 und 0,40, welches auf eine ausreichende Übereinstimmung hinwies. 22 von 52 (42,3 %) Probanden hatten mit einem Kappa-Wert von 0,41 bis 0,6 eine mittelmäßige Übereinstimmung erreicht. Bei 15 der 52 Probanden lagen die Kappa-Werte zwischen 0,61 und 0,8 und zeigten dadurch eine gute Übereinstimmung. Sieben Probanden der Probandengruppe (13,5 %) erreichten mit Kappa-Werten zwischen 0,81 und 1,0 sogar eine exzellente Übereinstimmung. Darunter war ein einziger Proband, bei dem zwischen dem 1. und 2. Durchgang keine Änderung der Zuordnung vorlag ($\kappa = 1,0$). Der Kappa-Mittelwert aller Probanden lag bei 0,616, was

knapp einer guten Übereinstimmung entspricht. Bei dem Vergleich zwischen den Zuordnungsergebnissen des 2. und 3. Durchgangs ergab sich eine gering schlechtere durchschnittliche Übereinstimmung von 0,595, die als mittelmäßig einzustufen war. Auch zwischen diesen Durchgängen gab es keine Kappa-Werte unter 0,2. Bei acht von 52 Probanden lag der Kappa-Wert zwischen 0,21 und 0,4 (ausreichende Übereinstimmung). 19 von 52 Probanden (36,5 %) erreichten Cohens Kappa-Werte zwischen 0,41 und 0,6 und damit eine mittelmäßige Übereinstimmung zwischen den Durchgängen. Eine gute Übereinstimmung (Kappa-Werte 0,61-0,8) erzielten 15 von 52 Probanden (28,8 %). Bei zehn von 37 Probanden fand sich ein Kappa-Wert zwischen 0,81 und 1,0, was auf eine exzellente Übereinstimmung hindeutet. Von diesen zehn Probanden erreichten zwei die vollkommene Übereinstimmung. Der Unterschied zwischen den Kappa-Mittelwerten des 1. und 2. sowie 2. und 3. Durchgangs war nicht signifikant. Über alle drei Durchgänge hinweg lag der mittelwertige Fleiss' Kappa bei 0,58, welcher einer mittelmäßigen Übereinstimmung entspricht. Bei sieben von 52 Probanden (13,5 %) lagen die Kappa-Werte zwischen 0,21 und 0,4 (ausreichende Übereinstimmung). Bei 22 von 52 Probanden (42,2 %) lagen die Fleiss' Kappa-Werte bei 0,41-0,6, was auf eine mittlere Übereinstimmung hinweist. 20 der 52 Probanden (38,5 %) erreichten eine gute Übereinstimmung über alle drei Durchgänge hinweg mit Kappa-Werten zwischen 0,61 und 0,80. Drei der 52 Probanden (5,8 %) erreichten eine exzellente Übereinstimmung mit Fleiss' Kappas zwischen 0,81 und 1,0.

4.6.2. Intrarater-Reliabilität nach Probandengruppen

Die grafische Darstellung (Abb. 17) der Fleiss' Kappa-Werte über alle Durchgänge hinweg erfolgte mittels Box-Whisker-Plots. Die Daten wurden zum Vergleich nach verschiedenen Kriterien gruppiert: alle Probanden, nach Geschlecht, Brillenträger, Altersklasse. Auf der Y-Achse wurde der Fleiss' Kappa-Wert aufgetragen.

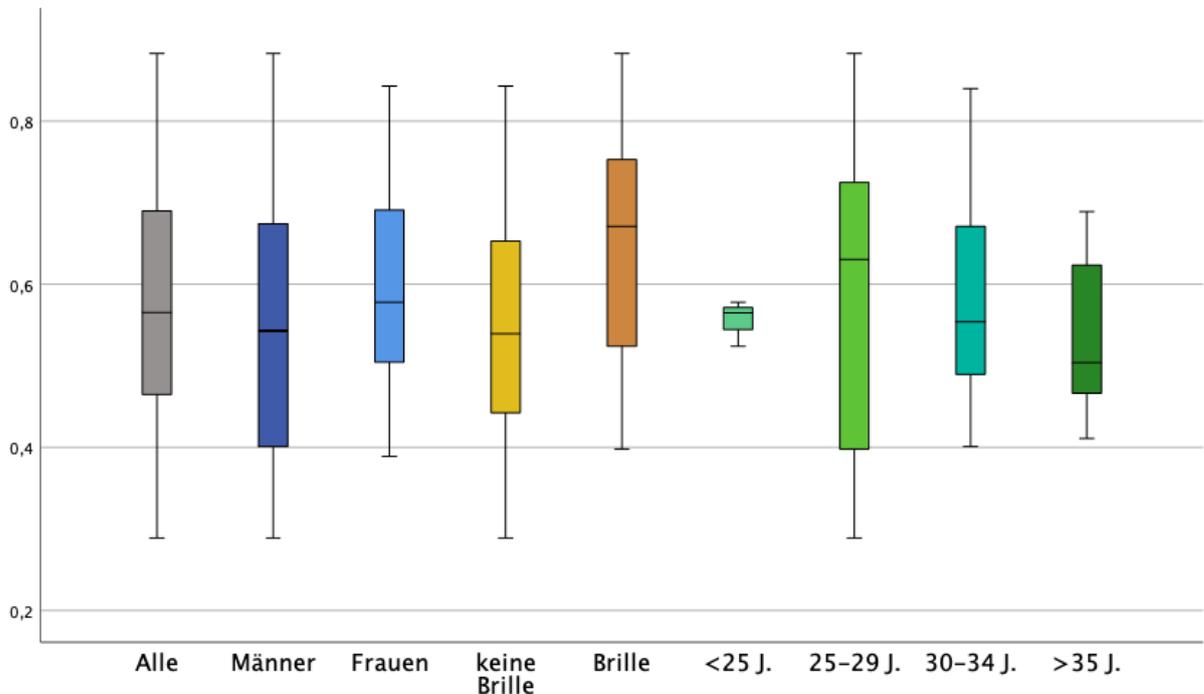


Abb. 17: Box-Whisker-Plots der Fleiss' Kappa-Werte über alle Probanden, das Geschlecht, Brillenträger und Nicht-Brillenträger sowie die Altersgruppen.

Der Fleiss' Kappa-Mittelwert über alle Probanden beträgt 0,58. Der Mittelwert der 21 männlichen Probanden lag mit 0,556 darunter, der Mittelwert der 31 weiblichen Probanden mit 0,596 darüber. Sowohl der höchste (0,883) als auch der niedrigste Kappa-Wert (0,289) der gesamten Probandengruppe konnte jeweils einem männlichen Probanden zugeordnet werden. Die Mittelwerte der Kappa-Werte zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen der Reproduzierbarkeit der Zuordnung zwischen Männern und Frauen. Brillenträger erreichten im Mittel einen signifikant ($p = 0,04$) höheren Kappa-Wert (0,64) als Probanden, die keine Brille trugen (0,552). Des Weiteren war der Kappa-Wert größer als das Mittel der Kappa-Werte aller Probanden. Bei den Altersgruppen waren die Werte der zwei mittleren Altersstufen von 25 bis 29 Jahren (0,588) und 30 bis 34 Jahren (0,589) annähernd gleich und im Vergleich zu den anderen beiden Altersgruppen am höchsten. In die Gruppe der 30- bis 34-Jährigen fiel sowohl der höchste als auch der niedrigste Kappa-Wert bei allen Probanden. Der Mittelwert der über 35-Jährigen war der geringste Kappa-Wert (0,541). Die Unterschiede waren jedoch bei allen Altersgruppen nicht signifikant.

Alle Kappa-Werte über alle Gruppen hinweg, mit Ausnahme der Brillenträger, sind nach Landis und Koch als mittelmäßige Übereinstimmung zu bewerten [92]. Die Kappa-Werte der Brillenträger sind als gute Übereinstimmung zu werten. Insgesamt lässt sich sagen, dass weder das Geschlecht noch das Alter einen signifikanten Einfluss auf die Farbzuordnung in allen drei Durchgängen hatten. Lediglich das Tragen einer Brille ließ einen signifikanten Einfluss auf die Reliabilität der Zuordnung im Vergleich zur Zuordnung ohne Brille ($p = 0,04$) erkennen.

4.6.3. Interrater-Reliabilität der einzelnen Durchgänge

Des Weiteren wurde die Interrater-Reliabilität bestimmt. Diese ist in dem Fall als die Übereinstimmung der Zuordnung aller Probanden in den einzelnen Durchgängen sowie über alle Durchgänge hinweg definiert. Dafür ergaben sich folgende Fleiss' Kappa-Werte:

Tab. 12: Fleiss' Kappa-Werte der einzelnen Durchgänge und über alle Durchgänge hinweg.

Durchgang	Fleiss' Kappa-Wert
1	0,504***
2	0,563***
3	0,519***
Gesamt	0,529***

*** $p < 0,001$

Alle Kappa-Werte sind als mittelmäßige Übereinstimmung zu bewerten. Die beste Übereinstimmung der Zuordnung wiesen die Probanden im zweiten Durchgang auf.

4.7. Gibt es ein Hauptauswahlkriterium?

4.7.1. Multiple Lineare Regressionsmodelle

Durch die lineare Regression soll versucht werden zu erklären, ob und welche der Koordinaten der Toothguide 3D-MASTER® bzw. Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe die Auswahl der Koordinaten des jeweils anderen Farbmusters erklärt. Hat eine Koordinate einen besonders großen Einfluss auf die Auswahl einer anderen Koordinate?

Der standardisierte Regressionskoeffizient zeigt an, wie hoch der Einfluss der Variablen auf die Regressionsgleichung ist. Das korrigierte R^2 ist hierbei ein Gütemaß der linearen Regression. Der Wert zeigt wie gut die unabhängigen Variablen die Varianz der abhängigen Variablen erklären. Der Wert liegt zwischen 0 und 1. Je höher der Wert, desto besser erklärt das Modell die abhängige Variable [98].

Tab. 13: Der Einfluss von allen drei Parametern des Bleachedguide 3D-MASTER® (Helligkeit, Sättigung, Farbton) auf die Helligkeit des Toothguide 3D-MASTER® ist signifikant.

Variable	Regressionskoeffizient		Standardfehler
	unstandardisiert	standardisiert	
Konstante	125,750		
L* _{BLG}	1,315***	1,503***	0,034
C* _{BLG}	-0,264***	-0,228***	0,037
h° _{BLG}	-1,693***	-0,930***	0,066
R ²	0,732		
Korr. R ²	0,732		
F (df = 3; 3272)	2987,27***		

*** p < 0,001

Die Werte der Tabelle 13 lassen sich wie folgt interpretieren: Jede Erhöhung des Bleachedguide 3D-MASTER® L*-Wertes um 1 erzeugt eine Toothguide 3D-MASTER® L*-Werterhöhung im Mittel um 1,31. Bei einer Erhöhung des Bleachedguide 3D-MASTER® C*-Wertes um 1 verringert sich der L*-Wert des Toothguide 3D-MASTER® um 0,264 wird also heller. Bei einem h°-Wertanstieg verringert sich die Helligkeit um 1,69.

Tab. 14: Der Einfluss von allen drei Parametern des Bleachedguide 3D-MASTER® (Helligkeit, Sättigung, Farbton) auf die Sättigung des Toothguide 3D-MASTER® ist signifikant.

Variable	Regressionskoeffizient		Standardfehler
	unstandardisiert	standardisiert	
Konstante	-13,924		
L* _{BLG}	-0,640***	-0,748***	0,038
C* _{BLG}	0,585***	0,515***	0,041
h° _{BLG}	0,824***	0,463***	0,074
R ²	0,655		
Korr. R ²	0,655		
F (df = 3; 3272)	2070,08***		

*** p < 0,001

Die Werte der Tabelle 14 lassen sich wie folgt interpretieren: Jede Erhöhung des Bleachedguide 3D-MASTER® Helligkeitswertes um 1 erzeugt im Mittel eine Toothguide 3D-MASTER® Sättigungswertverringern um 0,64. Bei einer Erhöhung des Bleachedguide 3D-MASTER® C*-Wertes um 1 steigt der C*-Wert des Toothguide 3D-MASTER® um durchschnittlich 0,585. Wird der Farbtonwert (h°) um 1 erhöht, steigt im Mittel der Sättigungswert des Toothguide 3D MASTER® um 0,824.

Tab. 15: Der Einfluss von allen drei Parametern des Bleachedguide 3D-MASTER® (Helligkeit, Sättigung, Farbton) auf den Farbton des Toothguide 3D-MASTER® ist signifikant.

Variable	Regressionskoeffizient		Standardfehler
	unstandardisiert	standardisiert	
Konstante	42,415		
L* _{BLG}	0,236***	0,594***	0,019
C* _{BLG}	0,082***	0,155***	0,021
h° _{BLG}	0,274***	0,332***	0,037
R ²	0,594		
Korr. R ²	0,594		
F (df = 3; 3272)	1595,79***		

*** p < 0,001

Die Werte der Tabelle 15 lassen sich wie folgt interpretieren: Jede Erhöhung des Bleachedguide 3D-MAS-TER® Helligkeitswertes um 1 erzeugt im Mittel eine Toothguide 3D-MASTER® Farbtonwerterhöhung um 0,234. Bei einer Erhöhung des Bleachedguide 3D-MASTER® C*-Wertes um 1 steigt der h°-Wert des Toothguide 3D-MASTER® im Mittel um 0,082. Wird der Farbtonwert um 1 erhöht, steigt durchschnittlich der Farbtonwert des Toothguide 3D-MAS-TER® um 0,274.

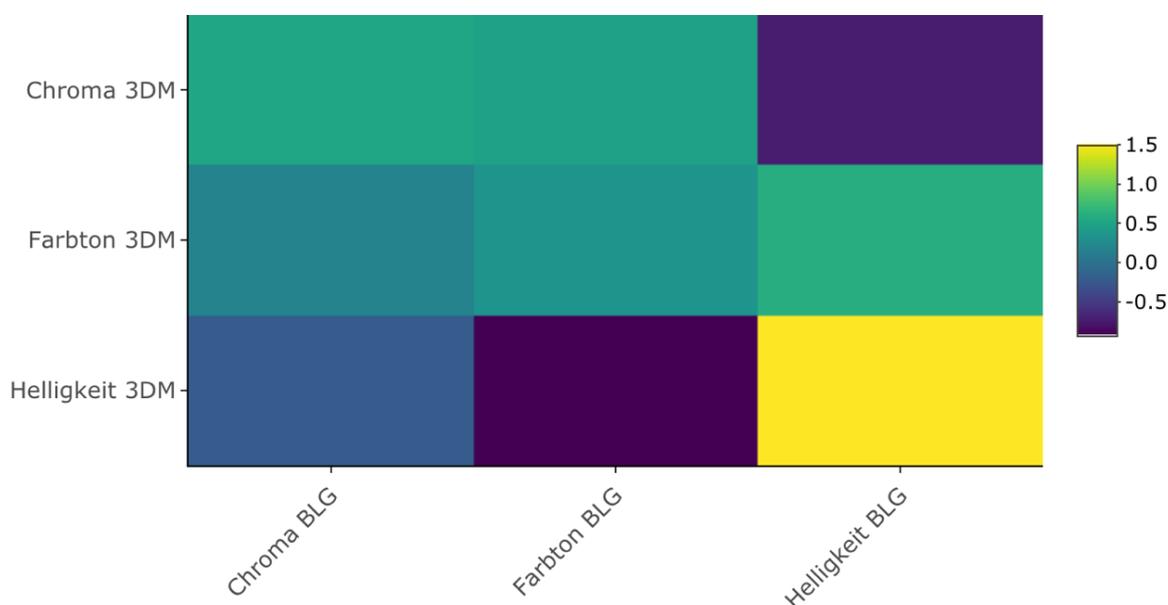


Abb. 18: Darstellung der standardisierten Regressionskoeffizienten des Toothguide 3D-MASTER® und des Bleachedguide 3D-MASTER®.

Für die Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben zu den Toothguide 3D-MAS-TER® Farben lässt sich aus diesen Ergebnissen anhand der standardisierten Regressionskoeffizienten herauslesen, dass bei den vorliegenden Daten die Helligkeit den größten Einfluss auf die Auswahl jeder Koordinate, also auch auf das gesamte Farbmuster hat. Des Weiteren

lässt sich beobachten, dass bei Farben mit einer höheren Sättigung eher dunklere Farben ausgewählt werden. Der Farbton hat einen gegensätzlichen Effekt auf die Auswahl der Helligkeit (Abb.18).

4.7.2. Vergleich der Zuordnungen in Bezug auf Farbton, Sättigung und Helligkeit

Tab. 16: Cramers V Werte des Vergleichs der Bleachedguide 3D-MASTER® Zuordnungen zwischen Farben der gleichen Helligkeit, der gleichen Sättigung und des gleichen Farbtons nach Herstellerangaben.

Vergleich	Farbe des Toothguide 3D-MASTER®				Cramers V
Helligkeit (L*)	2M1	3M1	4M1	5M1	0,896***
	0M3	2M3	3M3	4M3	0,732***
Sättigung (C*)	2L1,5		2L2,5		0,754***
	2R1,5		2R2,5		0,896***
	3L1,5		3L2,5		0,716***
	3R1,5		3R2,5		0,755***
	4L1,5		4L2,5		0,896***
	4R1,5		4R2,5		0,652***
	0M2		0M3		0,000
	2M1		2M3		0,972***
	3M1		3M3		0,943***
	4M1		4M3		0,944***
Farbton (h°)	2L1,5		2R1,5		0,000
	2L2,5		2R2,5		0,23***
	3L1,5		3R1,5		0,225***
	3L2,5		3R2,5		0,381***
	4L1,5		4R1,5		0,351***
	4L2,5		4R2,5		0,165*

* p < 0,05, ***p < 0,001

Interpretation von Cramers V nach Cohen (1988) [93] und zitiert nach Ellis (2010) [94] als Maß für den Zusammenhang:

Kleiner Effekt V = 0,1

Mittlerer Effekt V = 0,3

Großer Effekt V = 0,5

Je kleiner der Wert, desto unabhängiger ist die Zuordnung der festen Größe (Farbton, Sättigung oder Helligkeit). Die Farben 2L1,5 und 2R1,5 zeigen keinen statistisch signifikanten Zusammenhang. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die Farbzuzuordnung unabhängig vom Farbton erfolgt ist. Bei der Abhängigkeit der Zuordnung vom Farbton schwanken die Cramers V Werte zwischen 0,165 und 0,381. Dies zeigt einen kleinen bis mittleren Effekt des Farbtons auf die Farbauswahl. Mit Cramers V Werten über 0,652 zeigt die Sättigung einen großen Effekt auf die Auswahl. Dabei zeigen besonders die großen Abstände (2) der Sättigung einen starken Effekt. Ausnahmen bilden 0M2 und 0M3. Hier ist der Zusammenhang der Auswahl nicht signifikant ($p = 1,0$). Zudem hat die Helligkeit bei den Farben gleichen Farbtons und gleicher Sättigung einen starken Effekt ($V = 0,896$ und $0,732$) auf die Auswahl der Bleachedguide-Farbe. Bei der Analyse der Zuordnungen ergaben sich weitere interessante Einblicke:

- Toothguide 3D-MASTER® Farben mit dem Farbton R wurden eher dunkleren Farben bei gleicher Helligkeit und gleicher Sättigung zugeordnet. Eine Ausnahme ist 2L/R1,5. Hier war der Unterschied der Zuordnung nicht signifikant ($p = 0,068$). Ebenso zeigte Cramers V bei 4L/R2,5 nur einen schwachen Zusammenhang.
- Bei Toothguide 3D-MASTER® Farben mit unterschiedlicher Helligkeit, gleichem Farbton (M) und gleicher Sättigung konnte zwischen Sättigung 1 und 3 unterteilt werden. Bei einer Sättigung von 1 wurden die Toothguide 3D-MASTER® Farben immer der etwas helleren Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe zugeordnet. Vor allem 2M1 wurde mit 96,2 % deutlich häufiger 1M1,5 zugewiesen. Auch 3M1 wurde deutlich heller beurteilt. Hier wurde mit 53,2 % 1,5M2 als ähnlich zugeordnet. Bei den dunkleren Farben 4M1 und 5M1 ist die Zuordnung zu viel helleren Farben weniger deutlich.

Bei einer konstanten Sättigung von 3 und unterschiedlichen Helligkeiten fiel auf, dass häufig die um circa 0,5 dunklere Farbe ausgewählt wurde. Ausnahme bildet 4M3, diese wurde mit 89,7 % deutlich häufiger 5M2,5 zugeordnet.

- Dieser Unterschied zwischen den Gruppen konnte auch noch mal im direkten Vergleich zwischen Farben gleicher Helligkeit und gleichem Farbton bei unterschiedlicher Sättigung (1 bzw. 3) gezeigt werden. Die Farben 0M2 und 0M3 zeigen fast keinen Unterschied bei der Zuordnung.

4.7.3. Korrelation zwischen Bleached-Index des Toothguide 3D-MASTER® und Auswahl der Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe

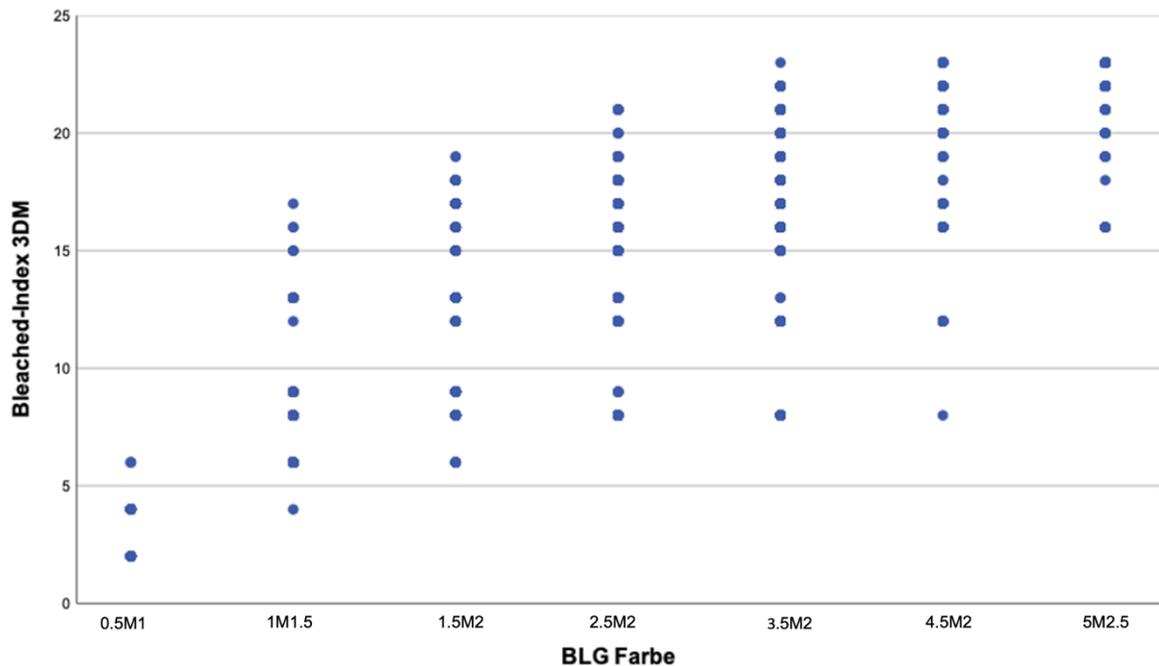


Abb. 19: Korrelation des Bleached-Index des Toothguide 3D-MASTER® (3DM) mit den zugeordneten Bleachedguide 3D-MASTER® Farben (BLG). Es wurde der Index ausgewählt, der bei zehn Messungen am häufigsten auftrat.

In der Abbildung 19 lässt sich erkennen, dass zwischen den gemessenen Bleached-Indices des Toothguide 3D-MASTER® und den Bleachedguide 3D-MASTER® Farben eine positive Korrelation mit einem Koeffizienten nach Spearman von 0,820 ($p = 0,01$) besteht.

4.7.4. Bleached-Index: Multiples lineares Regressionsmodell

Tab. 17: Das multiple lineare Regressionsmodell zeigt den Einfluss von allen drei Parametern des Toothguide 3D-MASTER® (Helligkeit, Sättigung, Farbton) auf die gemessenen Bleached-Indices.

Variable	Regressionskoeffizient		Standardfehler
	unstandardisiert	standardisiert	
Konstante	-13,924		
L^*_{3DM}	-0,282***	-0,290***	0,008
C^*_{3DM}	0,825***	0,830***	0,005
h°_{3DM}	0,131***	0,061***	0,017
R^2	0,943		
Korr. R^2	0,943		
F (df = 3; 3272)	18046,885***		

*** $p < 0,001$

Die Werte der Tabelle 17 lassen sich wie folgt interpretieren: Jede Erhöhung des Toothguide 3D-MASTER® Helligkeitswertes um 1 erzeugt im Mittel Bleached-Index eine Verringerung um 0,282. Bei einer Erhöhung des Toothguide 3D-MASTER® C*-Wertes um 1 steigt der Bleached-Index um durchschnittlich 0,825. Wird der Farbtonwert um 1 erhöht, steigt im Mittel der Bleached-Index um 0,131. Der Regressionskoeffizient von 0,943 zeigt an, dass das Modell die Einflüsse der unabhängigen Variablen sehr gut darstellt.

5. Diskussion

Die vorliegende Studie wurde in dieser Form das erste Mal durchgeführt. Daher werden zunächst Studiendesign und Durchführung diskutiert. Im zweiten Teil schließt sich die Ergebnisdiskussion an.

5.1. Methodendiskussion

5.1.1. Studiendesign

Ziel dieser Arbeit war ein explorativer, visueller sowie elektronischer Vergleich von „No-Match Paaren“ zwischen Toothguide 3D-MASTER® Farben und Bleachedguide 3D-MASTER® Farben. Es sollten erste Anhaltspunkte für die Kriterien der visuellen Farbauswahl beim Vergleich zweier systemverwandter Farbmusterringe gesammelt werden. Die elektronische Vermessung mittels Easyshade® V diente hier als Referenzmessung. Den Hauptteil der Studie machte die visuelle Zuordnung aus. Da es sich um zwei sich überschneidende Farbmusterringe handelte, wurden doppelte Farben aussortiert und so die Anzahl der Zuordnungen verringert. Dadurch reduzierten sich die Auswahlmöglichkeiten der Zuordnung und damit auch die Anzahl der nötigen Vergleiche (von $29 \times 15 = 435$ auf $21 \times 7 = 147$). Für die Zuordnung wurden pro Proband und Durchgang circa fünf Minuten eingeplant. Diese Zeit wurde bei der Durchführung allerdings von den meisten Probanden überschritten. Ein Belassen aller 15 Bleachedguide 3D-MASTER® Farben zur Farbauswahl hätte ggf. eine differenziertere Zuordnung ermöglicht, jedoch die Zeit für die Durchführung der Zuordnung noch weiter verlängert ($21 \times 15 = 315$). Des Weiteren sah es das Studiendesign nicht vor, die Zuordnung von den einzelnen Probanden beurteilen zu lassen, sondern es wurde die Anzahl der Zuordnungen des Probandenkollektivs ausgewertet. Anhand der Anzahl der Zuordnungen lässt sich im Sinne des Mehrheitsprinzips der Grad der empfundenen Ähnlichkeit annäherungsweise interpretieren. Diese Überlegung orientiert sich an Witzel, der in seiner Dissertation unter anderem verschiedene Methoden der Farbbestimmung mit der visuellen Farbbestimmung der Mehrheit verglich. Demnach gibt nichts die „wahre“ Farbe besser wieder als die Mehrheitsmeinung, auch wenn damit kein Goldstandard etabliert wird [43]. Hier wäre es sicherlich interessant den Fragebogen zu erweitern, indem die Probanden die empfundene Ähnlichkeit bewerten und dies mit der Zuordnung aller Probanden zu vergleichen.

5.1.2. Visuelle Zuordnung

Die Wahrnehmung von Farben wird durch viele Faktoren beeinflusst [65]. Dabei sind die Umgebung [62], die Lichtverhältnisse [99] und der Beobachter von Relevanz [26]. So können in

der Zahnarztpraxis beispielsweise die Kleidung des Patienten, die Beleuchtung des Zahnarztstuhls in Kombination mit Sonnenlicht und die Ermüdung der Augen zur Verzerrung der Wahrnehmung führen [28, 62]. Des Weiteren spielen Medikamenteneinnahme und Farbsehschwächen eine Rolle [4, 26, 28]. Um die Beeinflussung der Zuordnung in dieser Studie durch die externen Faktoren Umgebungs- und Lichtverhältnisse so gering wie möglich zu halten, wurde die visuelle Versuchsdurchführung unter standardisierten Bedingungen durchgeführt. Die für den Abmusterungsplatz verwendete Lichtstärke betrug 2000 Lux. Um durch eine Mischung verschiedener Lichtquellen sowie die damit verbundenen Metameriephänomene und Beleuchtungskonflikte eine Beeinflussung der Zuordnung zu unterbinden, wurden alle weiteren Lichtquellen wie die Deckenbeleuchtung und Tageslichteinfall ausgeschaltet [62, 71]. Die Versuchsanordnung mit idealen Beleuchtungsbedingungen spiegelt nicht die Alltagsbedingungen in der Praxis wider, sie wurde jedoch gewählt, um eine möglichst „reine“ Beurteilung der Farben zu gewährleisten. Eine neutral graue Unterlage sowie eine neutral graue Wand sorgen für eine Reduktion von Kontrasteffekten wie dem Helligkeits-, Sättigungs-, Farbton-, Raum- und Konsekutivkontrast. Diese visuellen Effekte können zu einer veränderten Farbwahrnehmung und optischen Täuschungen führen, da der Beobachter nicht immer in der Lage ist die Phänomene zu erkennen [26]. Durch den Vergleich zweier Farbringe konnten alle patientenbezogenen Faktoren wie Kleidung, Geschlecht, Alter oder Hygienestatus der Zähne ausgeschlossen werden [65]. Die Farbringmuster wurden praxisnah und für die spätere Identifizierung in ihrer Metallhalterung belassen und so auch instrumentell vermessen.

Durch das Studiendesign war es nicht möglich die Beeinflussung der Farbauswahl durch den Betrachter vollständig auszuschalten. Farbsehschwächen wurden durch Befragung der Probanden ausgeschlossen. Es wäre möglich, dass die Probanden nicht von ihrer Farbsehschwäche wussten oder unwahrheitsgemäß geantwortet haben und so fälschlicherweise inkludiert wurden. Hier wäre ein Farbsehtest eine sicherere Methode gewesen Probanden als farbhuntüchtig auszuschließen. Des Weiteren spielt das Alter der Probanden eine Rolle. Es ist bekannt, dass sich circa ab dem 30. Lebensjahr die Hornhaut und Linse des Auges zunehmend gelb verfärben und dadurch eine Veränderung der Wahrnehmung von Farben auftritt. Dies wirkt sich auf die Unterscheidung zwischen Weiß und Gelb aus, welche gerade bei Zahnfarben und Bleaching ein wichtiges Differenzierungsmerkmal darstellt. Mit zunehmendem Alter verstärkt sich dieser Effekt und wird mit circa 60 Jahren klinisch relevant [26, 100]. 51,9 % der Probanden waren mindestens 30 Jahre alt und könnten so von diesem Effekt bereits betroffen sein. Ein weiterer Faktor, der in dieser Studie nicht ausgeschlossen werden konnte, war die Beeinträchtigung der Sehkraft durch die Ermüdung der Augen. Da auf die Arbeitszeiten der Probanden Rücksicht genommen wurde, um den Klinikablauf nicht zu stören, konnten die Durchgänge nicht immer im gleichen Abstand (mindestens jedoch eine Woche) und zur gleichen Uhrzeit stattfinden. Des Weiteren wurde nicht auf die Einnahme von Medikamenten,

Übermüdung durch Schlafmangel, Alkohol- und Kaffeekonsum geachtet. Sowohl Kaffee, Alkohol als auch einige Medikamente, wie beispielsweise orale Kontrazeptiva, können das visuelle System im Gehirn und somit auch die Farbwahrnehmung beeinflussen. Da 59,4 % der Probanden weiblich waren, könnte die von den empfängnisverhütenden Mitteln ausgehenden Rot-Grün oder häufiger Blau-Gelb Unterscheidungsschwierigkeiten Einfluss auf die Studie gehabt haben [26, 39, 73, 101, 102]. Für die Probanden gab es kein Zeitlimit. Es wurde im Vorfeld jedoch darüber aufgeklärt, dass ein Durchgang ungefähr fünf Minuten dauern sollte, um durch die Dauer jedes Durchgangs eine Limitierung der Anstrengung für die Augen zu erreichen [62]. Durch das Aussortieren der doppelten Farben konnte die Dauer der einzelnen Durchgänge und somit die Ermüdung der Augen der Probanden ebenfalls verringert werden. Einen weiteren Einfluss auf die Qualität der Farbestimmung haben Wissen und Erfahrung in diesem Bereich. Damit verbunden sind die Herangehensweise und Systematisierung bei der Zuordnung. Studien zeigen, dass durch Training die visuelle Farbnahme verbessert werden kann [99, 103, 104]. Vor der Durchführung der visuellen Zuordnung wurden beide Farbmusterhalter zerlegt. Dies bedeutet, dass die systematische Anordnung des Toothguide 3D-MASTER® und die Abstufung nach Helligkeit des Bleachedguide 3D-MASTER® als Auswahlhilfe für die Probanden ausgeschaltet wurden. Zudem wurde ein zeitlicher Abstand zwischen den Durchgängen von mindestens einer Woche gewahrt, um einen Übungseffekt und ein Memorieren der Zuordnungen zu verringern. Alle Probanden waren Zahnärzte, dabei spielte es keine Rolle, wie lange sie schon approbiert und in welchem Bereich der Zahnmedizin sie tätig waren. Die Zuordnung in Bezug auf die Erfahrung mit Farbestimmungen wurde in dieser Arbeit nicht betrachtet. Daher ist bei dem Probandenkollektiv davon auszugehen, dass eine gewisse Streuung der Zuordnungen auf diese Tatsache zurückzuführen ist.

5.1.3. Instrumentelle Farbbestimmung

Die instrumentellen Messungen wurden mit dem Spektralphotometer Easyshade[®] V der VITA Zahnfabrik durchgeführt. Diese digitale Farbbestimmung soll ermöglichen, die Beeinflussung durch die Umgebungsbeleuchtung und die Unzulänglichkeiten des menschlichen Auges als Fehlerquelle der Farbbestimmung auszuschalten. Das Ziel sind reproduzierbare Messergebnisse [26, 28]. In einer Metaanalyse von Borse et al., welche 21 Veröffentlichungen zur visuellen und instrumentellen Farbbestimmung aus den Jahren 2002 bis 2018 berücksichtigte, zeigte der Easyshade[®] V die höchste Genauigkeit und Reliabilität [105]. In diversen Studien wurde der Easyshade[®] V als Referenzinstrument bei der Farbbestimmung verwendet [12, 18, 68, 84, 85]. Es kann jedoch aufgrund falscher Handhabung zu Einflüssen des Umgebungslichts kommen. Meist ist ein fehlerhaftes Anlegen der Messsonde auf die Oberfläche des (Muster-)Zahns ursächlich für falsche Messergebnisse [106]. In Vorversuchen wurde die Handhabung des Easyshade[®] V geübt und eine Repositionierungshilfe angefertigt, um die Messspitze sicherer in einem Winkel von 90° Grad zur Oberfläche zu platzieren. Zusätzlich wurden die Messungen unter den gleichen Beleuchtungsbedingungen wie die visuelle Abmusterung durchgeführt [107]. Eine Winkelabweichung lässt sich jedoch nicht vollständig ausschließen. Der Easyshade[®] V hat für unterschiedliche Situationen mehrere Modi der Farbmessung. Es gibt unter anderem sowohl für natürliche Zähne als auch zur Überprüfung von Restaurationen einen eigenen Modus. Da es sich in dieser Studie um die Vermessung zweier Farbringe handelte, wurde für die Durchführung der sogenannte Testmodus gewählt. In der Standardauslieferung des Easyshade[®] V ist dieser Modus für das Training des Benutzers anhand von Farbringen gedacht. Es werden im Gegensatz zu den anderen Modi keine Farbkordinaten ausgegeben, sondern jeweils das nächstgelegene Farbmuster in kategorialen Farbangaben des Toothguide 3D-MASTER[®] oder des VITA classical[®] Farbrings angezeigt. Mit dem Easyshade[®] V, der für die Studie zur Verfügung stand, war es mithilfe der Helper-Software möglich, sich auch im Testmodus Farbkordinaten und Bleached-Indices anzeigen zu lassen. Seitens der Autorin konnten keine Studien ausfindig gemacht werden, in denen auf diese Weise Farbkordinaten von Farbringen ermittelt wurden. Die Validität, also inwieweit das Messinstrument die „wahre Farbe“ misst, ist ein wichtiges Gütekriterium für die angewendete Methode. Ülker testete die Vorgängerversion des Easyshade[®] V, den Easyshade[®] Advanced, auf Reliabilität und Validität in den verschiedenen Modi an unterschiedlichen Materialien. Für die Validität, wie auch in der vorliegenden Studie, wurde die kategoriale Farbangebe der Farbringe als der „wahre“ Wert angesehen. Ülker verwendete ebenfalls von zehn Wiederholungsmessungen die Farbangebe, die am häufigsten angezeigt wurde. Dabei zeigte der Trainingsmodus bei der Vermessung des Toothguide 3D-MASTER[®] Farbrings eine mittelmäßige Übereinstimmung. Insgesamt jedoch erreichte der Testmodus im Vergleich mit der Einzelzahnmessung und dem Modus für keramische Restaurationen die größte Trefferquote von 65,38 % [18].

Als weitere potenzielle Fehlerquelle, welche sowohl für die visuelle als auch die instrumentelle Abmusterung eine Rolle spielt, ist die Chargeninkonsistenz bzw. eine vom Hersteller ausgehende Farbungenauigkeit der Farbschlüssel zu nennen. So konnten Todorovic et al. in einer Studie, die mit dem Easyshade[®] V durchgeführt wurde, feststellen, dass auch verschiedene Farbringsysteme des gleichen Herstellers in ihren Messergebnissen differieren [108]. Eine Chargeninkonsistenz konnten Kim et al. auch zwischen baugleichen Easyshade[®] V Geräten mit unterschiedlicher Seriennummer feststellen. Neben natürlichen Zähnen wurden auch die Farbmuster des Toothguide 3D-MASTER[®] vermessen. Hier zeigten sich bei der Messung der Koordinaten Unterschiede zwischen den beiden Geräten ($\Delta E_{00} = 2,26$) [106]. Letzteres spielte für die Datenauswertung der vorliegenden Arbeit keine Rolle, da alle Messungen mit dem gleichen Easyshade[®] V durchgeführt wurden. Ein Vergleich mit Messwerten anderer Arbeiten ist so jedoch nicht sinnvoll. Da es keinen Goldstandard für die Vermessung von Farben gibt und somit auch keine Methode die „wahre“ Farbe zu ermitteln, ist die Messung immer nur eine Annäherung. Lehmann et al. konnten keine Konformität zwischen dem Easyshade[®] V und einem vom CIE akzeptierten Referenzsystem feststellen. Jedoch konnte auch für andere Farbbestimmungssysteme keine Übereinstimmung ermittelt werden [74]. Die Validität der Koordinatenmessungen konnte daher in dieser Arbeit nicht überprüft werden. Auch dies spielte für die Datenauswertung der vorliegenden Arbeit keine Rolle, da alle Messungen mit dem gleichen Easyshade[®] V durchgeführt wurden. Ein Vergleich der Koordinaten-Messwerte mit denen anderer Arbeiten ist deshalb ebenfalls nicht sinnvoll.

5.2. Ergebnisdiskussion

Die Nullhypothese lautete, dass kein Zusammenhang zwischen den Toothguide 3D-MASTER® Farben und der jeweils ausgewählten Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe besteht. Diese Nullhypothese konnte verworfen werden. Um herauszufinden, inwieweit ein Zusammenhang zwischen den beiden Farbringen auf visueller Ebene besteht, wurden Forschungsfragen formuliert, welche auf den folgenden Seiten im Kontext mit der aktuellen Literatur diskutiert werden.

5.2.1. Zuordnung der Farbpaare

Welche der zugeordneten Farbpaare waren nach ISO/TR 28642 akzeptabel? Gab es Bleachedguide 3D-MASTER® Farben, die eindeutiger zugeordnet wurden als andere?

Die Aufgabe der Probanden war, jeder der 21 Toothguide 3D-MASTER® Farben eine der sieben Bleachedguide 3D-MASTER® Farben zuzuordnen, die sie als ähnlich empfanden. Dabei wurde keine Farbkombination als richtig oder falsch gewertet und alle Daten in die Auswertungen einbezogen. Zwischen den Durchgängen über alle Probandenzuordnungen ($n = 52$) wurde kein signifikanter Unterschied ($p > 0,9$) festgestellt. Paravina et al. vermittelten einen umfassenden Überblick über die Akzeptanz- und Wahrnehmbarkeitsschwellen von Farbunterschieden in der klinischen Zahnheilkunde sowie zu Forschungszwecken in einem Review. Unter anderem wurden Arbeiten aus den Jahren von 1987 bis 2018 zusammengetragen, in denen verschiedene Schwellenwerte ermittelt wurden [56]:

50:50 % PT: $\Delta E_{ab} = 0,4 - 1,9$

50:50 % PT: $\Delta E_{00} = 0,8 - 1,7$

50:50 % AT: $\Delta E_{ab} = 1,5 - 5,5$

50:50 % AT: $\Delta E_{00} = 1,8 - 4,1$

In der Vielzahl an Schwellenwerten und unterschiedlich verwendeten Farbdifferenzformeln sahen Paravina et al. die Notwendigkeit für eine Standardisierung der Forschung [56]. In jüngerer Literatur zur Zahnfarbbestimmung werden immer häufiger die 50/50 %-Wahrnehmungs- und 50/50 %-Akzeptanzschwellenwerte aus der Norm ISO/TR 28642:2016 verwendet. In einem Review von Perez et al. stellten die Autoren heraus, dass bei Fragen zur Qualität der Zahnfarbenabstimmung in der Zahnheilkunde die dort geltenden Werte verwendet werden sollten. Auch die ebenfalls in dieser Arbeit genutzten CIEDE2000 Wahrnehmungs- und Akzeptanzwerte seien zur Qualitätskontrolle bei der Auswahl ästhetischer Dentalmaterialien, zur Interpretation visueller sowie instrumenteller Befunde in der klinischen Zahnheilkunde und zu Forschungszwecken heranzuziehen [109]. Somit orientiert sich die vorliegende Arbeit an den aktuellen Normen zur Qualitätssicherung für dentale Farbmusterringe.

Entsprechend ISO/TR 28642 Norm waren drei von 79 Zuordnungen (3,8 %) (0M3/0,5M1; 2L1,5/2,5M2; 3L2,5/3,5M2) als sehr gute bzw. akzeptable Übereinstimmung zu bewerten. Nach der 50/50 %-Akzeptanzschwelle CIEDE2000 [57] gab es mit 16,5 % (n = 13) mehr akzeptable Übereinstimmungen: 0M2/0,5M1; 0M3/0,5M1; 2L1,5/1,5M2; 2L1,5/1M1,5; 2L1,5/2,5M2; 2R1,5/1M1,5; 2R1,5/1,5M2; 2R1,5/2,5M2; 3L1,5/2,5M2; 3L2,5/3,5M; 3R1,5/2,5M2; 3R2,5/3,5M2; 4R2,5/4,5M2. Zwischen 0M3 und 0,5M1 wurde eine sehr niedrige Farbdifferenz ($\Delta E_{00} = 0,4$, $E_{ab} = 1,1$) festgestellt. Damit liegt die Differenz nur sehr knapp über dem mit $\Delta E_{ab} = 1$ bestimmt kleinsten Farbunterschied, den das menschliche Auge unter optimalen Bedingungen gerade noch erkennen kann [110, 111]. Da beide Farben vom Gerät als 0M3 erkannt wurden, könnte ein Messfehler seitens des Easyshade® V oder ein Verarbeitungsfehler des Farbrings vorliegen [108]. Bei sieben von 21 (33,33 %) Toothguide 3D-MASTER® Farben zeigte die am häufigsten gewählte Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe auch einen akzeptablen Farbabstand unter 1,8 nach CIEDE2000. Nach ISO/TR28642 waren es nur zwei. Dies unterstreicht die bisherigen Erkenntnisse anderer Studien, dass die CIEDE2000 Farbdifferenzformel (2:1:1) die visuelle Wahrnehmung besser widerspiegelt als die CIE L*a*b*-Formel [4, 52, 55]. Bei der Zuordnung von 2R1,5 und 2L1,5 war die meistzugeordnete Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe nicht diejenige mit dem geringsten deklarierten Farbabstand. Alle Zuordnungen zu 2R1,5 waren nach der CIEDE2000 Farbdifferenzformel als akzeptabel einzustufen. Die Kombination 2L1,5/2,5M2 wurde nur von 3,4 % der Probanden gewählt, obwohl sie die einzige akzeptable Übereinstimmung nach CIELAB für 2L1,5 darstellt und den geringsten Gesamtfarbabstand nach CIEDE2000 aufweist. Ähnliches konnten Pecho et. al. in einer Studie zur Analyse des Einflusses von Helligkeits-, Sättigungs- und Farbtonunterschieden auf die Farbzurordnung von Zahnmedizinstudenten feststellen. Die Farbbestimmung von Referenzfarbkörpern erfolgte sowohl mit dem VITA classical® als auch mit dem Toothguide 3D-MASTER® und es wurden auch hier die Gesamtfarbabstände errechnet. Vor allem bei der Auswahl mittels Toothguide 3D-MASTER® wies das meist gewählte Farbpaar nicht immer die geringste Gesamtdifferenz auf [52].

Die Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe 0,5M1 war mit Abstand am eindeutigsten zu 0M2 und 0M3. Dies lässt sich auch am Herfindahl-Index der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben ablesen. 0,5M1 wurde mit der geringsten Streuung (HHI = 0,491) zugeordnet. Auch Igiel et al. zeigten, dass helle Farben besser von Probanden bestimmt werden als dunklere [5]. Diese eindeutige Zuordnung lässt sich auch darauf zurückführen, dass die sieben Helligkeitsstufen des Bleachedguide 3D-MASTER® im Vergleich mit der Abstufung der Toothguide 3D-MASTER® Farbmuster sehr viel größer waren, sodass den Probanden keine Unterscheidung möglich war. Somit wurde vermutlich das hellste vorhandene Bleachedguide 3D-MASTER® Farbmuster ausgesucht. Umgekehrt gilt dies, wenn auch weniger deutlich, für die dunkelste Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe 5M2,5 (HHI = 0,333). Die am häufigsten

zugeordneten Bleachedguide 3D-MASTER® Farben 3,5M2 (776 Zuordnungen, HHI = 0,114), 2,5M2 (748 Zuordnungen, HHI = 0,132) und 4,5M2 (495 Zuordnungen, HHI = 0,157) weisen auch eine entsprechende Streuung bei der Zuordnung auf. Hier ist neben der beschränkten Auswahlmöglichkeit auch zu beachten, dass die Farben des Toothguide 3D-MASTER® im Helligkeitsbereich 2-4 stärker repräsentiert sind als andere Farben mit höherer und geringerer Helligkeit [45].

5.2.2. Validität der Messungen

Stimmen die im Testmodus gemessenen kategorialen Farben und der Bleached-Index mit den Farb- bzw. Indexangaben überein?

In diesem Untersuchungsabschnitt sollte die Validität der Angaben im Testmodus überprüft werden. Es wurde zwischen der Hauptanzeige des Easyshade® V und der Anzeige der Mischfarbe unterschieden. Letztere konnte nur mithilfe der Helper-Software angezeigt werden. Bei der Auswertung der Messungen der Hauptanzeige des Toothguide 3D-MASTER® wurde eine vollständige Übereinstimmung ($\kappa = 1$) zwischen Mess- und „wahren“ Werten festgestellt. Die Anzeige der Mischfarben erzielte mit $\kappa = 0,876$ immer noch eine sehr gute Übereinstimmung. Ülker untersuchte in seiner Dissertation ebenfalls die Validität des Toothguide 3D-MASTER®. Er überprüfte die verschiedenen Messkategorien des Easyshade® V. Dabei stellte er fest, dass im Trainingsmodus für den Toothguide 3D-MASTER® die höchsten Kappa-Werte erzielt wurden ($\kappa = 0,601$). Die Mischfarbenanzeige stand ihm nicht zur Verfügung. Von dem ebenfalls von ihm untersuchten VITA classical® Farbring wurde im Einzelzahnmodus die bessere Übereinstimmung erzielt [18]. Die Untersuchung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farbmuster im Testmodus zeigte keine Übereinstimmung zwischen Messung und Herstellerangaben („wahrer“ Wert), Kappa war nicht signifikant. Bei den Mischfarben ergab die Validitätskennzahl einen Wert von $\kappa = 0,527$.

Die VITA Zahnfabrik H. Rauter und GmbH & Co. KG weist darauf hin, dass Farbmuster anderer Hersteller nicht für die Vermessung im Testmodus geeignet seien, da hier die Ergebnisse abweichen könnten [9]. Es wurden jedoch lediglich Farbmuster aus dem Hause VITA verwendet. Die große Diskrepanz zwischen den Gültigkeitstests von Toothguide 3D-MASTER® und Bleachedguide 3D-MASTER® ist interessant, da die Farbmusterwerte des Bleachedguide 3D-MASTER® und des Toothguide 3D-MASTER® aus dem gleichen System entnommen sind.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Validität der elektronischen Farbbestimmung des Toothguide 3D-MASTER® im Testmodus basierend auf den vorliegenden Daten hinsichtlich der Angabe der kategorialen Farbe als sehr gut bewertet werden kann. Für den

Bleachedguide 3D-MASTER® sind die Daten der Hauptanzeige nicht signifikant. Für die Mischfarbe lässt sich die Validität als mittelmäßig bewerten.

Die Validität des Bleached-Index konnte nur an den Messungen des Bleachedguide 3D-MASTER® erfolgen. Es wurde nur ein Bleached-Index korrekt gemessen (Farbe 1M1,5; Index 7; $\kappa = 0,136$). Bei dieser Farbe wurde im Vorfeld auch die kategoriale Mischfarbe zehnmal korrekt angegeben. Nach Wissen der Autorin liegen keine Studien über die Gültigkeit der Messung des Bleached-Index mit dem Easyshade® V vor. Eine mögliche Ursache für die Messabweichung könnte ein Berechnungsfehler sein. Durch die Einspeisung verschiedener Studien- und Farbringdaten der VITA Zahnfabrik ist die Farbmessung immer eher ein Abgleichen mit vorhandenen Daten [82, 112]. Da die Bleached-Index-Messung im Testmodus eigentlich nicht vorgesehen ist, wäre es denkbar, dass auf die dafür nötigen Daten nicht zugegriffen wird. Die Daten könnten also „falsch“ interpretiert worden sein. Dagegen spräche, dass die genauere Mischfarbe auch für andere Farben (3,5M2, 4,5M2, 5M2,5) korrekt erfasst wurde, der Bleached-Index jedoch nicht. Dazu sind sicherlich noch weitere Untersuchungen sinnvoll.

5.2.3. Reliabilität

Wie hoch war die Interrater-Reliabilität in Abhängigkeit von Durchgang, Geschlecht, Alter, Brille, Toothguide 3D-MASTER® Farbe?

Die Reliabilität in dieser Studie bezog sich auf die Reproduzierbarkeit der Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farbmuster zu dem Toothguide 3D-MASTER® Farbmuster. Es wurde überprüft, ob Probanden einen Unterschied zwischen den Zuordnungen zeigten, bezogen auf Durchgang, Geschlecht, Alter oder das Tragen einer Brille.

In der Literatur wird der Cohens Kappa bzw. der Fleiss' Kappa-Wert in vielen Studien zur Beurteilung der Reliabilität sowohl bei visueller als auch instrumenteller Farbnahme herangezogen [5, 35, 83, 113]. Es ist jedoch zu beachten, dass die Definition von Übereinstimmung und das Studiendesign, je nach Studie, unterschiedlich sind. So wurden bisher in den meisten Studien zum Vergleich zweier Farbringe Referenzfarbkörper hergestellt, deren Farbe bestimmt werden sollte. Wobei die Zielfarbe vorab oder durch Messung festgelegt wurde und so die Zuordnung als richtig oder falsch zu bewerten war [5, 35, 83, 113]. Ausnahme ist die Studie von Lehmann et al., in dem Fall wurden zwei VITA classical® Farbringe miteinander verglichen. Auch hier gab es jedoch eine genaue Zielvorgabe und die Reliabilität wurde als die Wiederholung der „richtigen“ Zuordnung bewertet [63]. In der vorliegenden Studie wurde keine Zuordnung als falsch oder richtig festgelegt, sondern die Zuordnungen der Durchgänge wurden im Vergleich betrachtet. So konnten zwei Personen, die unterschiedlich zugeordnet haben, trotzdem den gleichen Kappa-Wert erreichen. Insgesamt variierten die einzelnen Personen

zwischen einem minimalen Kappa-Wert von 0,289 und maximal 0,883. Über die Rolle des Geschlechts der Probanden und dessen Auswirkung auf die Farbbestimmung wird in der Literatur widersprüchlich berichtet. So wird bei Haddad et al. Frauen eine Überlegenheit bei der Farbbestimmung zugeschrieben [114]. Milagres et al. sehen Männer führend bei der Farbbestimmung [115]. Viele Studien zeigen ein differenzierteres Bild und sehen das Geschlecht nicht als signifikanten Faktor [17, 116-118]. Tatsächlich zeigten in der vorliegenden Studie Frauen eine minimal bessere Reproduzierbarkeit der Zuordnung ($\kappa = 0,596$) über alle Durchgänge hinweg als die männlichen Probanden ($\kappa = 0,556$). Jedoch war dieser Unterschied statistisch nicht signifikant. Bezogen auf das Alter zeigten die Probanden im Alter von 25 bis 29 Jahren im Mittel die größten Übereinstimmungen gefolgt von den 30- bis 34-Jährigen. Die Altersgruppe der 25- bis 29-Jährigen war mit drei Probanden und die Gruppe der über 35-Jährigen mit sieben Personen deutlich weniger repräsentiert als die beiden anderen Gruppen. Insgesamt konnte die Übereinstimmung nach Landis und Koch in allen Altersgruppen als mittelmäßig bewertet werden [92]. Zwischen den Altersgruppen zeigte sich jedoch kein signifikanter Unterschied in der Reliabilität der Zuordnung. Das Alter kann verschiedene Auswirkungen auf die Zuordnung von Farben haben, zum einen kann mit dem Alter eine größere Erfahrung einhergehen. Die Erfahrung als separater Effektor soll nach einigen Untersuchungen einen Einfluss auf die Zuordnung und Reproduzierbarkeit haben, da die Probanden über die Zeit eine Systematik bei der Farbbestimmung entwickelt haben [20, 116]. Andere Studien haben diese These widerlegt [114, 117-119]. Des Weiteren kann das Alter auch einen Einfluss auf die Wahrnehmung von Farben haben. Klinisch relevant wird diese Entwicklung jedoch erst ab dem 50.-60. Lebensjahr. Es ist nicht auszuschließen, dass die beiden altersbedingten Effekte einen Einfluss auf die über 30-jährigen Probanden hatten und sich vielleicht auch gegenseitig aufheben bzw. kompensiert werden, weshalb kein signifikanter Unterschied zu den jüngeren unerfahrenen Probanden festzustellen war. In ihrer Studie zum Vergleich zweier Farbringe stellten Alomari et al. fest, dass das Alter und Geschlecht keinen Einfluss auf die Zahnfarbbestimmung haben. Der Beruf (Zahnarzt/Zahntechniker) und die Erfahrung führten allerdings zu einer erfolgreicherer Verwendung des VITA classical® Farbrings [119]. Dies unterstreicht die in dieser Untersuchung fehlenden Differenzen der Reproduzierbarkeit bezogen auf das Alter, denn in der vorliegenden Arbeit waren die älteren Probanden Zahnärzte verschiedener Fachrichtungen. Dabei waren also auch Personen, die nie oder unregelmäßig Farbbestimmungen durchführten. Ein höheres Alter war also in dieser Studie nicht gleichbedeutend mit mehr Erfahrung bei der Zahnfarbbestimmung. Brillenträger ($n = 16$) zeigten eine bessere Übereinstimmung ihrer Zuordnungen als Nicht-Brillenträger ($n = 36$). Brillenträger waren die einzige Gruppe mit einer guten Übereinstimmung. Die Studienlage zum Einfluss von Brillen und/oder Kontaktlinsen auf die Farbzusammenhang bzw. Farbbestimmung ist zurzeit sehr übersichtlich. Zwei Studien aus den Jahren 2010 und 2011 von Capa et al. zeigten keinen Zusammenhang zwischen der Fähigkeit der Farbbestimmung und dem Tragen von Brillen bei Studenten

verschiedener klinischer Semester [116, 120]. Auch nach Samra et al. und einem Artikel von Afrashtehfar et al. haben Fehlsichtigkeit wie Myopie, Hyperopie und Astigmatismus, korrigiert mit Brillen oder Kontaktlinsen, keinen Einfluss auf die Farbbestimmung [103, 121]. In anderen Studien zur Farbbestimmung wurden Brillenträger und Kontaktlinsenträger als potentielle Quelle für Ungenauigkeiten ausgeschlossen [122] oder keine Angaben dazu gemacht, ob Probanden Brillenträger waren [73]. Es ist zu beachten, dass die Daten der vorliegenden Untersuchung sich auf die Reproduzierbarkeit der Zuordnung der Farbränge zueinander beziehen. Daher ist ein direkter Vergleich mit den oben genannten Studien schwierig, da es sich hier um keine Studien zur Reliabilität handelte. Hierzu gibt es, soweit bekannt, keine Arbeit, welche die Intrarater-Reliabilität in Abhängigkeit von Brillen untersucht hat. Des Weiteren ist das Probandenkollektiv der Brillenträger in der vorliegenden Studie mit 16 Probanden recht klein. In Studien, die keinen Effekt der Brille auf die Farbauswahl feststellen konnten, war die Gesamtanzahl der Probanden und somit auch der Anteil der Brillenträger höher [116]. Um die Reproduktion der Zuordnung in Abhängigkeit von der Toothguide 3D-MASTER® Farbe in einem gewissen Maße zu beurteilen, kann in diesem Fall der HHI herangezogen werden. Eine geringe Streuung der Zuordnung bedeutet ein größeres Maß an Reproduktion unabhängig von der zugeordneten Farbe. Vor allem die hellsten Farben 0M2, 0M3 und 2M1 zeigten die mit Abstand beste Reproduzierbarkeit. Dies entspricht auch den Ergebnissen von Igiel et al. und Junker [5, 123]. In einer Studie von Lath et al. sollten ungeübte Probanden den Toothguide 3D-MASTER® Farbränge nach dem „Weißgrad“ anordnen [124]. Wie auch in der vorliegenden Studie variierten die Probanden in ihrem Ranking bei dunkleren Farben mehr als bei hellen. Einschränkend sollte erwähnt werden, dass eine Interpretation des HHI und ein Vergleich mit anderen Studien in diesem Bereich aufgrund des Studiendesigns mit entsprechend geringerer Farbauswahlmöglichkeit begrenzt ist. Zusätzlich sind die Farben 4M3, 4L1,5 und 2R2,5 zu nennen, die ebenfalls mit HHI-Werten über 0,6 eine hohe Reproduktion aufwiesen. Es konnte keine Studie ermittelt werden, die den Aspekt der Farbe als Kriterium der Reproduzierbarkeit einer Zuordnung genauer untersucht. Schon 2017 schlugen Igiel et al. Studien zu diesem Thema vor [5].

5.2.4. Einfluss der Farbkomponenten Helligkeit, Sättigung und Farbton

Welchen Einfluss hatten die Farbkomponenten Helligkeit, Sättigung und Farbton des 3DM, entsprechend den kategorialen Farbangaben, auf die Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben?

Die Cramers V Werte des Vergleichs der Bleachedguide 3D-MASTER® Zuordnungen zwischen Toothguide 3D-MASTER® Farben des gleichen Farbtons, der gleichen Sättigung und der gleichen Helligkeit nach kategorialer Beschriftung weisen darauf hin, dass Helligkeit und

Chroma einen starken Einfluss auf die Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® zu den Toothguide 3D-MASTER® Farben haben (vgl. Tabelle 12). Dies entspricht auch der Definition eines erfolgreichen Bleaching nach DIN ISO/TR28642: „Änderung der Zahnfarbe, die durch Bleichen oder Fleckentfernungsmittel verursacht wird und in einer Zunahme des Helligkeitswerts und einer Abnahme der Intensität der Grundfarbe zum Ausdruck kommt“ [54]. In vorherigen Studien konnte festgestellt werden, dass innerhalb des Zahnfarbraumes die Sensitivität für Helligkeit, Sättigung und Farbton variiert [52, 55, 57]. Dabei können quantitative (Helligkeits- und Chromadifferenzen) sowie qualitative (Farbtondifferenzen) Unterschiede durch das menschliche Auge detektiert werden [125, 126]. Im Allgemeinen wird Farbe oft fälschlicherweise mit dem Farbton (Hue) gleichgesetzt und Unterschiede in Helligkeit und Sättigung werden nicht als Änderung der Farbe wahrgenommen [125]. Dies impliziert die Annahme, dass die Probanden nicht immer zwischen Helligkeit und Sättigung unterscheiden können, also dunklere Farben mit einer geringen Sättigung (Chroma) eher helleren Farben zugeordnet werden. Des Weiteren konnten Ahn et al. in einer Untersuchung des Toothguide 3D-MASTER® Farbrings feststellen, dass dieser zwar geordneter ist als andere Farbmusterringe, jedoch die Intervalle der Farbparameter zwischen den benachbarten Farbmustern nicht einheitlich sind [127]. Außerdem konnten sie signifikante Interaktionen zwischen den Farbmusterparametern festgestellt werden [127]. Es ist also möglich, dass diese Zusammenhänge einen Einfluss auf die vorliegenden Ergebnisse hatten.

Einfluss der Helligkeit auf die Zuordnung

Der Vergleich der Toothguide 3D-MASTER® Farben unterschiedlicher Helligkeiten bei gleichen Farbtönen und gleichen Chromawerten wies einen signifikanten Unterschied der Zuordnung ($p = 0,001$) auf und der Cramers V Wert von 0,896 und 0,732 zeigt den deutlichen Effekt der Helligkeit auf die Zuordnung. Der Helligkeit wird die wichtigste Rolle bei der Farbauswahl zugeschrieben [128]. Der Toothguide 3D-MASTER® in seiner ursprünglichen Systematik sieht ebenfalls die Auswahl der Helligkeit als Erstes vor und bietet hier auch entsprechend der natürlichen Variation die größte Auswahl mit fünf Helligkeitsstufen [7, 45].

Einfluss der Sättigung auf die Zuordnung

Bei Toothguide 3D-MASTER® Farben unterschiedlicher Helligkeit mit gleichem Farbton (M) und gleicher Sättigung konnte zwischen Sättigungswerten 1 und 3 unterteilt werden. Insgesamt wurden dabei die Farben mit der geringeren Sättigung auch helleren Farben zugeordnet. Schaut man sich den direkten Vergleich zwischen Farben mit gleicher Helligkeit und gleichen Farbtönen bei unterschiedlicher Sättigung an, wird dieser Trend deutlicher: 2M1 wurde mit 96,2 % 1M1,5 zugeordnet. Auch 3M1 wurde als deutlich heller beurteilt. Hier wurde mit 53,2 % 1,5M2 als ähnlich zugeordnet. Bei den dunkleren Farben 4M1 und 5M1 ist die Zuordnung zu helleren Farben weniger deutlich.

Insgesamt zeigten die Cramers V Werte für die Zuordnung bei unterschiedlichen Chromawerten mittlere bis starke Zusammenhänge zwischen der Sättigung der Toothguide 3D-MASTER® und der Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe. Je größer die Differenz (1 versus 3) der verglichenen Chromawerte, desto größer war auch der Cramers V Wert. Es waren alle Unterschiede signifikant mit Ausnahme der Zuordnung zwischen 0M3 und 0M2. Dies lässt sich gegebenenfalls dadurch erklären, dass diese die beiden hellsten Toothguide 3D-MASTER® Farben waren und aus Mangel an Alternativen die hellste Bleachedguide 3D-MASTER® Farbe zugeordnet wurde.

Ein weitverbreitetes optisches Phänomen bei der Wahrnehmung von Farben ist der Helmholtz-Kohlrausch-Effekt. Dieser besagt, dass bei gleichem Helligkeitswert Farben mit einer höheren Sättigung heller wahrgenommen werden. Der Effekt ist zum einen abhängig vom Farbton und auch von der Stärke der Sättigung. Bei gelben Farben und geringen Sättigungswerten ist der Effekt minimal [129, 130]. Die vorliegenden Daten zeigen eher eine Umkehrung dieses Effekts bei Zahnfarben: Die Sättigung hat einen Einfluss auf die Wahrnehmung der Helligkeit, indem dunklere Farben bei geringerer Sättigung heller wahrgenommen werden. Dieser Effekt ist deutlicher, je unterschiedlicher der Chromawert bei gleichem Farbton und Helligkeitswert ist. Gleiches erklärten auch Fondriest et al. in ihrem Review zur Farbbestimmung in der restaurativen Zahnheilkunde [131]. Sie erläutern die Wirkung von Chroma auf die Helligkeit mit Lebensmittelfarbe, welche in ein Glas Wasser gegeben wird. Dabei steigt die Sättigung (Chroma) des Wassers und gleichzeitig verringert sich die Helligkeit (Value/Lightness), der Farbton (Hue) hingegen bleibt gleich [131]. Eine Untersuchung des Helmholtz-Kohlrausch-Effekts in Bezug auf Zahnfarben liegt bisher nicht vor.

Einfluss des Farbtons auf die Zuordnung

Der Einfluss des Farbtons auf die Zuordnung der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben zeigt, dass Toothguide 3D-MASTER® Farben mit dem Farbton R (rötlicher) dunkleren Farben bei gleicher Helligkeit und gleicher Sättigung zugeordnet wurden. Der Effekt war mit Ausnahme der Paarung 2R/L1,5 signifikant. Die Cramers V Werte lassen nur auf einen kleinen bis mittleren Effekt des Farbtons auf die Bleachedguide 3D-MASTER® Farbauswahl schließen. Bei den Farben 4L/R2,5 zeigte Cramers V nur einen schwachen Zusammenhang. Nach einer Studie von Gerlach et al. konnte ein Zusammenhang zwischen der Gelbheit (Änderung der b^* -Koordinate) und der Wahrnehmung des Bleichergebnisses festgestellt werden. [132]. Die a^* -Koordinate (Röte) spielte nur eine untergeordnete Rolle [132]. Auch durch die Lage des Zahnfarbenraumes innerhalb des psychometrischen $L^*a^*b^*$ -Farbraumes lässt sich ein Zusammenhang zwischen Helligkeit und roten Farbtönen feststellen: Je dunkler der Zahn, desto höher die Sättigung und der Rotanteil. Dies wiederum entspricht der Veränderung der Zähne im Alter. Bei jüngeren und helleren Zähnen ist der Gelbanteil größer und der Zahn weniger farbintensiv [45, 131]. So ist die Zuordnung der rötlichen Toothguide 3D-MASTER® Farben

möglicherweise ein Resultat aus klinischem Vorwissen und der damit verbundenen Assoziation von rötlichen Farbtönen mit älteren Patienten und dunkleren Zahnfarben.

5.2.5. Gibt es ein Kriterium für die Auswahl der zugeordneten Bleachedguide 3D-MASTER® Farben?

Um die Frage nach einem Auswahlkriterium bezüglich der Farbzuordnung zu beantworten, wurden neben den oben genannten Untersuchungen der Zuordnung die Koordinatenmessungen des Easyshade® V entsprechend ihrer Zuordnung zueinander mit einer multiplen linearen Regression analysiert. Dieses Verfahren wurde schon in der Studie von Herrera et al. verwendet, um ein „Modell für die Voraussage von Farbveränderungen nach einer Bleaching Behandlung basierend auf dem CIE L*a*b*-Farbraum“ zu entwickeln [133]. Hierbei wurden ähnlich wie in der vorliegenden Studie die Farbkoordinaten vor dem Bleaching genutzt, um die Koordinaten nach dem Bleaching vorherzusagen. Ebenfalls diente das Bestimmtheitsmaß R^2 zur Beurteilung der Vorhersagefähigkeit der Modelle [133]. Des Weiteren wurde in einer Studie von Alkhodary et al. mittels der multiplen linearen Regression die Korrelation zwischen der Farbe des mittleren Schneidezahns und der Gingiva untersucht [134]. Es ist jedoch keine Studie bekannt, welche eine multiple lineare Regression zur Ermittlung eines Auswahlkriteriums der Farbzuordnung verwendet. In der vorliegenden Studie wurde untersucht, inwieweit die drei Koordinatenwerte Helligkeit, Sättigung und Farbton des Bleachedguide 3D-MASTER® die Auswahl der jeweiligen Koordinate des Toothguide 3D-MASTER® erklären. Dabei wurde festgestellt, dass die Helligkeit des Bleachedguide 3D-MASTER® auf alle Koordinatenwerte des Toothguide 3D-MASTER® den größten Einfluss hat, weshalb sie als Hauptauswahlkriterium genannt werden kann. Jedoch haben auch die Sättigung und der Farbton einen nicht unerheblichen Einfluss. Dies ist auf die „Untrennbarkeit“ der drei Koordinaten zurückzuführen, da diese nicht separat voneinander betrachtet wurden und auch schon innerhalb der Farbmusterringe miteinander interagieren [127]. Auch Fairchild et al. stellten fest, dass Helligkeit und Chroma nicht unabhängig voneinander wahrgenommen werden können [129]. Es ist daher davon auszugehen, dass eine Multikollinearität zwischen den unabhängigen Variablen vorliegt. Diese spielt zur Beantwortung der Frage nach einem Auswahlkriterium jedoch keine Rolle, da die Modelle signifikant sind und die R^2 -Werte deutlich zeigen, dass sie zur Erklärung der Zusammenhänge gut funktionieren. Die Annahme vieler Autoren, dass die Helligkeit die wichtigste Variable bei der visuellen Farbbestimmung ist, konnte somit bestätigt werden [45, 50, 135].

5.2.6. Korrelieren der Bleached-Index und die Auswahl der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben?

Wie auf der Abbildung 19 zu erkennen ist, besteht eine positive Korrelation zwischen Bleached-Index und der Auswahl der Bleachedguide 3D-MASTER® Farben mit einem Koeffizienten von 0,820 ($p = 0,001$). Der Bleached-Index wird sowohl analog über den Bleachedguide 3D-MASTER® als auch elektronisch mit dem Easyshade® V in Studien und in der Praxis zur Erfolgskontrolle von Bleichtherapien genutzt. Es ist keine Studie bekannt, in der Farbringe im Hinblick auf den Bleached-Index vermessen wurden. Obwohl die Validität der Messungen des Toothguide 3D-MASTER® nicht beurteilt werden konnte und die Validität der Bleached-Index-Messungen des Bleachedguide nicht zufriedenstellend war, muss dies nicht unbedingt Auswirkungen auf die Korrelation zwischen Index und Farbauswahl haben. Da die Messungen mit dem gleichen Gerät durchgeführt wurden, lassen sich Bleached-Index und Farbauswahl durchaus vergleichen und in Beziehung setzen [106]. Des Weiteren zeigt die Regressionsanalyse der Bleached-Indices und der Koordinaten der Toothguide 3D-MASTER® Farbmuster auch die beim Bleaching postulierten Veränderungen, nämlich dass die Helligkeit zunimmt und die Sättigung sinkt [136]. Dies lässt sich durch die Koordinaten des Bleached-Index fast perfekt erklären ($R^2 = 0,9$, $p = 0,001$). Den größten Einfluss hat das Chroma. Je höher im Mittel das Chroma, desto größer ist auch der Bleached-Index. Darauf folgt im negativen Zusammenhang die Helligkeit. Mit ansteigender Helligkeit sinkt der Bleached-Index. Der Farbton hat im Mittel den geringsten Einfluss, er ist jedoch auch positiv. Dies bedeutet, mit Anstieg des Farbtonwertes steigt der Bleached-Index. Ein Anstieg des Farbtonwertes ist wiederum mit einer Verschiebung des Farbtons in Richtung Gelb gleichzusetzen. Gleiches stellten Herrera et al. in ihrer Untersuchung der Koordinaten vor und nach dem Bleaching fest [133]. Eine Erhöhung der Helligkeit und ein Abnehmen der Sättigung sind seitens der ADA Anforderungen an ein erfolgreiches Bleaching und entsprechen auch der Definition einer Zahnaufhellung. Der Farbton ist vom Bleichprozess weniger betroffen [28, 136].

Zusammenfassend lässt sich auf diese Weise die Korrelation zwischen den Toothguide 3D-MASTER® Farben und den zugeordneten Bleachedguide 3D-MASTER® Farben erklären. Außerdem unterstreichen die Ergebnisse ein weiteres Mal die visuelle Präferenz von Helligkeit, aber auch die Schwierigkeit des menschlichen Auges, zwischen Helligkeit und Sättigung zu unterscheiden.

6. Zusammenfassung

Ziel dieser explorativen Arbeit war der visuelle und elektronische Vergleich des VITA Toothguide 3D-MASTER® mit dem systemgleichen VITA Bleachedguide 3D-MASTER®. Gleiche Farben, die in beiden Farbringen vorkamen, wurden aussortiert. Unter Standardbedingungen wurden 21 Farben des Toothguide 3D-MASTER® sieben Farben des Bleachedguide zugeordnet. Ziel war hier, „No-Match“-Paarungen mit größtmöglich empfundener Ähnlichkeit zu ermitteln. Insgesamt 52 approbierte Zahnärzte nahmen an der Studie teil. Bei insgesamt 156 Terminen wurden 3276 Farbpaare einander zugeordnet. Zusätzlich wurden alle verwendeten Farbmuster mit dem VITA Easyshade® V elektronisch vermessen und dem visuellen Farbabgleich gegenübergestellt. Zwischen den Durchgängen konnte kein signifikanter Unterschied bei der Zuordnung festgestellt werden. Im Rahmen der Untersuchung wurden durch die Standardisierung betrachterunabhängige Einflussfaktoren weitestgehend reduziert, sodass betrachterabhängige Einflussfaktoren analysiert werden konnten. Das Geschlecht (31 Frauen, 21 Männer) als auch das Alter (24-63 Jahre) hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Zuordnung über alle drei Durchgänge hinweg. Bei Brillenträgern konnte ein statistischer Einfluss ($p = 0,04$) auf die Reliabilität im Vergleich zu Probanden, die keine Brille trugen, festgestellt werden. In der Variation der Zuordnung zeigten sowohl die Farben des Toothguide als auch des Bleachedguide die eindeutigste Verteilung bei den sehr hellen Farben. Die Farbdifferenzen der gewählten Farbpaare wurden anhand des Leitfadens zur Farbmessung der DIN-Norm ISO/TR 28642 eingestuft. Demnach konnten drei von 79 Farbpaaren als akzeptabel mit Gesamtfarbdifferenzwerten (ΔE_{ab}) unterhalb 2,7 bewertet werden. Nach der Einteilung von Paravina et al., die die CIEDE2000 Formel verwendeten, waren zwölf von 79 Farbpaaren mit $\Delta E_{00} > 1,8$ akzeptabel. Bei der Untersuchung der Validität der Messungen des Easyshade® V im Testmodus wurden sowohl die angezeigte Farbe der Hauptanzeige als auch die durch die Helper-Software angezeigte Mischfarbe untersucht. Als „wahrer Wert“ wurde dabei die kategoriale Farbangabe auf den Farbmustern festgelegt. Die Messung der 3D-MASTER® Farben war in der Hauptanzeige zu 100 % korrekt, die Mischfarben wurden zu 88,1 % richtig erkannt. Die Bleachedguide-Farbmuster wurden in keinem Fall auf der Hauptanzeige richtig angezeigt. Bei den Mischfarben wurden 57,2 % richtig erfasst.

Die Validität der Messungen des Bleachingindex konnte nur anhand der Bleached-Farben evaluiert werden, da zu den Toothguide 3D-MASTER® Farben keine „wahren Werte“ vorlagen. Nur eine von sieben (14,29 %) Bleachingindex-Messungen war korrekt.

Ein weiterer Aspekt war die Ermittlung eines Hauptauswahlkriteriums für die Paarungen. Hierbei wurden unabhängig voneinander sowohl die Koordinaten als auch die kategorialen Farbbezeichnungen betrachtet. Anhand der Regressionsmodelle war ersichtlich, dass die Helligkeit den größten Einfluss ($p = 0,001$) auf die Auswahl hatte. Aufgrund des Studiendesigns bestand

jedoch eine Untrennbarkeit der Koordinaten bei der Betrachtung der Farbmuster. So zeigte sich bei der Analyse der Zuordnung nach kategorialen Farbangaben, dass die Sättigung ebenfalls einen starken Effekt ($p = 0,001$) und der Farbton einen kleinen bis mittleren Effekt ($p = 0,001$) hatte. So wurden Farben mit hoher Sättigung und/oder röterem Farbton, dunkleren Farben zugeordnet. Abschließend wurden die Bleached-Indices des Toothguide 3D-MASTER[®] untersucht. Es konnte eine positive Korrelation zwischen den Bleached-Indices der Toothguide 3D-Master[®] Farbe und der zugeordneten Bleachedguide 3D-MASTER[®] Farbe festgestellt werden. Zudem konnte herausgestellt werden, dass gemäß der Definition eines erfolgreichen Bleachings der Index sich entsprechend den Koordinaten verändert. Hier hat vor allem die Sättigung den größten Effekt ($p = 0,001$). Aus diesen Ergebnissen lässt sich für das vorliegende Gerät ableiten, dass, auch wenn der absolute einzelne gemessene Bleached-Index nach dieser Untersuchung nicht als valides Maß angesehen werden kann, die Differenz bei entsprechender Software durchaus als Instrument der Bleachingkontrolle auch im Testmodus funktionieren kann.

Zusammenfassend ist herauszustellen, dass es zwischen dem Toothguide 3D-MASTER[®] und dem Bleachedguide 3D-MASTER[®] trotz Ausschluss gleicher Farben in der Wahrnehmung und farbmtrischen Vermessung Überschneidungen gibt. Diese Überschneidungen wurden konstant über alle Durchgänge hinweg wahrgenommen, unabhängig von Geschlecht und Alter. Das Tragen einer Brille scheint in Bezug auf die Wiederholbarkeit der Zuordnung einen Vorteil darzustellen. Die Helligkeit lässt sich zwar als Hauptauswahlkriterium nennen, Farbton und vor allem Farbsättigung haben aufgrund der Untrennbarkeit in der Gesamtwahrnehmung ebenfalls einen Einfluss. Die Validität der Messungen des Toothguide 3D-MASTER[®] Farbrings mit dem Easyshade[®] V im Testmodus ist als sehr gut zu bewerten. Die Validität der Bleachedguide 3D-MASTER[®] Messungen und der Messung der Bleached-Indices ist als mangelhaft zu bewerten. Daher sollte der mit diesem Gerät im Testmodus gemessene Bleached-Index, wenn überhaupt, nur als Differenz bei der Analyse von Bleichprozessen verwendet werden.

Erstmals wurden im Rahmen einer farbmtrischen Untersuchung Farbmuster im Hinblick auf die Koordinaten und kategorialen Farbangaben, sowie dem Bleached-Index mithilfe des Easyshade[®] V und der Helper-Software im Testmodus überprüft. Obwohl der Testmodus im klinischen Alltag weniger Verwendung hat, können die Ergebnisse zur Anpassung der Farbmusterringe und des Easyshade[®] V an die visuelle Wahrnehmung und somit zur Verbesserung der Farbnahme am Patienten beitragen. Da es sich um eine explorative Arbeit handelt könnten weiterführende Studien zu konkreteren Erkenntnissen führen. So könnte die Bewertung der Ähnlichkeit durch die Probanden miteinbezogen werden. Ferner wäre auch in vivo ein Vergleich zwischen der visuellen Farbestimmung mit dem Bleachedguide 3D-MASTER[®] und der Messung des Bleached-Index mit dem Easyshade[®] interessant.

Literaturverzeichnis

1. Sader R, Prof. Robert Sader im Interview: "Die Ästhetik ist häufig das Zünglein an der Waage!". 2017, zm online: <https://www.zm-online.de/zm-starter/assistenz/die-aesthetik-ist-haeufig-das-zuenglein-an-der-waage/seite/alle/>. p. 7.
2. Ross F. Untersuchung zur Reproduzierbarkeit der Zahnfarbbestimmung mit einem neuen Zahnfarbringsystem [Dissertation]. Hannover: Medizinische Hochschule Hannover; 2002.
3. Brewer JD, Wee A, Seghi R, Advances in color matching. Dent Clin North Am, 2004. 48(2): p. v, 341-58.
4. Pecho OE, Ghinea R, Alessandretti R, Perez MM, Della Bona A, Visual and instrumental shade matching using CIELAB and CIEDE2000 color difference formulas. Dent Mater, 2016. 32(1): p. 82-92.
5. Igiel C, Lehmann KM, Ghinea R, Weyhrauch M, Hangx Y, Scheller H, Paravina RD, Reliability of visual and instrumental color matching. J Esthet Restor Dent, 2017. 29(5): p. 303-308.
6. Mahn DE, Anleitung zur Farbnahme und Kommunikation mit dem Labor. ZWL-Zahntechnik Wirtschaft Labor, 2014. 3/2014: p. 30-34.
7. VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, VITA Toothguide 3D-Master® Anleitung - Beispiel. 2020: http://data.dt-shop.com/fileadmin/media/ga/00963_ga_deu.pdf. p. 2.
8. Paravina RD, Johnston WM, Powers JM, New shade guide for evaluation of tooth whitening-colorimetric study. J Esthet Restor Dent, 2007. 19(5): p. 276-83.
9. VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, VITA Easyshade® V - Bedienungsanleitung. 2022: <https://www.vita-zahnfabrik.com/de/VITA-Easyshade-V-67617.html>. p. 52.
10. Paul S, Peter A, Pietrobon N, Hämmerle CHF, Visual and Spectrophotometric Shade Analysis of Human Teeth. J Dent Res, 2002. 81(8): p. 578-582.
11. Alghazali N, Burnside G, Smith R, Preston A, Jarad F, Performance assessment of Vita Easyshade spectrophotometer on colour measurement of aesthetic dental materials. Eur J Prosthodont Restor Dent, 2011. 19: p. 168-74.
12. DaSilva JDP, Sang E; Weber, H-P; Ishikawa-Nagai, Shigemi, Clinical performance of a newly developed spectrophotometric system on tooth color reproduction. J Prosthet Dent, 2008. 99(5): p. 361-368.
13. Dozić A, Kleverlaan CJ, El-Zohairy A, Feilzer AJ, Khashayar G, Performance of Five Commercially Available Tooth Color-Measuring Devices. J Prosthodont, 2007. 16(2): p. 93 - 100.
14. Trautwein AX, Kreibig U, Hüttermann J, Physik für Mediziner, Biologen, Pharmazeuten. Vol. 25. 2014, Deutschland: De Gruyter. 491.
15. Sharma G, Wu W, Dalal EN, The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations, in Color Res Appl. 2005, Wiley Periodicals, Inc.: <http://www2.ece.rochester.edu/~gsharma/ciede2000/> p. 21-30.
16. 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).
17. 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.

18. Ülker N. Digitale Zahnfarbbestimmung: Reliabilität und Validität des VITA Easyshade Advance [Dissertation]. Jena: Friedrich-Schiller Universität 2015.
19. Tsiliagkou A, Sofia D, Papazoglou E, Kakampoura A, Evaluation of reliability and validity of three dental colour-matching devices. The International Journal of Esthetic Dentistry 2016. 11: p. 110-124.
20. Reyes J, Acosta P, Ventura D, Repeatability of the human eye compared to an intraoral scanner in dental shade matching. Heliyon, 2019. 5(7): p. e02100.
21. Hammad IA, Intrarater repeatability of shade selections with two shade guides. J Prosthet Dent, 2003. 89(1): p. 50-53.
22. Dudenredaktion (o. J.): „Farbe“ auf Duden online. URL: <https://www.duden.de/node/45121/revision/45150> (Abrufdatum: 22.04.2020)
23. Lechner MD, Gehrke K, Nordmeier EH, Makromolekulare Chemie: Ein Lehrbuch für Chemiker, Physiker, Materialwissenschaftler und Verfahrenstechniker. Vol. 5. 2014, Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. XV, 731.
24. Richter M, Einführung in die Farbmeterik. Vol. 2. 1981, Berlin,Boston: De Gruyter. 278.
25. Küppers HL, Einführung in die Farblehre. 2017, Köln: DuMont Buchverlag GmbH & Co. KG. 184.
26. Chu SJ, Devigus A, Mieleszko AJ, Dentale Farbenlehre Farbbestimmung und Farbkommunikation in der ästhetischen Zahnmedizin. Vol. 1. 2005, Deutschland: Quintessenz-Verlag-GmbH. 168.
27. Frank H, Phrood, Anony. Electromagnetic spectrum-de c.svg.[Grafik], 2005; [cited 02.03.2022]; Lizenz:[Veränderungen erfolgt: Grafik zugeschnitten.(CC BY-SA 3.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>]. Available from: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/62/Electromagnetic_spectrum_de_c.svg.
28. Della Bona A, Color and Appearance in Dentistry. Vol. 1. 2020, Cham: Springer. XIII, 142.
29. Bart N,Treitz N, Handbuch der experimentellen Physik : Sekundarbereich II ; Ausbildung - Unterricht - Fortbildung/ Optik 1, ed. W Kuhn. Vol. 4/I. 1993, Hallbergmoos: Aulis Verlag Deubner & Co. KG. 292.
30. Schmidt RF, Lang F, Heckmann M, Physiologie des Menschen 2011, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag. 979.
31. Bundesamt für Strahlenschutz. Wirkung von Infrarot-Strahlung [Internet]. 2021; [26.08.2021] [cited 2022 25.02.2022]; Available from: <https://www.bfs.de/DE/themen/opt/ir/wirkung/wirkung.html>
32. Behrends JC, Bischofberger J, Deutzmann R, Ehmke H, Frings S, Grissmer S, Hoth M, Kurtz A, Leipziger J, Müller F, Pedain C, Rettig J, Wagner C, Wischmeyer E, Physiologie. Duale Reihe. Vol. 3. 2017, Stuttgart: Thieme. 831.
33. Talos,Jakov. Augapfel2.png - Version mit gelbem Punkt und blinder Fleck.[Grafik], 2018; [cited 2.3.2022]; Lizenz:[(CC BY-SA 3.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>]. Available from: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bf/Augapfel2.png>.
34. Bille JF, Korablinova NA, Pape Uv, Schmitt-Lieb A, Das visuelle System des Menschen, in Medizinische Physik 3 - Medizinische Laserphysik, W Schlegel, Editor. 2005, Springer: Berlin, Heidelberg. p. 453.

35. Hangx Y. Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der visuellen und digitalen Farbbestimmung für dentale Restaurationen: eine Evaluation des elektronischen Farbbestimmungssystems "Vita Easyshade Advance" [Dissertation]. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität 2019.
36. Behrends JC, Physiologie. Duale Reihe. Vol. 3. 2017, Stuttgart: Thieme.
37. Rieß K. Einflussfaktoren bei der Auswahl der Zahnfarbe [Dissertation]. Leipzig: Universität Leipzig; 2018.
38. Zawischa D. Grundlage der Farblehre Farben sehen, messen und wiedergeben [Internet] Ohne Jahr; 20.01.2021]; Available from: https://www.itp.uni-hannover.de/fileadmin/arbeitsgruppen/zawischa/static_html/farbeinf.html.
39. Hoffmann A, Systematische Erforschung und Analyse der Zahnfarbe, Zahnfarbmessung und dentaloptischer Phänomene: Neue wissenschaftliche Erkenntnisse und neuartige Methoden zur Zahlfarbmessung und -bestimmung. 2 ed. 2010, Dinslaken: Athene Media-Verlag. 456.
40. Ladenburger D. Vergleich von Farbkoordinaten von aus zwei übereinanderliegenden Dentinmassen hergestellten keramischen Proben und Farbkoordinaten von keramischen Proben, welche jeweils unter Verwendung einer dieser Dentinmassen wurden [Dissertation]. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität; 2019.
41. Häßler U. Moderne Farbmodelle aus Material der Vorlesungen »Farbmanagement / Farbraum-Transformationen«. [2021; [cited 05.09.2021]; Lizenz:[Dieses Werk ist lizenziert (CC BY 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>]. Available from: <https://wisotop.de/farbmodelle-farben-ordnen.php>.
42. Richard S. Hunter and Richard W. Harold, The Measurement of Appearance, 2nd ed. by Richard S. Hunter and Richard W. Harold,. Color Res Appl, 1988. 13(3): p. 197-197.
43. Witzel T. Klinische Untersuchung computergestützter Zahnfarbbestimmung im Vergleich zu visueller Abmusterung durch das menschliche Auge [Dissertation]. Würzburg: Bayerische Julius-Maximilians-Universität; 2005.
44. Sachs A. Evaluation der Übereinstimmung der CIE L*a*b* Farbkoordinaten unterschiedlicher Verblendkeramiken [Dissertation]. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität 2016.
45. Baltzer A, Kaufmann-Jinoian V, Sonderdruck - Die Bestimmung der Zahnfarbe. Quintessenz Zahntechnik 2004. 7/2004: p. 16.
46. L'Eclairage Cld, Technical Report - Improvement to Industrial Colour-difference Evaluation CIE 142:2001. 2001, CIE Central Bureau: keine Angabe. p. 15.
47. Luo MR, Cui G, Rigg B, The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. Color Res Appl, 2001. 26(5): p. 340-350.
48. X-Rite, PANTONE® A Guide to Understanding Color Communication. 2016. 39.
49. Nobbs J, A lightness, chroma and hue splitting approach to CIEDE2000 colour differences. Adv Colour Sci Technol, 2002. 5(2): p. 46-53.
50. L'Eclairage Cld, Technical Report - Parametric effects in colour-difference evaluation, CIE Publ. No. 101. 1993, CIE: keine Angabe. p. 18.
51. Johnston WM, Color measurement in dentistry. J Dent, 2009. 37 Suppl 1: p. e2-6.
52. 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.
53. Perez Mdel M, Ghinea R, Rivas MJ, Yebra A, Ionescu AM, Paravina RD, Herrera LJ, Development of a customized whiteness index for dentistry based on CIELAB color space. Dent Mater, 2016. 32(3): p. 461-7.

54. Deutsches Institut für Normung, DIN ISO/TR 28642:2018-06; Zahnheilkunde:Leitfaden zur Farbmessung (ISO/TR 28642:2016).
55. Perez Mdel M, Ghinea R, Herrera LJ, Ionescu AM, Pomares H, Pulgar R, Paravina RD, Dental ceramics: a CIEDE2000 acceptability thresholds for lightness, chroma and hue differences. *J Dent*, 2011. 39 Suppl 3: p. e37-44.
56. Paravina RD, Perez MM, Ghinea R, Acceptability and perceptibility thresholds in dentistry: A comprehensive review of clinical and research applications. *J Esthet Restor Dent*, 2019. 31(2): p. 103-112.
57. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, Bona AD, Igiel C, Linninger M, Sakai M, Takahashi H, Tashkandi E, Perez Mdel M, Color difference thresholds in dentistry. *J Esthet Restor Dent*, 2015. 27 Suppl 1: p. S1-9.
58. Mahn E, Tortora SC, Olate B, Cacciuttolo F, Kernitsky J, Jorquera G, Comparison of visual analog shade matching, a digital visual method with a cross-polarized light filter, and a spectrophotometer for dental color matching. *J Prosthet Dent*, 2021. 125(3): p. 511-516.
59. Strub JR, Kern M, Türp JC, Witkowski S, Heydecke G, Wolfart S, Curriculum Prothetik Teil: Bd. 2., Artikulatoren, Ästhetik, Werkstoffkunde, festsitzende Prothetik. Vol. 4., überarb. und erw. Aufl. 2011, Berlin Quintessenz-Verl.-GmbH. 362.
60. Lehmann KM, Igiel C, Scheller H, Die nächste Generation der Farbbestimmung: digitale Farbbestimmungssysteme. *ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt*, 2012. 121: p. 410-417.
61. Hassel A, Zenthöfer A, Die Bestimmung der Zahnfarbe und deren Umsetzung in die Rekonstruktion *ZMK - Zahnheilkunde, Management, Kultur*, 2014. 30: p. 5.
62. Faber F-J. Die Bestimmung der Zahnfarbe -Stellungnahme der DGZMK. 2006; [cited 10.12.2020]; Available from: <https://www.dgzmk.de/bestimmung-der-zahnfarbe>.p.5.
63. Lehmann K, Devigus A, Wentaschek S, Igiel C, Scheller H, Paravina R, Comparison of visual shade matching and electronic color measurement device. *Int J Esthet Dent*, 2017. 12(3): p. 396-404.
64. Paravina RD, Performance assessment of dental shade guides. *J Dent*, 2009. 37 Suppl 1: p. e15-20.
65. 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.
66. VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG VITA Info [Internet]. VITA Info - 90 Years Vita 2015. 1/2015, 3-31.
67. Corciolani G, Vichi A, Goracci C, Ferrari M, Colour correspondence of a ceramic system in two different shade guides. *J Dent*, 2009. 37(2): p. 98-101.
68. Yuan JC-C, Brewer JD, Monaco EA, Davis EL, Defining a natural tooth color space based on a 3-dimensional shade system. *J Prosthet Dent*, 2007. 98(2): p. 110-119.
69. Sproull RC, Color matching in dentistry. Part II. Practical applications of the organization of color.1973. *J Prosthet Dent*, 1973. 29(5): p. 556-und 566.
70. Deutsches Institut für Normung; DIN EN ISO/CIE 11664-2:2020-03, Farbmetrik - Teil 2: CIE Normlichtarten (ISO/CIE DIS 11664-2:2020). 2020, Beuth Verlag.
71. Curd FM, Jasinevicius TR, Graves A, Cox V, Sadan A, Comparison of the shade matching ability of dental students using two light sources. *J Prosthet Dent*, 2006. 96(6): p. 391-6.
72. Berns RS, Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology. Vol. 4. 2019, U.S.A.: John Wiley & Sons. 272.

73. Okubo SR, Kanawati A, Richards MW, Childress S, Evaluation of visual and instrument shade matching. *J Prosthet Dent*, 1998. 80(6): p. 642-8.
74. Lehmann KM, Devigus A, Igiel C, Weyhrauch M, Schmidtman I, Wentaschek S, Scheller H, Are dental color measuring devices CIE compliant? *Eur J Esthet Dent*, 2012. 7(3): p. 324-33.
75. 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. 2309-18.
76. Arndt A. Klinische Untersuchung zur Zahnfarbenbestimmung : ein Vergleich zwischen Spektralfotometer, Kolorimeter und visueller Abmusterung durch den menschlichen Betrachter [Dissertation]. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität 2015.
77. Paravina RD, Aleksić A, Tango RN, García-Beltrán A, Johnston WM, Ghinea RI, Harmonization of color measurements in dentistry. *Measurement*, 2021. 169.
78. Joiner A, Tooth colour: a review of the literature. *J Dent*, 2004. 32 Suppl 1: p. 3-12.
79. Team VITA Viktoria, [persönliche Korrespondenz] Messflächendurchmesser Easyshade V. 17.10.2022: Instagram direct messages.
80. Pflüger M, Entwicklung eines robusten Verfahrens zur Farbbestimmung von Zähnen auf Basis spektraler Daten. *Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung*. Vol. Band 31. 2014, Stuttgart: Fraunhofer Verlag. 116.
81. 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.
82. Rauh W, Vom Farbbestimmungsgerät zum Multimedia-Tool. *ZWP-Zahnarzt Wirtschaft Praxis*, 2015. 9: p. 106-107.
83. al. Te, Evaluation of reliability and validity of three dental colour-matching device. *The International Journal of Esthetic Dentistry*, 2016. 11: p. 2-16.
84. Al-Dwairi Z, Shaweesh A, Kamkarfar S, Kamkarfar S, Borzabadi-Farahani A, Lynch E, Tooth shade measurements under standard and nonstandard illumination and their agreement with skin color. *Int J Prosthodont*, 2014. 27(5): p. 458-60.
85. Igiel C, Weyhrauch M, Mayer B, Scheller H, Lehmann KM, Effects of ceramic layer thickness, cement color, and abutment tooth color on color reproduction of feldspathic veneers. *Int J Esthet Dent*, 2018. 13(1): p. 110-119.
86. Harms V, Medizinische Statistik: eine leicht verständliche Einführung ; [nach dem Gegenstandskatalog für die 2. ärztliche Prüfung]. Vol. 8., völlig neu bearb. Aufl. 2012, Lindau: Harms. 544.
87. Deutsches Institut für Normung, DIN EN ISO 22598:2020-12, Zahnheilkunde - Farbschlüssel für die intraorale Zahnfarbenbestimmung (ISO 22598:2020); Deutsche Fassung EN ISO 22598:2020. Beuth Verlag.
88. Baltés-Götz B, Exakte Tests mit SPSS, Ut-R Trier, Editor. 1998: Trier. p. 26.
89. Kosfeld R, Eckey HF, Türck M, Deskriptive Statistik: Grundlagen - Methoden - Beispiele - Aufgaben. Vol. 6.Aufl. 2016, Berlin, Heidelberg: Springer Gabler Verlag. 364.
90. Cohen J, A coefficient of agreement for nominal scales. *Educ Psychol Meas*, 1960. 20(1): p. 37-46.
91. Fleiss JL, Levin B, Paik MC, The Measurement of Interrater Agreement, in *Statistical Methods for Rates and Proportions*. 2003. p. 598-626.
92. Landis JR, Koch GG, The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 1977. 33(1): p. 159-74.

93. Cohen J, Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. Vol. 2. 1988, New York: L. Erlbaum Associates. 579.
94. Ellis PD, The Essential Guide to Effect Sizes: Statistical Power, Meta-Analysis, and the Interpretation of Research Results. Vol. 1. 2010, Cambridge: Cambridge University Press. 173.
95. Gaus W, Muche R, Medizinische Statistik: Angewandte Biometrie für Ärzte und Gesundheitsberufe. 2017: Schattauer GmbH.
96. Fahrmeir L, Kneib T, Lang S, Regression: Modelle, Methoden und Anwendungen. 2 ed. 2009, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag. 502.
97. Gareis T. Heatmap [Internet]. Ohne Jahr; [cited 10.09.2022]; Available from: <https://www.seobility.net/de/wiki/Heatmap>.
98. Gaus W, Muche R, Medizinische Statistik: Angewandte Biometrie für Ärzte und Gesundheitsberufe. Vol. 2. 2017, Stuttgart: Schattauer GmbH. 640.
99. Clary JA, Ontiveros JC, Cron SG, Paravina RD, Influence of light source, polarization, education, and training on shade matching quality. J Prosthet Dent, 2016. 116(1): p. 91-7.
100. Kühnel P, Moderne Entwicklungen im Seniorenmarketing. Vol. 1. 2001, Hamburg: Diplomarbeiten Agentur. 111.
101. Tekavcic B, Milić R, Pompe MT, Does Physical Fatigue Affect Color Vision? Sports Med Int Open, 2017. 1(5): p. E155-e159.
102. Fraunfelder FT, Fraunfelder FW, Chambers WA, Drug-Induced Ocular Side Effects: Clinical Ocular Toxicology. 7. ed. 2014: Elsevier Health Sciences. 424.
103. Samra APB, Moro MG, Mazur RF, Vieira S, De Souza EM, Freire A, Rached RN, Performance of Dental Students in Shade Matching: Impact of Training. J Esthet Restor Dent, 2017. 29(2): p. E24-E32.
104. Dagg H, O'Connell B, Claffey N, Byrne D, Gorman C, The influence of some different factors on the accuracy of shade selection. J Oral Rehabil, 2004. 31(9): p. 900-904.
105. Borse S, Chaware SH, Tooth shade analysis and selection in prosthodontics: A systematic review and meta-analysis. J Indian Prosthodont Soc, 2020. 20(2): p. 131-140.
106. 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.
107. 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.
108. Todorović A, Todorović A, Špadijer-Gostović A, Lazić V, Miličić B, Đurišić S, Reliability of conventional shade guides in teeth color determination. Vojnosanit Pregl, 2013. 70(10): p. 929-934.
109. Pérez MM, Pecho OE, Ghinea R, Pulgar R, Bona AD, Recent Advances in Color and Whiteness Evaluations in Dentistry. Current Dentistry, 2019. 1(1): p. 23-29.
110. Baltzer A, Physikalisches Farbsystem und menschlicher Farbeindruck. Digital Dental News, 2007: p. 14-19.
111. Olms C, Martin V, Reproduzierbarkeit und Reliabilität intraoraler Spektrophotometer. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift, 2019. 74: p. 102-111.

112. Zenthofer A, Cabrera T, Corcodel N, Rammelsberg P, Hassel AJ, Comparison of the Easyshade Compact and Advance in vitro and in vivo. *Clin Oral Investig*, 2014. 18(5): p. 1473-9.
113. Liberato WF, Barreto IC, Costa PP, de Almeida CC, Pimentel W, Tioffi R, A comparison between visual, intraoral scanner, and spectrophotometer shade matching: A clinical study. *J Prosthet Dent*, 2019. 121(2): p. 271-275.
114. Haddad HJ, Jakstat HA, Arnetzl G, Borbely J, Vichi A, Dumfahrt H, Renault P, Corcodel N, Pohlen B, Marada G, de Parga JA, Reshad M, Klinke TU, Hannak WB, Paravina RD, Does gender and experience influence shade matching quality? *J Dent*, 2009. 37 Suppl 1: p. e40-4.
115. Milagres V, Teixeira ML, Miranda ME, Osorio Silva CH, Ribeiro Pinto JR, Effect of gender, experience, and value on color perception. *Oper Dent*, 2012. 37(3): p. 228-33.
116. Capa N, Malkondu O, Kazazoglu E, Calikkocaoglu S, Effects of individual factors and the training process of the shade-matching ability of dental students. *J Dent Sci*, 2011. 6(3): p. 147-152.
117. Poljak-Guberina R, Celebic A, Powers JM, Paravina RD, Colour discrimination of dental professionals and colour deficient laypersons. *J Dent*, 2011. 39 Suppl 3: p. e17-22.
118. Bahannan SA, Shade matching quality among dental students using visual and instrumental methods. *J Dent*, 2014. 42(1): p. 48-52.
119. Alomari M, Chadwick R, Factors influencing the shade matching performance of dentists and dental technicians when using two different shade guides. *Br Dent J*, 2011. 211(11): p. E23.
120. Capa NM, Ozlem; Kazazoglu, Ender; Calikkocaoglu, Senih, Evaluating factors that affect the shade-matching ability of dentists, dental staff members and laypeople. *J Am Dent Assoc*, 2010. 141: p. 71-6.
121. Afrashtehfar K, Increased predictability in tooth shade-matching. *Oral Health*, 2013. 15: p. 44-50.
122. Ballard E. Objective evaluation of clinical shade-matching outcomes [Dissertation]. Louisville, Kentucky: University of Louisville; 2016.
123. Junker S. Evaluation des Einflusses der Positionierung von Farbmustern auf die Reproduzierbarkeit des Ergebnisses im Rahmen der dentalen Farbnahme [Dissertation]. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität 2021.
124. Lath DL, Wildgoose DG, Guan H, Lilley TH, Smith RN, Brook AH, Visual whiteness ranking of a Vitapan 3D Master shade guide by untrained assessors. *J Clin Dent*, 2006. 17(1): p. 10-3.
125. Logvinenko AD, The geometric structure of color. *J Vis*, 2015. 15(1): p. 15.1.16.
126. Nayatani Y, Differences in attributes between color difference and color appearance (chroma and hue) for near-neutral colors. *Color Res Appl*, 2005. 30(1): p. 42-52.
127. Ahn J-S, Lee Y-K, Color distribution of a shade guide in the value, chroma, and hue scale. *J Prosthet Dent*, 2008. 100(1): p. 18-28.
128. Shajahan P, Raghavan R, Neena Kunjumon, The Perfect Match: Recent Advances in Shade Matching. *Int J Dent Med Sci Res*, 2019. 3: p. 9-14.
129. Fairchild MD, *Color Appearance Models*. 2. ed. 2005, New York, NY: John Wiley & Sons. 408.
130. Wood M, Lightness-The Helmholtz-Kohlrausch effect. *Out of the Wood*, 2012: p. 20-22.

131. Fondriest J, Shade matching in restorative dentistry: the science and strategies. *J Prosthet Dent*, 2004. 91(6).
132. Gerlach RW, Barker ML, Sagel PA, Objective and subjective whitening response of two self-directed bleaching systems. *Am J Dent*, 2002. 15 Spec No: p. 7a-12a.
133. Herrera L, Pulgar R, Yebra A, Rivas M, Santana J, Pérez Gómez M, A model for prediction of color change after tooth bleaching based on CIELAB color space, in Third International Conference on Applications of Optics and Photonics. 2017, SPIE: Faro, Portugal. p. 464-469.
134. Alkhodary MA, Correlation and multiple regression analysis of the central incisors and gingival color relationship. *Egypt Dent J*, 2020. 66(3): p. 1757-1767.
135. Clark EB, An Analysis of Tooth Color. *J Am Dent Assoc*, 1931. 18(11): p. 2093-2103.
136. Paravina RD, New shade guide for tooth whitening monitoring: Visual assessment. *J Prosthet Dent*, 2008. 99(3): p. 178-84.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Übersicht des elektromagnetischen Spektrums [27].....	3
Abbildung 2: Längsschnitt durch den Augapfel [33].....	4
Abbildung 3: Der Munsell-Farbkreis entsprechend der Wahrnehmung des menschliche Auges [41]	6
Abbildung 4: L*a*b*-Farbraum und L*C*h°-Farbraum [45].....	8
Abbildung 5: VITA classical® Farbring.....	10
Abbildung 6: VITA Toothguide 3D-MASTER®. 6a) Auf der linken Aufnahme ist der Farbring als digitale Farbfotografie zu sehen. 6b) Das rechte Bild zeigt die gleiche Aufnahme in Graustufen.....	11
Abbildung 7: VITA Bleachedguide 3D-Master®	12
Abbildung 8: Vita Easyshade® V auf der Ladestation mit integriertem Kalibrierblockhalter...	14
Abbildung 9: Beispiel einer Zuordnung durch einen Probanden. Im oberen Bildabschnitt sind die grau markierten Bleachedguide 3D-Master® Farbmuster zu sehen, darunter die zugeordneten Toothguide 3D-Master® Farbmuster.....	20
Abbildung 10: 10a) Repositionierungsschiene mit Aussparung im Mittleren Drittel des Farbmusters (links), 10b) Repositionierungsschiene mit aufgesetzten Messkopf (rechts).....	21
Abbildung 11: Verteilung des Probandengeschlechts.....	26
Abbildung 12: Verteilung der Altersklassen der Probanden.....	26
Abbildung 13: Anteil von Brillenträgern und nicht Brillenträgern der gesamten Probanden- gruppe.....	27
Abbildung 14: Herfindahl Index der Toothguide 3D-Master® Farben, Reihenfolge nach Herstellerangabe.....	30
Abbildung 15: Herfindahl Index der Bleachedguide 3D-Master® Farben, Reihenfolge nach Anordnung im Farbring	31
Abbildung 16: Box-Whisker-Plots der Cohens Kappa-Werte einzelner Probanden zwischen dem 1. und 2. sowie dem 2. und 3. Durchgang. Fleiss' Kappa-Werte einzelner Probanden zwischen 1., 2. und 3. Durchgang. Die Kappa-Werte sind alle signifikant ($p < 0,05$)	35
Abbildung 17: Box-Whisker-Plots der Fleiss Kappa Werte über Alle Probanden, das Ge- schlecht, Brillenträger und nicht Brillenträger sowie über die Altersgruppen.....	37
Abbildung 18: Darstellung der standardisierte Regressionskoeffizienten des Toothguide 3D-Master® und des Bleachedguide 3D-Master®.....	40
Abbildung 19: Korrelation des Bleached-Index des Toothguide 3D-Master® (3DM) mit den zugeordneten Bleachedguide 3D-Master® Farben (BLG), es wurde der Index ausgewählt, der bei zehn Messung am häufigsten auftrat.....	44

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übereinstimmung von Farben anhand der Farbdifferenzen, modifiziert nach Paravina et. al. [28, 56, 57].....	9
Tabelle 2: Altersverteilung der Probanden.....	17
Tabelle 3: Materialien zur Studiendurchführung.....	18
Tabelle 4: Akzeptanz der Zuordnung nach DIN ISO/TR 28642 [87].....	22
Tabelle 5: Akzeptanz der Zuordnung nach Paravina et. al. [56].....	22
Tabelle 6.1: Daten des Easyshade® V. Mittelwert (M) mit Standardabweichung (SD) nach zehn Messungen pro Zahnfarbmuster des Toothguide 3D-Master.....	28
Tabelle 6.2: Daten des Easyshade® V. Mittelwert (M) mit Standardabweichung (SD) nach zehn Messungen pro Zahnfarbmuster des Bleachedguide 3D-Master.....	28
Tabelle 7: Akzeptable zugeordnete Farbpaare nach DIN ISO/TR 2864 und nach Paravina et. al. [57].....	29
Tabelle 8: Exakter Test nach Fischer auf Unabhängigkeit mit Signifikanzniveau 95 % mit $p = 0,05$	30
Tabelle 9: Gemessene und angezeigte Farben des Easyshade® V bei zehn Messungen pro Farbe, sowie Cohens Kappa als Grad der Übereinstimmung. Bleachedguide 3D-Master® oben, Toothguide 3D-Master® unten.....	32
Tabelle 10: Der Grad der Übereinstimmung wird nach der Systematisierung nach Landis und Koch [92].....	33
Tabelle 11: Bleached-Indices der Bleachedguide-Farben, Anzahl der jeweils gemessenen Werte, sowie der zugehörige „wahre“ Wert nach der Angabe auf dem Farbring.....	34
Tabelle 12: Fleiss-Kappawerte der Einzelnen Durchgänge und über alle Durchgänge.....	38
Tabelle 13: Der Einfluss von allen drei Parametern des Bleachedguide 3D-Master® (Helligkeit, Sättigung, Farbton) auf die Helligkeit des Toothguide 3D-Master® ist signifikant.....	39
Tabelle 14: Der Einfluss von allen drei Parametern des Bleachedguide 3D-Master® (Helligkeit, Sättigung, Farbton) auf die Sättigung des Toothguide 3D-Master® ist signifikant.....	39
Tabelle 15: Der Einfluss von allen drei Parametern des Bleachedguide 3D-Master® (Helligkeit, Sättigung, Farbton) auf den Farbton des Toothguide 3D-Master® ist signifikant.....	40
Tabelle 16: Cramer's V Werte des Vergleichs der Bleachedguide 3D-Master® Zuordnungen zwischen Farben der gleichen Helligkeit, der gleichen Sättigung und des gleichen Farbtons nach Herstellerangaben.....	42
Tabelle 17: Das multiple lineare Regressionsmodell zeigt den Einfluss von allen drei Parametern des Toothguide 3D-Master® (Helligkeit, Sättigung, Farbton) auf die gemessenen Bleached-Indices.....	44
Tabelle 18.1-21: Zuordnung der Bleachedguide 3D-Master® Farben in % sowie jeweilige Koordinaten- und Gesamtfarbdifferenzen nach CIE L*a*b* und CIEDE2000.....	72

Anhang

Tab. 18.1-18.21: Zuordnung der Bleachedguide 3D-Master® Farben in % sowie jeweilige Koordinaten- und Gesamfarbdifferenzen nach CIE L*a*b* und CIEDE2000

0M2

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
0,5M1	(100%)	-0,2	2,3	1,6	2,3	0,4	2,8 ^C	0,5	1,6	0,3	1,7 ^B

0M3

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
0,5M1	(99,4%)	-0,1	0,3	1,0	0,3	0,1	1,1 ^A	0,6	0,2	0,1	0,4 ^A
1M1,5	(0,6%)	-0,1	4,8	-5,9	4,8	0,1	7,6 ^C	-1,9	3,0	0,1	3,6 ^C

2L1,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
0,5M1	(72,4%)	0,3	1,5	3,5	1,5	-0,4	3,8 ^C	0,8	0,5	0,29	1,5 ^B
1M1,5	(24,4%)	-0,0	-1,7	4,2	-1,7	0,0	4,5 ^C	1,5	-1,0	0,0	1,8 ^B
2,5M2	(3,2%)	0,93	1,6	-1,3	1,7	-1,2	2,3 ^B	-0,5	0,9	-1,0	1,5 ^B

2L2,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
2,5M2	(72,4%)	0,9	4,7	-2,8	-4,6	-1,3	5,5 ^C	-1,0	-2,4	-1,1	2,8 ^C
1,5M2	(23,7%)	0,3	-4,8	2,0	-4,8	-0,4	5,2 ^C	0,7	-2,5	-0,3	2,6 ^C
3,5M2	(3,2%)	2,4	0,1	-7,5	-0,3	-2,8	7,8 ^C	-2,7	-0,1	-2,3	3,6 ^C
1M1,5	(0,6%)	-0,1	-8,0	2,7	-8,0	0,0	8,5 ^C	0,9	-4,3	0,0	4,4 ^C

2M1

	Metrische Differenzen						CIEDE2000 Differenzen			
	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
1M1,5 (92,9%)	-0,4	2,3	3,6	2,3	0,7	4,3 ^C	1,2	1,4	0,6	2,0 ^C
1,5M2 (5,1%)	-0,1	5,5	2,9	5,51	0,3	6,2 ^C	1,0	3,2	0,3	3,4 ^C
0,5M1 (1,9%)	-0,5	-2,2	10,5	-2,2	0,6	10,7 ^C	3,5	-1,4	0,6	3,8 ^C

2M3

	Metrische Differenzen						CIEDE2000 Differenzen			
	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
2,5M2 (73,7%)	0,0	-6,6	-1,9	-6,6	-0,4	6,9 ^C	-0,7	-3,3	-0,3	3,4 ^C
3,5M2 (18,6%)	1,5	-1,8	-6,6	-1,7	-1,9	7,0 ^C	-2,4	-0,8	-1,6	3,0 ^C
1,5M2 (5,8%)	-0,6	-6,7	2,8	-6,8	0,5	7,3 ^C	1,0	-3,4	0,4	3,5 ^C
4,5M2 (1,3%)	3,0	-0,1	-12,4	0,2	-3,4	12,7 ^C	-4,7	0,1	-2,8	5,4 ^C
5M2,5 (0,6%)	5,0	6,3	-13,6	6,9	-4,5	15,8 ^C	-5,2	3,0	-3,6	7,0 ^C

2R1,5

	Metrische Differenzen						CIEDE2000 Differenzen			
	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
1,5M2 (62,2%)	-0,5	2,6	2,8	2,5	0,8	3,8 ^C	1,0	1,4	0,7	1,8 ^B
1M1,5 (35,8%)	-0,8	-0,6	3,5	-0,7	1,1	3,6 ^C	1,2	-0,4	1,0	1,6
2,5M2 (1,9%)	0,2	2,7	-2,0	2,7	0,0	3,4 ^C	-0,7	1,5	0,0	1,7 ^B

2R2,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
2,5M2	(82,7%)	0,3	-3,9	1,8	-3,9	0,1	4,3 ^C	-0,6	-2,0	-0,1	2,1 ^C
1,5M2	(8,3 %)	-1,0	-4,1	3,0	-4,1	1,0	5,13 ^C	1,0	-2,1	0,8	2,5 ^C
3,5M2	(7,7%)	12	0,9	-6,5	1,0	-1,3	6,6 ^C	-2,4	0,5	-1,1	2,6 ^C
1M1,5	(0,6%)	-1,3	-7,2	3,7	-7,3	1,4	8,2 ^C	1,3	-3,9	1,2	4,3 ^C
4,5M2	(0,6%)	2,7	2,5	-12,2	2,9	-2,8	12,8 ^C	-4,6	1,4	-2,3	5,3 ^C

3L1,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
2,5M2	(79,5%)	-0,1	-0,6	4,4	-0,6	0,1	4,4 ^C	1,6	-0,3	0,1	1,7 ^B
3,5M2	(10,9%)	1,4	4,2	-0,3	4,4	-1,3	4,4 ^C	-0,1	2,2	-1,1	2,4 ^C
1,5M2	(7,7%)	-0,8	-0,7	9,2	-0,8	1,0	9,2 ^C	3,3	-0,4	0,8	3,4 ^C
1M1,5	(1,9%)	-1,1	-3,9	9,9	-4,0	1,3	10,7 ^C	3,5	-2,2	1,1	4,3 ^C

3L2,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
3,5M2	(73,7%)	1,0	-1,6	-0,5	-1,5	-1,4	2,0 ^B	-0,4	-0,7	-1,1	1,4 ^B
2,5M2	(16,7%)	-0,4	-6,4	3,8	-6,4	0,1	7,4 ^C	1,4	-3,2	0,1	3,5 ^C
5M2,5	(4,5%)	4,5	6,5	-7,9	7,1	-3,9	11,2 ^C	-3,1	3,1	-3,1	5,4 ^C
4,5M2	(3,8%)	2,6	0,1	-6,7	0,4	-2,9	7,2 ^C	-2,6	-0,2	-2,4	3,5 ^C
1,5M2	(1,3%)	-1,1	-6,5	8,5	-6,6	1,0	10,8 ^C	3,0	-3,3	0,8	4,6 ^C

3M1

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
1,5M2	(53,2%)	-0,9	3,4	8,0	3,3	1,5	8,8 ^C	2,9	1,9	1,3	3,6 ^C
2,5M2	(27,6%)	-0,3	3,6	3,3	3,5	0,7	4,8 ^C	1,2	2,0	0,6	2,4 ^C
1M1,5	(17,9%)	-1,2	0,2	8,7	0,1	1,7	8,8 ^C	3,1	0,1	1,5	3,5 ^C
3,5M2	(1,3%)	1,2	8,3	-1,4	8,5	-0,5	8,5 ^C	-0,5	4,5	-0,5	4,5 ^C

3M3

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
3,5M2	(62,8%)	-0,2	-5,1	-1,9	-5,1	-0,3	5,5 ^C	-0,7	-2,4	-0,3	2,5 ^C
4,5M2	(24,4 %)	1,3	-3,5	-7,6	-3,2	-1,9	8,5 ^C	-3,0	-1,5	-1,5	3,6 ^C
5M2,5	(7,7%)	3,3	3,0	-8,9	3,5	-3,0	9,9 ^C	-3,5	0,5	-2,3	4,4 ^C
2,5M2	(5,1%)	-1,7	-9,9	2,8	-10,0	1,1	10,4 ^C	1,0	-4,8	0,9	5,0 ^C

3R1,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
2,5M2	(64,7%)	-1,0	1,1	3,3	1,0	1,4	3,6 ^C	1,2	0,5	1,2	1,8 ^B
3,5M2	(25,6 %)	0,5	5,9	-1,4	5,9	0,2	6,1 ^C	-0,5	3,0	0,2	3,1 ^C
1,5M2	(9,0%)	-1,6	1,0	8,0	0,8	2,2	8,2 ^C	2,9	0,4	1,9	3,5 ^C
4,5M2	(0,6%)	2,0	7,6	-7,2	7,9	-1,2	10,6 ^C	-2,8	4,0	-1,0	5,0 ^C

3R2,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
3,5M2	(65,4%)	-0,6	-2,4	1,7	-2,5	0,4	3,0 ^C	-0,6	-1,2	0,3	1,4 ^B
4,5M2	(26,3%)	0,9	-0,8	-7,4	0,6	-1,2	7,5 ^C	-2,9	-0,3	0,9	3,1 ^C
5M2,5	(5,8%)	2,9	5,7	-8,7	6,1	-2,1	10,8 ^C	-3,4	2,6	-1,7	4,6 ^C
2,5M2	(2,6%)	-2,1	-7,2	3,0	-7,4	1,7	8,1 ^C	1,1	-3,7	1,4	4,1 ^C

4L1,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
3,5M2	(84,6%)	0,6	2,9	4,0	3,0	-0,3	4,9 ^C	1,5	1,5	-0,3	2,1 ^C
4,5M2	(9,0 %)	2,1	4,6	-1,8	4,9	-1,8	5,3 ^C	-0,7	2,4	-1,5	2,9 ^C
2,5M2	(5,8%)	-0,9	-1,9	8,7	-2,0	1,0	8,9 ^C	3,3	-1,1	,9	3,5 ^C
1,5M2	(0,6%)	-1,6	-2,0	13,4	-2,2	1,9	13,7 ^C	4,9	-1,2	1,6	5,3 ^C

4L2,5

		Metrische Differenzen					CIEDE2000 Differenzen				
		Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
4,5M2	(59,0%)	1,0	-3,0	-2,8	-2,8	-1,5	4,2 ^C	-1,1	-1,3	-1,2	2,1 ^C
5M2,5	(34,6%)	3,0	3,4	-4,0	-3,9	-2,6	6,1 ^C	-1,6	1,6	-2,03	3,1 ^C
3,5M2	(6,4%)	-0,5	-4,7	3,0	-4,7	0,0	5,6 ^C	1,2	-2,2	0,0	2,4 ^C

4M1

	Metrische Differenzen						CIEDE2000 Differenzen			
	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
3,5M2 (46,8%)	0,5	7,4	3,8	7,4	1,0	8,3 ^C	1,5	3,9	0,5	4,2 ^C
2,5M2 (37,2%)	-1,0	2,6	8,5	2,4	1,7	9,0 ^C	3,2	1,4	1,5	3,8 ^C
4,5M2 (9,6%)	2,0	9,1	-1,9	9,4	-0,8	9,5 ^C	-0,8	4,8	-0,7	4,9 ^C
1,5M2 (5,8%)	-1,7	2,5	13,3	2,2	2,5	13,6 ^C	4,9	1,2	2,1	5,5 ^C
1M1,5 (0,6%)	-2,0	-0,7	14,0	-1,0	2,7	14,2 ^C	5,1	-0,6	2,4	5,7 ^C

4M3

	Metrische Differenzen						CIEDE2000 Differenzen			
	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
5M2,5 (89,7%)	1,7	0,7	-4,0	1,0	-1,6	4,4 ^C	-1,6	0,4	-1,3	2,1 ^C
4,5M2 (9,6 %)	-0,3	-5,8	-2,7	-5,7	-0,6	6,4 ^C	-1,1	-2,5	0,5	2,8 ^C
3,5M2 (0,6%)	-1,8	-7,4	3,0	-7,6	1,0	8,6 ^C	1,2	-3,4	0,8	3,7 ^C

4R1,5

	Metrische Differenzen						CIEDE2000 Differenzen			
	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
3,5M2 (55,8%)	-0,5	4,1	4,1	4,0	1,2	5,8 ^C	1,6	1,6	1,0	2,8 ^C
4,5M2 (36,5%)	1,1	5,7	-2,5	5,9	-0,2	6,3 ^C	-1,0	2,9	-0,2	3,0 ^C
2,5M2 (5,1%)	-2,0	-0,6	8,8	-1,0	2,5	9,0 ^C	3,3	-0,5	2,1	4,0 ^C
5M2,5 (1,3%)	2,8	11,9	-3,0	12,3	-0,9	12,9 ^C	-1,6	5,6	-0,7	5,9 ^C
1,5M2 (0,6%)	-2,6	-0,8	13,5	-1,2	3,3	13,8 ^C	5,0	-0,6	2,8	5,7 ^C
1M1,5 (0,6%)	-2,9	-4,0	14,2	-4,4	3,5	15,1 ^C	5,2	-2,4	3,0	6,5 ^C

4R2,5

	Metrische Differenzen						CIEDE2000 Differenzen			
	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
4,5M2 (74,4%)	-0,5	-2,7	-2,8	-2,8	0,0	3,9 ^C	-1,1	-1,3	0,0	1,7 ^B
5M2,5 (22,4%)	1,5	3,7	-5,1	4,0	-0,9	5,7 ^C	-1,6	1,7	-0,7	2,4 ^C
3,5M2 (3,2%)	-2,0	-4,4	3,0	-4,6	1,5	5,7 ^C	1,2	-2,2	1,3	2,7 ^C

5M1

	Metrische Differenzen						CIEDE2000 Differenzen			
	Δa^*	Δb^*	ΔL^*	ΔC^*	Δh°	ΔE_{ab}	ΔE_{L^*}	ΔE_{C^*}	ΔE_{h°	ΔE_{00}
4,5M2 (62,2%)	1,1	7,2	3,4	7,3	0,1	8,0 ^C	1,4	3,6	0,1	3,9 ^C
3,5M2 (30,8%)	-0,4	5,5	9,1	5,3	1,4	10,7 ^C	3,7	2,7	1,2	4,7 ^C
5M2,5 (5,8%)	3,1	13,6	2,1	14,0	0,7	14,1 ^C	0,9	6,5	-0,6	6,6 ^C
2,5M2 (1,3%)	-1,9	0,7	13,8	0,4	2,6	14,0 ^C	5,4	0,2	2,3	5,8 ^C

Informationen für die Probanden

Fachbereich 04 Universitätsmedizin Mainz - Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde
Augustusplatz 2 55131 Mainz

ZÄ Hannah Buchmeier

Informationen für Probanden

Visueller und elektronischer Vergleich der Farbmuster des VITA Toothguide 3D- Master[®] und Bleachedguide 3D-Master[®]

Sehr geehrter Damen und Herren, hiermit möchten wir Sie fragen, ob Interesse besteht an der nachfolgend beschriebenen Studie teilzunehmen. Die Teilnahme ist selbstverständlich freiwillig.

Ziel

Es soll herausgefunden werden, ob eine visuelle Schnittmenge zwischen dem Farbmustern des Toothguide 3D Master[®] und Bleachedguide 3D Master[®] existiert.

Vorgehensweise

Sie als Proband sollen den Farbmustern des 3D Master[®] die des Bleachedguide 3D Master[®] zuordnen. Die Farbbezeichnung wurde zuvor unkenntlich gemacht, Sie kennen nur die Zugehörigkeit zum Farbschlüssel. Die Zuordnung erfolgt visuell auf einem neutralen grauen Hintergrund und unter einer Tageslichtlampe, in dem Sie die zugeordneten Farbpärchen deutlich sichtbar zusammenlegen. Dieses soll drei Mal, zu unterschiedlichen Zeitpunkten (mindestens eine Woche Abstand) durchgeführt werden und jeweils, ca. 10 Minuten in Anspruch nehmen. Also für alle drei Durchgänge ca. 30 Minuten. Nebenwirkungen

Sie haben keinen mit der Studienteilnahme verbundenen individuellen Nutzen und keinerlei Belastungen oder Risiken.

Gefährdungshaftung:

Vorsorglich werden Sie darauf hingewiesen, dass eine Versicherung für nicht schuldhaft verursachte Schäden, die im Zusammenhang mit der Studie auftreten können, nicht abgeschlossen wurde. Ein Versicherungsschutz besteht damit nur, wenn den Arzt oder einen anderen Mitarbeiter der Prüfstelle der Vorwurf eines schuldhaften Fehlverhaltens trifft. In Zweifelsfällen von der Prüfstelle muss dabei der Entlastungsbeweis geführt werden, dass kein Verschulden vorliegt.

Wegeunfälle sind ebenfalls nicht versichert.

Bei Fragen stehe ich Ihnen gerne per E-Mail unter der Adresse hbuchmei@students.uni-mainz.de zur Verfügung Umgang mit persönlichen Daten

Die Aufzeichnung Ihrer Studiendaten erfolgt zunächst in Originalunterlagen. Jedem Probanden wird zur Pseudonymisierung eine Fallnummer zugeordnet, sodass keine personenbezogenen Daten einem Probanden zugeordnet werden können. Es existiert ein separat hinterlegter Schlüssel mit dem bei berechtigten Gründen (beispielsweise der Widerruf der Einwilligung) durch die Doktorandin die Daten zugeordnet werden können, Die Daten werden gesammelt, statistisch ausgewertet und für 10 Jahre gespeichert und danach gelöscht. Alle erhobenen Daten werden pseudonymisiert ausgewertet und auch eine Weitergabe an Dritte (Biometriker) einschließlich Publikationen erfolgen ausschließlich in anonymisierter Form.

Sie können jederzeit mündlich oder schriftlich ohne Angabe von Gründen und ohne jegliche Nachteile Ihre Einwilligung widerrufen. Ihre bis dahin erhobenes Daten werden umgehend unwiderruflich vernichtet.

Hiermit möchten wir Sie über die in der Datenschutz-Grundverordnung (= DSGVO) festgelegten Rechte informieren (Artikel 12 ff. DS-GVO):

Rechtsgrundlage

Die Rechtsgrundlage zur Verarbeitung der Sie betreffenden personenbezogenen Daten bilden bei klinischen Studien (einschließlich klinischer Prüfungen) Ihre freiwillige schriftliche Einwilligung gemäß DSGVO sowie der Deklaration von Helsinki (Erklärung des Weltärztebundes zu den ethischen Grundsätzen für die medizinische Forschung am Menschen) und der Leitlinie für Gute Klinische Praxis. Bei Arzneimittel-Studien ist zusätzlich das Arzneimittelgesetz, bei Medizinprodukte-Studien das Medizinproduktegesetz anzuwenden.

Bezüglich Ihrer Daten haben Sie folgende Rechte (Artikel 13 ff. DS-GVO):

Recht auf Auskunft

Sie haben das Recht auf Auskunft über die Sie betreffenden personenbezogenen Daten, die im Rahmen der klinischen Studie erhoben, verarbeitet oder ggf. an Dritte (Biometriker) übermittelt werden (Aushändigen einer *kostenfreien* Kopie) (Artikel 15 DSGVO).

Recht auf Berichtigung

Sie haben das Recht Sie betreffende unrichtige personenbezogene Daten berichtigen zu lassen (Artikel 16 und 19 DSGVO).

Recht auf Löschung

Sie haben das Recht auf Löschung Sie betreffender personenbezogener Daten, z.B. wenn diese Daten für den Zweck, für den sie erhoben wurden, nicht mehr notwendig sind oder Sie Ihre Einwilligung widerrufen, auf die sich die Verarbeitung Ihrer Daten stützt. Die Rechtmäßigkeit, der aufgrund der Einwilligung bis zum Widerruf erfolgten Verarbeitung wird, hiervon nicht berührt." (Artikel 7, 17 und 19 DSGVO).

Recht auf Einschränkung der Verarbeitung

Unter bestimmten Voraussetzungen haben Sie das Recht, die Einschränkung der Verarbeitung zu verlangen, d.h. die Daten dürfen nur gespeichert, aber nicht verarbeitet werden. Dies müssen Sie beantragen. Wenden Sie sich hierzu bitte an die Doktorandin. (Artikel 18 und 19 DSGVO).

Im Falle der Berichtigung, Löschung, Einschränkung der Verarbeitung werden zudem all jene benachrichtigt, die Ihre Daten erhalten haben (Artikel 17 Absatz 2 und Artikel 19 DSGVO).

Recht auf Datenübertragbarkeit

Sie haben das Recht, die Sie betreffenden personenbezogenen Daten, die Sie dem Verantwortlichen für die klinische Studie bereitgestellt haben, zu erhalten. Damit können Sie beantragen, dass diese Daten entweder Ihnen oder, soweit technisch möglich, einer anderen von Ihnen benannten Stelle übermittelt werden (Artikel 20 DSGVO).

Widerspruchsrecht

Sie haben das Recht, bei Vorliegen von Gründen, die sich aus Ihrer besonderen Situation ergeben, jederzeit gegen konkrete Entscheidungen oder Maßnahmen zur Verarbeitung der Sie betreffenden personenbezogenen Daten Widerspruch einzulegen (Artikel 21 DSGVO). Eine solche Verarbeitung findet anschließend grundsätzlich nicht mehr statt.

Einwilligung zur Verarbeitung personenbezogener Daten und Recht auf Widerruf dieser Einwilligung

Die Verarbeitung Ihrer personenbezogenen Daten ist mit Ihrer Einwilligung rechtmäßig (Artikel 6 DSGVO). Sie haben das Recht, Ihre Einwilligung zur Verarbeitung personenbezogener Daten jederzeit zu widerrufen. Die Rechtmäßigkeit der aufgrund der Einwilligung bis zum Widerruf erfolgten Verarbeitung wird hiervon nicht berührt (Artikel 7 Absatz 3 DSGVO).

Benachrichtigung bei Verletzung des Schutzes personenbezogener Daten („Datenschutzpannen“)

Hat eine Verletzung des Schutzes personenbezogener Daten voraussichtlich ein hohes Risiko für Ihre persönlichen Rechte und Freiheiten zur Folge, so werden Sie unverzüglich benachrichtigt (Artikel 34 DSGVO).

Möchten Sie eines dieser Rechte in Anspruch nehmen, wenden Sie sich bitte an die Doktorandin. Außerdem haben Sie das Recht, Beschwerde bei der/den Aufsichtsbehörde/n einzulegen, wenn Sie der Ansicht sind, dass die Verarbeitung der Sie betreffenden personenbezogenen Daten gegen die DSGVO verstößt (siehe Kontaktdaten).

Sie erreichen die Doktorandin unter der folgenden E-Mail-Adresse:

hbuchmei@students.uni-mainz.de

Verantwortlich für die Verarbeitung personenbezogener Daten

UNIVERSITÄTSMEDIZIN der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Langenbeckstraße 1
55131 Mainz
Telefon: +49 6131-170

Kontaktdaten der/des Datenschutzbeauftragten

UNIVERSITÄTSMEDIZIN der Johannes Gutenberg-Universität Mainz
Datenschutzbeauftragter
Langenbeckstraße 1
55131 Mainz
Telefon: +49 6131-170

Kontaktdaten Aufsichtsbehörde

Der Landesbeauftragte für den Datenschutz und die Informationsfreiheit Rheinland-Pfalz
Postfach 30 40
55020 Mainz
Telefon: +49 (0) 6131 208-2449

Einwilligungserklärung der Probanden

Fachbereich 04 Universitätsmedizin Mainz - Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde
Augustusplatz 2 55131 Mainz

ZÄ Hannah Buchmeier

Visueller und elektronischer Vergleich der Farbmuster des VITA Toothguide 3D- Master® und Bleachedguide 3D-Master®

Einwilligungserklärung

„Ich erkläre mich bereit an der o. g. Studie freiwillig teilzunehmen. Ich bin in einem persönlichen Gespräch ausführlich und verständlich über Wesen, Bedeutung, Risiken und Tragweite der Studie aufgeklärt worden. Alle meine Fragen wurden zufriedenstellend beantwortet, ich kann jederzeit neue Fragen stellen. Ich habe darüber hinaus den Text der Studienaufklärung gelesen und verstanden.

Ich hatte ausreichend Zeit, mich zu entscheiden. Mir ist bekannt, dass ich jederzeit und ohne Angabe von Gründen meine Einwilligung zur Teilnahme an der Studie zurückziehen kann (mündlich oder schriftlich), ohne dass mir daraus Nachteile entstehen.“

Ich habe verstanden und bin damit einverstanden, dass meine studienbezogenen Daten (Name, Alter, Brillenträger, männlich/weiblich) pseudonymisiert (d.h. kodiert ohne Angabe von Namen, Anschrift, Initialen oder Ähnliches) erhoben, auf Datenträgern gespeichert und vom Auftraggeber der Studie ausgewertet werden. Die Daten werden 10 Jahre gespeichert und anschließend gelöscht.

Die Weitergabe an Dritte (Biometriker), einschließlich Publikation erfolgt ausschließlich in anonymer Form, d.h. kann nicht meiner Person zugeordnet werden.

Für den Fall, dass ich die Studienteilnahme widerrufe, werden meine bereits erhobenen personenbeziehbaren Daten zum frühestmöglichen Zeitpunkt gelöscht.

Ein Exemplar der Studieninformation und Einwilligungserklärung habe ich erhalten, gelesen und verstanden.

Ort, Datum,

Unterschrift Proband

Zuordnungstabelle

„Visueller und elektronischer Vergleich der Farbmuster des VITA Toothguide 3D- Master® und Bleachedguide 3D-Master®“

Probanden Kennung

W/M

Brille

Alter:

3DM Farbe	BLG 1.Durchgang	BLG 2.Durchgang	BLG 3.Durchgang
0M2			
0M3			
2L1,5			
2L2,5			
2M1			
2M3			
2R1,5			
2R2,5			
3L1,5			
3L2,5			
3M1			
3M3			
3R1,5			
3R2,5			
4L1,5			
4L2,5			
4M1			
4M3			
4R1,5			
4R2,5			
5M1			

Danksagung

Lebenslauf