

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

***Evaluation der Messgenauigkeit des dentalen
Farbbestimmungsgerätes VITA Easyshade V bei
Neuanfertigung prothetischen Zahnersatzes***

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

Vorgelegt von

Miriam Jenisch
aus Neuwied

Mainz, 2021

Wissenschaftlicher

Vorstand: Univ.-Prof. Dr. XXX

1. Gutachter: Prof. Dr. XXX

2. Gutachter: Prof. Dr. XXX

Tag der Promotion: 07.12.2021

Meinem Mann in großer Dankbarkeit gewidmet.

Inhaltsverzeichnis:

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS.....	5
ABBILDUNGSVERZEICHNIS	6
1. EINLEITUNG	7
2. LITERATURDISKUSSION	8
2.1. PHYSIOLOGISCHE HINTERGRÜNDE.....	8
2.1.1 Sinneswahrnehmung.....	8
2.1.2 Fehlsichtigkeit.....	11
2.1.3 Farbsinnesstörungen.....	12
2.2. FARBE	14
2.2.1 Farbtheorien.....	14
2.2.2 Was ist Farbe?.....	15
2.2.3 Farbräume.....	17
2.3. ZAHNFARBRAUM.....	21
2.4. ZAHNFARBE.....	23
2.5. ZAHNFARBENBESTIMMUNG.....	26
2.5.1. Manuelle Zahnfarbenbestimmung.....	26
2.5.2. Digitale Zahnfarbenbestimmung.....	29
2.6. REPRODUKTION VON ZAHNFARBE.....	31
3. MATERIAL UND METHODE.....	33
3.1. MATERIAL.....	33
3.1.1. Geräte.....	33
3.1.2. Instrumente.....	34
3.1.3. Verbrauchsmaterial.....	35
3.1.4. Software.....	35
3.2. METHODE.....	36
3.2.1. In-vivo Messungen.....	36
3.2.2. Datenerhebung.....	36
3.3. VERSUCHSAUSWERTUNG.....	40
4. ERGEBNISSE	41
4.1. Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Zufriedenheit von Zahnärzten und Patienten bei Verwendung einer Analogskala von 1-10.....	41
4.2. Ergebnisse der Signifikanztestung der einzelnen gemessenen Farbabweichungsvariablen sowie im Speziellen dreier binärer Variablen.....	44
4.3. Ergebnisse der Korrelationsanalyse von Zufriedenheitswerten und Farbabweichungsvariablen.....	47
4.4. Ergebnisse der Kausalitätsprüfung von Zufriedenheitswerten und der unter 4.2 verwendeten binären Variablen.....	50
5. DISKUSSION	53
5.1. METHODENDISKUSSION	53
5.2. ERGEBNISDISKUSSION	56
6. ZUSAMMENFASSUNG	60
7. LITERATURVERZEICHNIS.....	62
ANHANG.....	69

Abkürzungsverzeichnis

CIE	Commission D'eclair International
dpt	Dioptrien
nm	Nanometer
mm	Millimeter
ZNS	Zentrales Nervensystem
VE-V	VITA Easyshade V
Min	Minimum
Max	Maximum
SD	Standardabweichung
ZE	Zahnersatz

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Aufbau des Augapfels	8
Abbildung 2: Aufbau der Netzhaut	10
Abbildung 3: CIE-Normvalenzsystem	18
Abbildung 4: CIE L*a*b*-Farbraum in Achsendarstellung.....	19
Abbildung 5: Lage des Zahnfarbraumes im L*a*b*-Farbraum.....	21
Abbildung 6: VITAPAN classical Farbskala	27
Abbildung 7: VITA Toothguide 3D Master	28
Abbildung 8: Zahnfarbenbestimmung mit dem VITA 3D-Master (modifiziert nach VITA 2011).....	28
Abbildung 9: Aufbau eines dentalen Kolorimeters.....	30
Abbildung 10: Aufbau eines dentalen Spektralphotometers	30
Abbildung 11: VITA Easyshade	33
Abbildung 12: Anwendungsbeispiel Betriebsmodus Grundfarbbestimmung am natürlichen Zahn [73]	37
Abbildung 13: Anwendungsbeispiel Farbanzeige der gemessenen Zahnfarbe in der VITA classical ®-, sowie 3D-Master ® Farbkodierung [73]	37
Abbildung 14: Anwendungsbeispiel Detailansicht der VITA classical® Farbe [73]	38
Abbildung 15: Anwendungsbeispiel Betriebsmodus "Bestimmung der Farbe einer Krone" [73]	38
Abbildung 16: Anwendungsbeispiel Farbanzeige der gemessenen Kronenfarbe in der VITA classical-, sowie 3D-Master Farbkodierung [73].....	38
Abbildung 17: Häufigkeit der Patientenzufriedenheit in Prozent	41
Abbildung 18: Häufigkeit der Zahnarztzufriedenheit in Prozent	42
Abbildung 19: Box-Whisker-Plot zu Patienten-und Zahnarztzufriedenheit auf einer Skala von 1-10.....	43
Abbildung 20: Streudiagramm für Abhängigkeit Zahnarztzufriedenheit und Δb	49
Abbildung 21: Box-Whisker-Plot für Zusammenhang Zahnarztzufriedenheit und gemessenen Farbwerten	52

1. Einleitung

In einer heutigen Gesellschaft, die von Medien bestimmt wird, spielt die Ästhetik eine immer größere Rolle: Schönheitsideale wurden insbesondere in den letzten Jahrzehnten neu definiert und tragen einen hohen Stellenwert. Auch die Zahnmedizin spürt diese Auswirkungen. Die Ansprüche an Zahnersatz werden stets höher. Eine möglichst naturgetreue Nachbildung soll erreicht werden, ein harmonisches Bild der Gesamtsituation. Die Nachbildung sollte als solche nicht erkannt werden, so der Anspruch des heutigen Patienten. Dabei spielt neben Stellung und Form der Restaurationen die Zahnfarbe eine tragende Rolle [1]. Denn Farbe bedeutet auch Individualität und verleiht speziellen Charakter [2].

Folglich wird das Auge des Zahnarztes gefordert, eine möglichst exakte Farbbestimmung für die künstliche Versorgung des Zahnes vorzunehmen. Doch ist das menschliche Auge fehlbehaftet. An dieser Stelle ist der Wunsch nach Objektivität groß. Je genauer eine Farbe definiert werden kann, desto weniger wird der künstliche Zahn als Fremdkörper wahrgenommen [2]. Seit den 1990er Jahren ist eine solche Definition in elektronischer Form möglich: die fotometrische Farbbestimmung bietet eine menschenunabhängige Komponente, im Speziellen bei der Herstellung von keramischem Zahnersatz. Digitale Farbbestimmungsgeräte haben das Potential die Farbbestimmung in puncto Präzision und Reliabilität zu verbessern [3]. Einteilen lassen sie sich in Kolorimeter, Spektralphotometer und Digitalkamerasysteme mit korrespondierender Software [4][5].

Für diese Arbeit wird ein Gerät der Firma VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG (Easyshade V, 2015) genutzt, um spektralphotometrisch die natürliche Zahnfarbe am Patienten und die im Anschluss angefertigte keramische Restauration *in vivo* zu bestimmen.

Ziel der Arbeit ist es, den Unterschied zwischen den beiden gemessenen Farbwerten zu vergleichen und einen Zusammenhang zwischen Patienten- bzw. Behandlerzufriedenheit und der gemessenen Zahnfarbe des Gerätes herzustellen. Ob die erhobenen Daten einen Rückschluss auf subjektive Zufriedenheitswerte zulassen gilt es zu prüfen.

2. Literaturdiskussion

2.1. Physiologische Hintergründe

2.1.1 Sinneswahrnehmung

Direktes oder reflektiertes Licht mit einer Wellenlänge von 380 bis 750nm gelangt durch Hornhaut, Linse und Glaskörper und trifft schließlich auf die Netzhaut (Retina) des menschlichen Auges (siehe Abb.1). Dort wird der physikalische Lichtreiz von Rezeptoren (Zapfen und Stäbchen) (siehe Abb.2) in eine physiologische Erregung umgewandelt und über den Sehnerv (Nervus opticus), der den Augapfel (Bulbus) an der Papille (Papilla nervi optici) verlässt, an das Gehirn weiter geleitet.

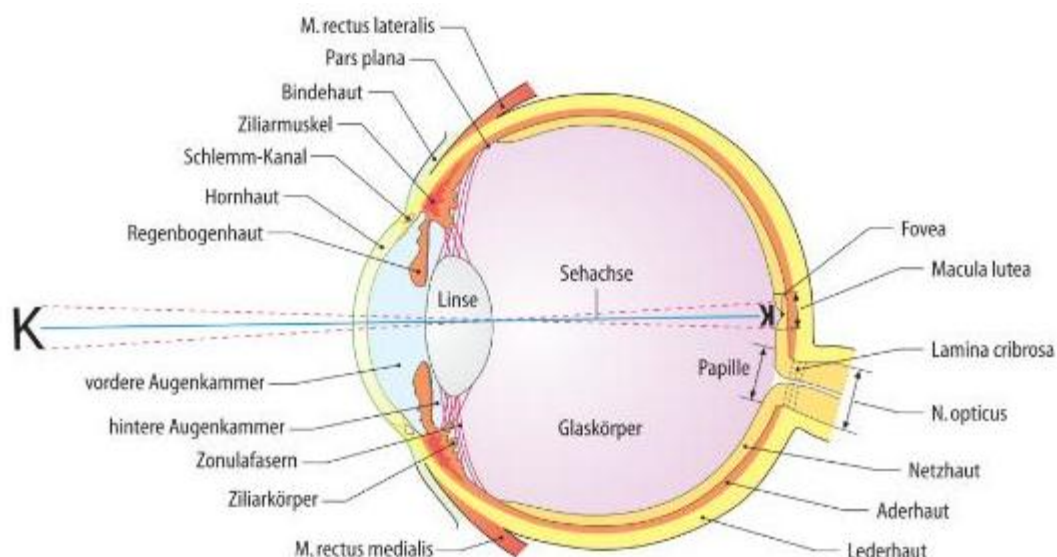


Abbildung 1: Aufbau des Augapfels [6]

Die vor der Linse befindliche Regenbogenhaut (Iris) fungiert als Blende, um die Lichtintensität zu regeln. Die Linse selbst kann durch unterschiedliche Krümmung Nah- und Fernpunkte auf der Netzhaut scharf abbilden [6][7][8].

Photopisches und skotopisches Sehen:

Die photopische Wahrnehmung beruht auf ca. 6 Millionen Zapfen der Retina (siehe Abb.1). In der Fovea Centralis (Bereich des schärfsten Sehens) sind die meisten davon angeordnet und jeder Zapfen ist mit einer einzelnen Ganglienzelle verschaltet. In anderen Regionen der Retina konvergieren ca. 250 Zapfen auf eine Ganglienzelle [9].

Unterschieden werden bisher drei Arten: „S-, M- und L-Typ“. Sie unterscheiden sich im enthaltenen Sehfärbstoff und somit auch in ihrem Absorptionsmaximum. Bei 440nm Wellenlängenbereich reagieren die „Short- oder auch Blauzapfen“, bei 535nm die „M- bzw Grün-Zapfen“ und bei 567nm die „Long- oder roten Zapfen“. Hierauf beruht auch das trichromatische Sehen: Farbeindrücke werden durch unterschiedliche Erregungsstärken der drei einzelnen Zapfensorten ausgelöst. Dabei kommt nur eine Sorte Sehpigment jeweils in den einzelnen Zapfen vor [10].

Der Sehfärbstoff Rhodopsin besteht aus einem Opsin mit Aminosäuren und dem Retinal. Diese Aminosäuresequenzen können unterschiedlich sein, daher auch die Existenz der drei Zapfentypen. Das Retinal entsteht als Aldehyd des Vitamin A und gelangt über das Blut aus der Leber in die Zapfen.

Aufgebaut sind die Photorezeptoren aus einem Nervenfortsatz und einem Außen- und Innensegment, welche wiederum über ein Zilium verbunden sind. Im Außensegment befinden sich Membranscheiben, die das Rhodopsin tragen und täglich erneuert werden. Es ist den Pigmentepithelzellen zu- und somit dem einfallenden Licht abgewandt. Die Basis der Innensegmente ist verschaltet mit Horizontal- und Bipolarzellen, die über die Ganglienzellen mit dem Nervus opticus verbunden sind (siehe Abb.2) [10].

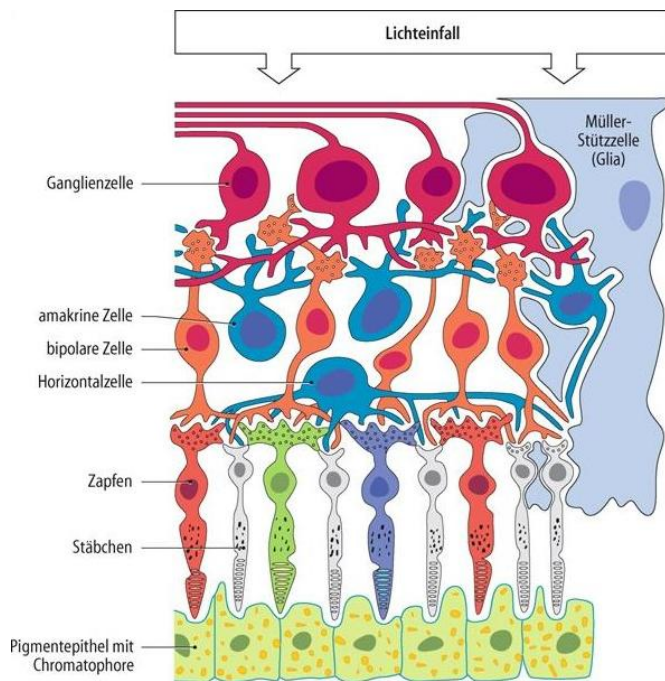


Abbildung 2: Aufbau der Netzhaut [6]

Da viele Photosensoren auf wenige Ganglienzellen treffen, spricht man von Signalkonvergenz. Werden alle drei Zapfentypen mit ausreichend hoher Intensität gereizt, entsteht der Farbeindruck *weiß*. Folglich können unterschiedliche Lichtintensitäten einen weißen Farbeindruck hinterlassen [11].

Neben den Zapfen existieren noch Stäbchen als Rezeptoren. Sie sind für das skotopische oder Hell- Dunkel-Sehen verantwortlich. Davon existieren ca. 120-130 Mio. vorwiegend am retinalem Rand, statt im Zentrum wie die Zapfen. Die Empfindlichkeit der Stäbchen liegt bei 500nm Wellenlänge, also im blaugrünen Spektralbereich. Sie sind lichtempfindlich und tragen nicht zum scharfen Sehen bei. Im Dunkeln sind die Rezeptorzellen depolarisiert. Trifft nun Licht auf das Auge zerfällt in den Außensegmenten das Rhodopsin und es kommt zu einer Hyperpolarisation. Dieses elektrische Signal wird über die o.g. Bipolarzellen zu den Ganglienzellen weitergeleitet, die wiederum ein Aktionspotenzial auslösen, dessen Frequenz von der Hyperpolarisation der Rezeptoren abhängt. Der weitergeleitete Nervenimpuls führt über Verschaltungen in der Sehbahn zur Sinneswahrnehmung [10][13].

Bedeutung Rezeptive Felder:

Der Bereich auf der Netzhaut, auf dem Informationen vom Rezeptor zu einer Ganglienzelle weitergeleitet wird, trägt die Bezeichnung ‚rezeptives Feld‘. In diesen Feldern gibt es ein Zentrum und eine Umgebung in dem die Zapfen mit ON-oder OFF-Bipolarzellen und diese wiederum mit den zugehörigen ON- oder OFF-Ganglienzellen verschaltet sind. In den Ganglienzellen werden die ankommenden Signale schließlich räumlich summiert, wobei farbkodierende und Helligkeitskodierende Neurone zu unterscheiden sind [10][12][13].

Bei Lichteinfall depolarisieren die ON- Zellen, wohingegen OFF- Zellen hyperpolarisieren, was mit Aktivierung und Hemmung interpretiert werden kann, sodass ein Hell- Dunkel- Kontrast entsteht. Gleichzeitig können sogenannte Horizontalzellen den Helligkeitsbereich einstellen, indem sie zwischen den Zapfen einen Rückkopplungsmechanismus hervorrufen [10][12][13].

Bei den Stäbchen existiert nur eine Sorte Bipolarzellen. Die Verschaltung auf Ganglienzellen wird hier über Amakrinzellen reguliert. Deren Aufgabe besteht darin, über Depolarisation eine ON-Ganglienzelle zu erregen und gleichzeitig eine OFF-Ganglienzelle zu hemmen. Wichtig wird dies z.B. beim Bewegungssehen[10][12][13].

2.1.2 Fehlsichtigkeit

Die geringste Entfernung mit der das Auge noch scharf sehen kann wird als Nahpunkt bezeichnet. Mit zunehmendem Alter rückt dieser weiter weg und die Anpassung der Brechkraft (Akkommodationsbreite) nimmt ab: pro 5 Jahre um ca. 0,75dpt. Grund für diese sogenannte Altersweitsichtigkeit (Presbyopie) ist die abnehmende Elastizität der Linse und eine Verdichtung des Linsenkerns, da die Linse im Laufe des Lebens wächst. Nimmt die Brechkraft zu, kann die Linse sich also nicht mehr kugelig zusammenziehen und nahe befindliche Gegenstände können nicht mehr scharf wahrgenommen werden [6][14]. Eine Sammellinse (konvex) passt den Nahpunkt wieder an.

Zu unterscheiden ist die Presbyopie von der eigentlichen Weitsichtigkeit (Hyperopie).

Dabei ist das Auge zu kurz und/oder die Brechkraft zu niedrig. Das Bild liegt beim fernakkommodierten Auge hinter der Netzhaut. Durch Akkommodation muss zusätzliche Brechkraft aufgewendet werden, was mit einer Sammellinse (konvex) erreicht wird.

Die Myopie (Kurzsichtigkeit) zeichnet sich durch einen zu „langen“ Bulbus im Verhältnis zur Brechkraft aus. In der Nähe kann schärfer gesehen werden, da das Bild bei Fernakkommodation vor der Netzhaut liegt. Eine Streulinse (konkav) mit negativer Brechkraft schafft Abhilfe.

Astigmatismus beruht auf einer Krümmungsanomalie der Hornhaut. Auf der Netzhaut wird zur Folge nicht scharf abgebildet. Der Brechkraftunterschied innerhalb der Kornea überschreitet hier 0,5dpt. Eine Korrektur erfolgt mit Zylindergläsern, mit sammelnder oder zerstreuer optischer Wirkung [14].

2.1.3 Farbsinnesstörungen

Angeborene Störungen

Monochromasie (totale Farbblindheit) kommt sehr selten vor. Einer von 30.000 Menschen leidet darunter. Das Sehen wird nur von den Stäbchen vermittelt, da die Zapfen Rhodopsin, also den Stäbchenfarbstoff enthalten. Es werden nur Grauwerte unterschieden und scharfes Sehen ist kaum möglich. Zusätzlich fühlen sich die Betroffenen leicht geblendet, da die Helladaptation gestört ist [13].

Dichromasie (Zweifarbensehen). Dabei sind nur noch zwei der drei Zapfentypen der Netzhaut aktiv. Somit fehlt ein Sehpigment komplett. Komplementärfarben können nicht unterschieden werden. Je nach fehlendem Zapfentyp wird unterschieden in:

- Protanopie: Rotblindheit
- Deuteranopie: Grünblindheit
- Tritanopie: Blauviolettblindheit

1,3% der Männer und 0,02% der Frauen leiden unter Grünblindheit, ähnlich der Rotblindheit: 1% der Männer und 0,02% der Frauen sind betroffen.

Trichromasie (anomales Dreifarbensehen). Im Unterschied zur Dichromasie mangelt es bei dieser Anomalie nur an der Funktion von einem der drei Zapfensehpigmente,

sodass von einer Sehschwäche die Rede ist. Hierunter fällt die bekannte Rot-Grünschwäche. Analog zum Zweifarbensehen existieren:

- Protanomalie: Rotschwäche
- Deuteranomalie: Grünschwäche
- Tritanomalie: Blauviolettschwäche

8 Prozent der männlichen Bevölkerung und nur 1 Prozent der weiblichen leiden an Farbfehlsichtigkeiten, da diese in der Regel X-chromosomal rezessiv vererbt wird [13].

Erworbene Störungen

Farbsinnstörungen, die aufgrund von Augen-, Sehnerv- oder höherer Sehbahnerkrankungen auftreten, werden als erworbene oder sekundäre Störungen bezeichnet. Auch Allgemeinerkrankungen oder Vergiftungen können solche herbeiführen. Dabei sind im Gegensatz zu angeborenen Sehstörungen Männer und Frauen gleich häufig erkrankt. Je nach Ausprägung der Grunderkrankung variiert die Intensität. Ist zunächst nur ein Auge betroffen und sind noch weitere visuelle Funktionsstörungen nachweisbar, so sind dies die häufigsten Merkmale einer erworbenen Farbsinnstörung. Unterschieden werden Rot-Grün-Störungen von Blau-Gelb-Störungen, wobei letztere häufiger auftreten [14][15].

Mit Hilfe des Verriest-Systems und der Koellner-Regel lassen sich die erworbenen Störungen klassifizieren: Verriest Typ I (retinal) und II (neuronal) beziehen sich auf Rot-Grün-Störungen mit und ohne Hellempfindlichkeit, wobei entweder die Retina oder der Sehnerv erkrankt sind.

Unter Typ III werden alle erworbenen Blau-Gelb-Störungen zusammengefasst [16]. Nach der Koellner-Regel basieren Blau-Gelb-Störungen vorwiegend auf Netzhauterkrankungen und Rot-Grün-Störungen auf Erkrankungen des N. opticus. Demnach zählen Erkrankungen wie Katarakt, Glaukom und diabetische Retinopathie zu den Blau-Gelb-Störungen, eine Läsion der Sehbahn oder die juvenile Makuladegeneration hingegen zu den Rot-Grün-Störungen [17].

2.2. Farbe

2.2.1 Farbtheorien

Die ersten Erklärungen von Farbe in der Geschichte der modernen Farbtheorie mit zugehörigem Modell gehen auf Isaac Newton (1643-1727) zurück. Dank seiner Versuchsanordnung zur Lichtbrechung konnte er einzelne Spektralfarben nachweisen und dass weißes Licht aus diesen besteht. Sein Farbmodell stellte einen Kreis dar und enthielt die Farben Blau, Grün, Gelb, Orange, Indigo, Violett und Rot, wobei er Weiß in der Mitte anordnete [18].

Thomas Young (1773-1829), ein englischer Mediziner des 19. Jahrhunderts begründete das menschliche Farbsehen mit dem Aufbau der Netzhaut, die für nur drei Farben empfindlich sei. Außerdem könne durch Mischung der drei Farben alle anderen Farbtöne hergestellt werden. Er entdeckte auch, dass Farbempfindung einer bestimmten Farbe nicht nur auf einer, sondern auf Strahlen verschiedener Wellenlängen beruhe [19].

In seiner „Theorie des Farbsehens“ bewies der schottische Physiker James Clerk Maxwell (1831-1879) im Jahre 1859 mit einem Farbendreieck, dass mit Mischung der drei Spektralfarben Rot, Grün, Blau alle Farben synthetisiert werden können – heute additive Farbmischung genannt. Dies gilt als Basis der Colorimetrie (quantitative Farbmessung) [20].

Weiter gelang es Hermann von Helmholtz (1821-1894) als deutschem Physiker und Physiologen, gestützt auf die Arbeit seiner Vorgänger die trichromatische Theorie der menschlichen Farbwahrnehmung zu vervollständigen: die Retina enthalte drei Zapfentypen mit unterschiedlichen Sehpigmenten, die bei Farbreizen durch Lichteinfall simultan erregt werden und empfindlich für Rot, Grün und Blau seien. Bei gleich starker Erregung aller Zapfentypen würde Weiß wahrgenommen, Schwarz bei keiner Stimulation. Helmholtz verglich des Weiteren Klangeigenschaften von Tönen mit den Primärfarben in Hinblick auf Farbton, Sättigung und Helligkeit. Auf dieser Charakterisierung von Farben basieren viele farbmessische Modelle wie das CIE-Farbdigramm von 1931, in dem die drei Primärfarben mit X, Y, Z ersetzt wurden, um sie im dreidimensionalen Raum definieren zu können [21][22].

Nach der „Gegenfarbtheorie“ des deutschen Physiologen und Arzt Ewald Hering (1834-1918) bilden die Farben Rot, Blau, Grün und Gelb „physiologische Primärfarben“. Basierend auf dem Farbempfinden ordnete er die genannten Farben in Gegenfarbpaaren an, die sich gegenseitig auslöschen: Blau lässt keinen Übergang in Gelb zu (jedoch in Rot und Grün) und Rot nicht in Grün (jedoch in Gelb und Blau). Um auch die Helligkeit zu berücksichtigen stellte er Schwarz und Weiß als drittes Paar gegenüber. Auf Hering geht also die Verschaltung der Farbsignale im zentralen Nervensystem zurück, in welchem sogenannte Gegenfarbneurone entstehen[24].

Albert Henry Munsell (1858-1918) definierte Farben in seinem Farbordnungssystem wie bereits Helmholtz mit Helligkeit („value“), Sättigung („chroma“) und Farbton („hue“), um eine Farbharmonie und -ordnung zu erreichen. In seinem Farbenatlas „Book of Color“ veröffentlichte er seine eigene Vorstellung von einem Farbkreis mit zehn Buntarten (fünf Hauptfarben und einer jeweiligen Zwischenfarbe) und deren Anordnung nach den zuvor genannten Merkmalen [25].

Auch für Wilhelm Ostwald (1853-1932) ging Farbe mit Ordnung und Harmonie einher. Sein Farbkreis besteht aus 24 Farbtönen, die er Vollfarben (enthalten kein Schwarz und Weiß) nannte. Aus diesem Kreis wächst nach oben und unten in Richtung Schwarz und Weiß sein Doppelkegel, in der Mitte befindet sich die Grauachse. Jede Farbe bildet dabei mit Schwarz und Weiß ein „farbtongleiches“ Dreieck, welches die Abweichungen des Bunttons enthält. Jede Farbnuance lässt sich laut Ostwald mit den Parametern Farbgehalt (v), Schwarzgehalt (s) und Weißgehalt (w) berechnen: $v + s + w = 1$ [25].

2.2.2 Was ist Farbe?

Farbe ist keine physikalische Größe. Sie ähnelt von ihrer Art dem Geruch oder Geschmack. Licht selbst enthält keine Farbe, erst die Verarbeitung der Nervenimpulse des visuellen Systems im Hirn erzeugt den Eindruck Farbe. Sie lässt sich folglich empfinden. Dank dieser Empfindung ist es uns möglich, Objekte mit ähnlicher Oberflächenbeschaffenheit schnell voneinander zu unterscheiden [26].

Drei Voraussetzungen gilt es zu erfüllen, um Farbe sehen zu können:

- Licht,
- ein Objekt
- ein menschlicher Betrachter mit intaktem Sehvermögen [22].

Licht ist definiert als der sichtbare Teil des elektromagnetischen Spektrums. Die Wellenlänge des Lichts, sprich des vom Auge wahrgenommenen Anteils elektromagnetischer Strahlung liegt zwischen 380 und 750nm [27]. Je nach Objekteigenschaft wird Licht unterschiedlicher Wellenlängen verschieden stark aufgenommen (absorbiert), zurückgeworfen (reflektiert) oder durchgelassen (transmittiert) [24]. Werden Teile des Lichts absorbiert und reflektiert, wird der Gegenstand als opak oder auch undurchsichtig bezeichnet. Bei Absorption und Transmission spricht man von Transparenz. Werden Anteile der Wellenlängen absorbiert, reflektiert und transmittiert ist die Rede von transluzenten Objekten. Die verschiedenen Intensitäten der Wellenlängen werden von lichtempfindlichen Sinneszellen der Retina (Zapfen und Stäbchen; siehe 2.1.1) wahrgenommen und hinterlassen im ZNS über Reizweiterleitung einen Farbeindruck [8]. Bei ähnlichen Intensitäten aller Wellenlängen erscheint das Licht weiß [28].

Somit beruht das Farbsehen auf physikalischen Vorgängen und der subjektiven Sinneswahrnehmung des Betrachters, da das Licht an sich „farblos“ ist [20]. Beeinflussbar ist der gesamte Prozess durch Stoffeigenschaften des Objekts und dessen Reflektanz, Beleuchtungsintensität und Anatomie des Betrachters. Objekt- oder Körperfarben ändern sich bei unterschiedlichen Lichtverhältnissen: Tages-, Dämmerungs- oder künstliches Licht rufen jeweils andere Farbempfindungen hervor [28].

Additive Farbmischung

Bei diesem auch als physiologische Farbmischung bekannten Prinzip handelt es sich um neue Farbestellungen durch Mischen der Grundfarben Rot, Grün und Blau. Dabei addieren sich die Intensitäten der Lichtfarben. Im Gehirn werden die Farbreize, die auf die Zapfen treffen als Signale neural weitergegeben und addiert. Treffen also zwei farbige Lichtreize auf die gleiche Stelle der Netzhaut, werden zwei Zapfenarten angeregt und das weitergegebene Signal wird im Gehirn als dritte Farbe interpretiert. Mögliche Farben, die entstehen können sind Gelb (Rot + Grün), Magenta (Rot +

Blau), Cyan (Grün + Blau) und Weiß (Rot + Grün + Blau in entsprechender Helligkeit).

Auch bei Bildschirmen, Fernsehern, in der Lichttechnik und Digitalfotografie werden Farben addiert und gemischt [8][13][29].

Subtraktive Farbmischung

Diese Art der Farbmischung ist ein rein physikalischer Vorgang. Hier geht es nicht um Farben, die durch Licht entstehen, sondern um farbige Erscheinungen von Objekten, auch Körperfarben genannt. Diese Objekte absorbieren oder resorbieren gewisse Wellenlängen, sodass nur ein Teil des Lichtspektrums zurückgeworfen wird. Dabei gilt: je mehr Absorption stattfindet, desto weniger wird reflektiert und umgekehrt. Beispielsweise bei Absorption von kurzwelligen Anteilen eines Lichtstrahls, der auf einen Körper trifft, reflektiert dieser die mittel- und langwelligen Lichtanteile und erscheint Gelb. Und Gegenstände, die stark oder eben auch schwach reflektieren, erscheinen dementsprechend heller oder dunkler.

Die Grundfarben dieses Farbmodells (CYMK) sind Cyan, Gelb (Yellow) und Magenta. Je mehr Grundfarben übereinander gelegt werden, desto höher der Anteil an absorbiertem weißem Licht, bis kein Anteil zur Reflexion mehr vorhanden ist. Somit entsteht schwarz (steht für das „K“ in CYMK).

Verwendung findet die subtraktive Farbmischung z.B. bei Farbdruckern [8][13][29].

2.2.3 Farbräume

Da es sich wie oben bereits erwähnt bei der Farbwahrnehmung um eine subjektive Sinneswahrnehmung handelt und subjektive Empfindungen nicht vergleichbar sind, wurde nach Möglichkeiten gesucht, Farben rein objektiv gegenüberstellen zu können und sie messbar zu machen. Dafür wurde Unabhängigkeit der menschlichen Wahrnehmung, sowie eine eindeutige mathematische Definition für jede Farbe angestrebt [20]. Im Jahr 1905 veröffentlichte Henry Albert Munsell sein Farbsystem, basierend auf messbaren Eigenschaften (Farbton, Farbwert, Farbsättigung) von

Farbe. Die Internationale Beleuchtungskommission (*Commission Internationale de l'Eclairage*) gab 1931 ihre ersten Empfehlungen zur Vereinheitlichung heraus. Sie veröffentlichten ein Normvalenzsystem basierend auf Maxwells Farbdreieck und additiver Farbmischung: durch die Mischung von Rot, Grün und Blau lassen sich alle anderen Farben erzeugen [30],[31]. Seine drei Farbwerte RGB (*tristimulus values*: Rot, Grün, Blau) wurden in x , y , z umgewandelt und können so in Koordinaten dargestellt werden. Dabei ist die Helligkeit auf der y -Achse zu finden, x - und z -Achse stehen für die Farbigkeit. Aus der Normalisierung $x+y+z=1$ ergibt sich ein zweidimensionaler Farbraum (siehe Abb.3) [20]. Von den Spektralfarben am Rand der Normfarbtafel nimmt die jeweilige Farbsättigung zum sogenannten Unbuntpunkt in der Mitte der Abbildung ab.

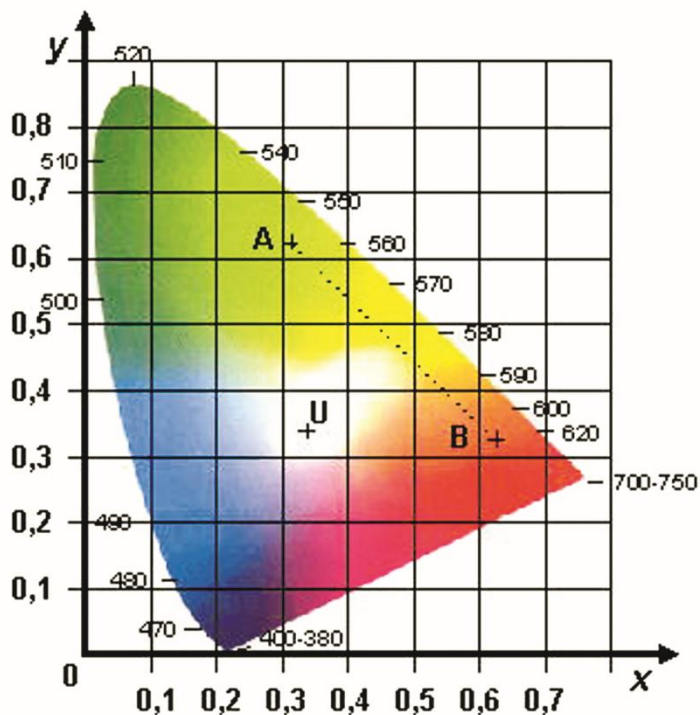


Abbildung 3: CIE-Normvalenzsystem [20]

Da die Werte in diesem System nicht linear verlaufen und Grün beispielsweise überrepräsentiert ist, entspricht der geometrische Abstand zweier Farbborte nicht dem visuellen und kann somit nicht von der Normfarbtafel abgelesen werden [20]. Diese Probleme führten 1976 zur Entwicklung des CIE-L*a*b*-Systems: hier können Farben, sowie Farbabstände exakt im 3D-Raum definiert werden. Die Farbprofile haben internationale Gültigkeit, sodass objektive Einheit in der Industrie herrscht. Der

Abstand zwischen zwei Farben passt sich in diesem Modell der menschlichen Wahrnehmung an und entspricht dem Abstand der Koordinaten der beiden Punkte.

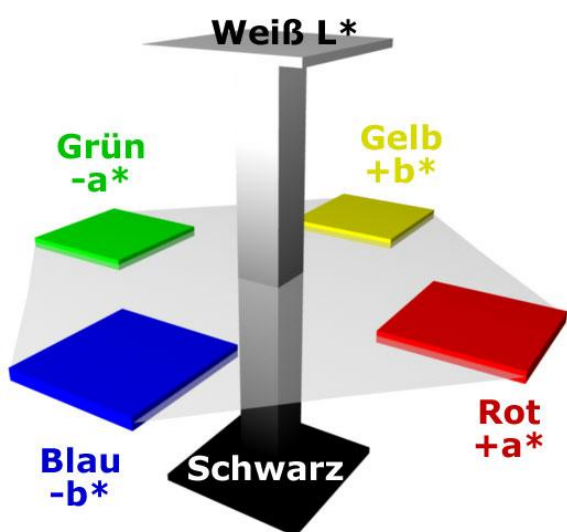


Abbildung 4: CIE L*a*b*-Farbraum in Achsendarstellung [31]

Bestehend aus drei Koordinatenachsen: Helligkeit (L^*), rot-grün (a^*) und gelb-blau (b^*), macht das CIE- $L^*a^*b^*$ -System die genaue Definition (numerisch) einer Farbe möglich. Dabei sind die Normfarbmaßzahlen mathematisch in die Werte L^* , a^* und b^* konvertiert. Die Helligkeit L^* erstreckt sich von schwarz bis weiß (0-100). Auf der Achse a^* korrelieren positive Werte mit Rottönen, negative mit Grüntönen und auf der b^* -Achse liegen negative Werte im blauen und positive im gelben Bereich. Der Unbuntpunkt wird vom Schnittpunkt der a^*b^* -Ebene repräsentiert, darauf steht senkrecht die Helligkeitsachse L^* . Von diesem Punkt nach außen nimmt die Sättigung zu. Die Ebene a^*b^* bildet den Farbkreis mit buntem Rand und zentralem Grau. Im oberen Bereich Richtung Weiß erscheinen die Farben heller, weiter unten Richtung Schwarz dunkler [32].

Der geometrische Abstand zwischen zwei Punkten im $L^*a^*b^*$ -Raum beschreibt den Farbabstand zwischen zwei Farben durch den Vektor ΔE von $L^*a^*b^*$ in Zahlen. Dabei steht das Delta-Zeichen für den Unterschied und E für „Empfindung“. Berechnet wird Delta E mit der Formel:

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

oder

$$\Delta E = \sqrt{(L_1 - L_2)^2 + (a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \quad [33]$$

2.3. Zahnfarbraum

Die Darstellung in Abbildung 5 zeigt den Farbraum mit zunehmender Farbintensität vom Kernmittelpunkt (=0) nach außen. Vom unteren Rand zum oberen nimmt die Helligkeit von dunkel nach hell zu und um die Helligkeitsachse kreisförmig umrandend ist der Farbton dargestellt. Im hellen unbunten bis rotgelben Farbbereich (hier in Form einer Banane dargestellt) wird der Zahnfarbraum mit ca. 100 wahrnehmbaren Zahnfarben repräsentiert [20][34].

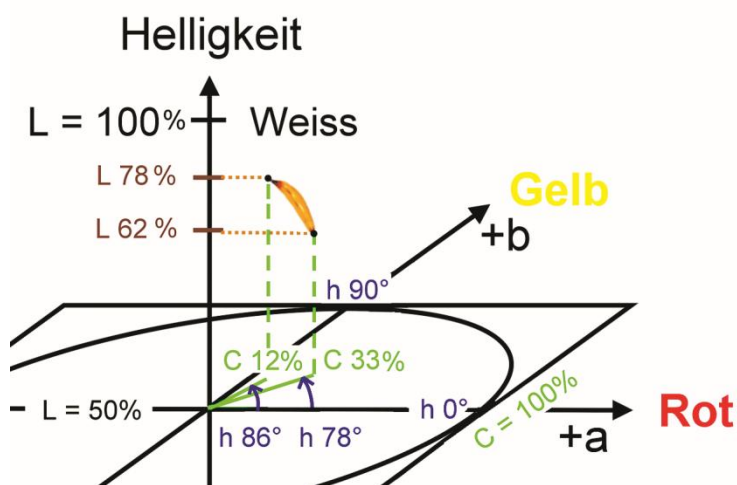


Abbildung 5: Lage des Zahnfarbraumes im L*a*b*-Farbraum [20]

Für die zahnmedizinische Praxis eignet sich die Umwandlung der drei Parameter Helligkeit, Intensität und Farbton vom L*a*b* in den L*C*h°-Farbraum, die dort ebenfalls in einem dreidimensionalen Koordinatensystem eingeordnet werden [35].

Die Koordinate L (engl. lightness) entspricht der Helligkeit und repräsentiert die Höhe der Farbe auf der senkrechten Mittelachse. Der Wert C* (engl. chroma) steht für die Intensität bzw. Farbsättigung und gibt den Abstand der L-Koordinate zum Farbpunkt an. Je weiter die Entfernung zur Helligkeitsachse, desto gesättigter ist die Farbe [34]. Der Farbton wird durch den Winkel h° (engl. hue) angezeigt, der von der +a-Achse des L*a*b* Farbraums und des Farbortes gebildet wird. Der Winkel h° beschreibt folglich die Verschiebung von Rot (+a) in Richtung Gelb (+b). Mit Formeln lassen sich L*a*b*- in L*C*h°-Werte umrechnen:

$$C = \sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{und} \quad \sin(h^\circ) = \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}}$$

Da bei der Zahnfarbbestimmung das Zusammenspiel von Helligkeit, Intensität und Farbort am meisten interessiert, ist es sinnvoller die $L^*C^*h^\circ$ -Koordinaten zu verwenden [20].

Der Zahnfarbraum ist entlang der Helligkeitsachse etwas in die Länge gezogen, weshalb in Abbildung 5 zur Vereinfachung eine Banane dargestellt wurde. Dabei befinden sich die helleren Farbtöne weiter oben und die dunkleren weiter unten bezogen auf die L-Achse. Je gelber die Zahnfarbe, desto näher befindet sich der Farbort Richtung b-Achse (Gelbachse) und umgekehrt: je mehr Rotanteile enthalten sind, desto näher liegt die Zahnfarbe in Richtung a-Achse (Rotachse). Farben, die stärker gesättigt sind, liegen weiter von der L-Achse entfernt und bilden den äußeren Rand der „Banane“ (siehe Abb.5). Die hellste Zahnfarbe ist gering gesättigt und liegt fast auf der Gelbachse. Die dunkleren Farben liegen nicht nur weiter unten auf der Helligkeitsachse, sondern sind auch stärker gesättigt und tendieren näher zur Rotachse hin. Daraus lässt sich ableiten, dass hellere Zähne weniger farbintensiv sind und mehr Gelbanteile aufweisen. Und: je dunkler Zähne sind, desto höher ist die Farbintensität und die enthaltenen Rotanteile [20].

2.4. Zahnfarbe

Trifft Licht auf einen Zahn, hängt es von den Strukturen und unterschiedlichen Hartschichten ab, welche Anteile reflektiert, transmittiert oder absorbiert werden. Somit beeinflussen im Laufe des Lebens veränderliche Faktoren wie Dicke, Struktur und Zusammensetzung der Zahngewebe die natürliche Zahnfarbe [36], die es im Folgenden zu beschreiben gilt:

Die rote Zahnpulpa besteht aus gallertigem Bindegewebe mit vielen kleinen Blutgefäßen, Nervenfasern und Lymphgefäßen und befindet sich in der Pulpenhöhle, die von Zahnhartschichten umgeben ist [37]. Im jungen Alter sind die Pulpenhöcker der Kronenpulpa noch weit ausgedehnt und der Abstand von Zahnoberfläche bis Pulpacavum verglichen zum erwachsenen Zahn gering, sodass die Pulpa rosa durchleuchtet und in der Farbgebung mitwirken kann. Mit zunehmendem Alter vermehrt sich das umgebende Dentin und der Einfluss der Pulpa auf die Zahnfarbe lässt nach [36]. Auch der Abnutzungsgrad nimmt zu, sodass sowohl die Schmelzschicht oberflächlich als auch die Schneidekanten dünner werden und das darunter liegende Dentin vermehrt durchschimmert. Ist die Oberfläche eines Zahnes gänzlich glatt, wirkt der Zahn dunkler, da weniger Licht reflektiert werden kann.

Zusätzlich können Zahntraumata farbliche Veränderungen der Pulpa hervorrufen: so kann es durch Abbauprodukte pulpalen Gewebes (z.B. bei Pulpanekrose) zu einer Graufärbung kommen. Eine Gelbfärbung kann nach Dislokation des Zahnes mit anschließender Obliteration des Wurzelkanalsystems (pulpale Zellen bilden auf Reiz hin Hartgewebe) auftreten [38].

Dentin macht den größten Anteil einer Zahnkrone aus und ist maßgeblich an der Farbgebung, insbesondere an der Intensität bzw. dem Sättigungsgrad eines Zahnes beteiligt [35]. Chemisch gesehen besteht Dentin zu 70% aus anorganischen Bestandteilen wie Phosphat und Calcium, zu 20% aus organischen Bestandteilen wie Kollagen und zu 10% aus Wasser. Von der Pulpa ausgehend verlaufen im Kronenbereich s-förmige Dentinkanälchen, in denen die Fortsätze der dentinbildenden Zellen liegen. Die Zellkörper der sogenannten Odontoblasten befinden sich in der äußeren Schicht der Pulpa und bilden zeitlebens neues Dentin in

Richtung Pulpa, sodass die Pulpenhöhle kleiner wird. Die Dichte der Kanäle nimmt von der Pulpa nach außen hin ab. Weiterhin kann zwischen Dentinschichten unterschieden werden: Prädentin liegt direkt am Pulpencavum, worauf mineralisiertes Zwischendentin und weniger mineralisiertes Manteldentin folgen. Die Dentinkanälchen selbst sind von peritubulärem Dentin umgeben, welches am stärksten mineralisiert ist. Zwischen den Kanälchen befindet sich intertubuläres Dentin, das zur Hälfte aus Kollagen besteht [39]. Die genannten Strukturen sind für eine selektive Streuung der einfallenden Lichtstrahlen und somit für ein opakes Erscheinungsbild verantwortlich [40]. Jugendliche Zähne enthalten viel Primärdentin. Dieses sorgt für eine niedrige Farbsättigung. Mit zunehmendem Alter steigt der Anteil an Sekundär- und Tertiärdentin (kleineres Pulpenkavum, äußere Einflüsse), sodass auch der Farbton gesättigter erscheint [41]. Weiterhin weisen junge Zähne eine starke Reflexion des Dentinkerns in die Schneidekante (Haloefekt), sowie ausgeprägte Mammelone auf: die Ausläufer des Dentinkerns in die inzisale Schmelzschicht hinein. Die mittleren Inzisivi enthalten meist drei, die seitlichen zwei und die Eckzähne eines solcher Ausläufer. Abrasionen sorgen für freigelegtes Dentin und das Verschwinden der Mammelone [42].

Die oberste Zahnschicht besteht aus Schmelz, der sich aus über 90 Prozent anorganischen Bestandteilen, bis zu 4 Prozent organischen Anteilen und Wasser zusammensetzt. Wasser liegt kristallin und an organische Bestandteile wie Proteine und Lipide gebunden vor. Der meiste anorganische Anteil wird von Calcium und Phosphor gebildet, die als Apatitverbindungen in Form kleiner Kristalle vorliegen. Etwa 100 Kristalle bilden ein Schmelzprisma. Die gesamten Prismen erstrecken sich von der Schmelz-Dentin-Grenze bis zur Schmelzoberfläche in horizontaler und vertikaler Richtung wellenförmig. Durch diesen Verlauf werden die Schmelzprismen bei licht- und polarisationsoptischen Bildern quer und längs zur Verlaufsrichtung angetroffen. So entsteht eine charakteristische Streifung, auch Hunter-Schreger-Streifung genannt. Die quer angetroffenen Prismen erscheinen dunkel und werden Diazonien genannt, die parallel zur Verlaufsrichtung erscheinen hell und werden als Parazonien bezeichnet. Die sogenannten Retzius-Streifen sind vergleichbar mit Wachstumslinien, sie entstehen durch periodisches Verkalken des Schmelzes während der Bildung und verlaufen schräg von der Schmelz-Dentin-Grenze zur Zahnoberfläche [37][39].

Die geschichteten Kristallprismen des Schmelzes wirken als Leiter für auftreffende Lichtstrahlen: 70 Prozent des Lichtes gelangen durch 1mm Schmelz. Dabei werden kurze Wellenlängen stärker gebrochen und können nicht vollständig aus dem optisch dichten Schmelz austreten. Diese hohe Transluzenz erklärt, warum das Dentin maßgeblich an der Farbgebung eines Zahnes beteiligt ist. Wie intensiv die Dentinfarbe beeinflusst, hängt von der Schmelzdicke, sowie dem Mineralisationsgrad ab. Durch den niedrigeren anorganischen Anteil im Dentin, nimmt dessen Transluzenz ab und Opazität zu [43]. Somit bestimmt der Zahnschmelz die Helligkeit und die Zusammensetzung des Dentins Sättigung und Farbton der natürlichen Zahnfarbe [44].

Auch physikalischer Aufbau und Eigenschaften wie Transluzenz, Transparenz und Opazität sind entscheidend. Bei voller Lichtdurchlässigkeit und nur geringer Absorption ist der Zahn oder Teile davon transparent. Von opak oder lichtundurchlässig ist hingegen die Rede, wenn es zu keiner Transmission des Lichts kommt. Transluzenz bedeutet Lichtdurchlässigkeit, aber Undurchsichtigkeit des Objekts, da die Strahlung diffus abgelenkt wird. Sie variiert je nach Einfallswinkel und Wellenlänge des einfallenden Lichtes, der Oberflächenstruktur und dem Wassergehalt des Zahnes [45]. Der Übergang dieser drei Eigenschaften ist fließend [46]. Jungliches Dentin ist sehr opak. Im Laufe des Lebens werden Zähne wie oben beschrieben dunkler: die Transparenz nimmt ab, die Opazität nimmt zu. Bestimmt werden diese Eigenschaften von der Schichtstärke [42] [47]. Werden kurze Wellenlängen von einem Objekt absorbiert und entstehen dadurch höhere Wellenlängen ist die Rede von Fluoreszenz. Aufgrund des höheren organischen Anteils im Dentin, tritt vor allem dort das zuvor beschriebene Phänomen auf, weniger als in der Schmelzschicht [48].

Die Oberflächenbeschaffenheit von Zähnen (je unregelmäßiger die Oberfläche, desto höher die Reflektion und desto heller erscheint ein Zahn), Grad der Abnutzung der Zähne, das Alter des Patienten (s.o.), Ess- und Mundhygienegewohnheiten, sowie Einnahme spezieller Medikamente (z.B. Tetracyclin) können als weitere farbbeeinflussende Faktoren genannt werden [36][42][49].

2.5. Zahnfarbenbestimmung

Die gängigsten Methoden der Farbbestimmung in der Zahnheilkunde sollen im Folgenden beschrieben werden:

2.5.1. Manuelle Zahnfarbenbestimmung

Um die Zahnfarbe eines Patienten zu bestimmen, werden bei dieser Methode vorgegebene Farbmuster zum Vergleich herangezogen. „Manuell“ bezieht sich auf standardisierte Farbschlüssel, welche mit der eigentlichen Zahnfarbe in vivo visuell verglichen werden. Dabei wird einer der Musterzähne des Farbschlüssels an den zu analysierenden Zahn gehalten und dient lediglich dem Vergleich. Die beste Übereinstimmung wird anschließend einem Dentallabor übermittelt. Übertragungsfehler können minimiert werden, wenn der Zahntechniker die Farbermittlung und Umsetzung im Labor übernimmt [34][50].

Unter Beachtung gewisser Grundsätze kann eine präzisere Farbangleichung erzielt werden: Eine farbneutrale Umgebung mit unauffälliger Farbgestaltung reduziert hierbei die Beeinflussung des Auges. Dies impliziert nicht nur Mobiliar, sondern auch Kosmetika, Kleidung etc. [34][50]. Die Lichtverhältnisse können den Farbeindruck verzerren. Da Halogenstrahler einen hohen Rotlichtanteil haben, ist es sinnvoll Leuchtstoffröhren mit Tageslichtqualität oder besser indirekte Sonneneinstrahlung, sprich Tageslicht zu nutzen [34][51].

Empfehlenswert für die Positionierung ist, dass der Patient gerade vor dem Beobachter in einem Abstand von 50-70cm steht und die Zahnfarbe am gereinigten und angefeuchteten Zahn innerhalb von 5 Sekunden bestimmt, um Ermüdungserscheinungen der Augen vorzubeugen. Die beiden Schneidekanten von Farbmuster und Zahn können sich dabei berühren [51]. Optimaler Weise werden erst Helligkeit, Farbsättigung und abschließend die Zahnfarbe bestimmt [34][53].

Die oben erwähnten Zahnfarbenmuster gibt es in vielen Varianten von unterschiedlichen Firmen wie Ivoclar Vivadent (SR Phonares®, Vivodent® oder Chromascop® Farbschlüsseln) VITA (classical® oder- 3D Master®) oder Dentsply (Genios®-Farbring).

Die gebräuchlichsten Farbsysteme sind das VITA classical® (siehe Abb.6), das VITA System 3D-Master® (VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland) sowie das Chromascop® (Ivoclar Vivadent, Amherst/NY) [54][55].



Abbildung 6: VITAPAN classical Farbskala [55]

Die Farben sind nach Gruppen sortiert: A1-A4 stehen für rötlich-bräunliche Farbtöne, B1-B4 für rötlich-gelbliche, C1-C4 für Grautöne und D2-D4 für rötlich-graue [56]. Dabei geben die Zahlen 1-4 Informationen über Sättigung und Helligkeit in einer Farbtongruppe: mit zunehmender Zahl steigt die Sättigung und nimmt die Helligkeit ab.

Mit dem sogenannten „Toothguide 3D-Master“ (siehe Abb.7) hat die Firma VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG eine Farbskala entwickelt, die „systematisch natürliche Zahnfarben bestimmt und vollständig reproduziert“ [54][55].



Abbildung 7: VITA Toothguide 3D Master [55]

Abbildung 8 zeigt den Vorgang der Zahnfarbenbestimmung mit dem genannten System: zunächst soll die Helligkeit von dunkel nach hell in den Stufen 1-5 ausgewählt werden. Aus der gewählten Helligkeitsstufe wird dann die passende Farbintensität des mittleren Farbtons (M) gesucht, die von oben nach unten zunimmt (1 -> 3 = blass -> satt). Dafür lassen sich die Farbmuster herausnehmen und seitlich aufklappen. Erst zum Schluss wird der Farbton festgelegt, sprich ob der natürliche Zahn gelblicher (L) oder rötlicher (R) ist. Daraus gibt sich eine Nomenklatur aus drei Werten: 1M1-5M3 (entsprechend auch für die Farbtöne L und R). Mit der Helligkeitsbestimmung zu beginnen widerspricht zwar der menschlichen Intuition, jedoch werden dadurch Fehler minimiert. Denn die Helligkeit im Zahnfarbraum bietet die größte Spannweite an Möglichkeiten [34][57].

Auch Zwischenfarben lassen sich bestimmen.

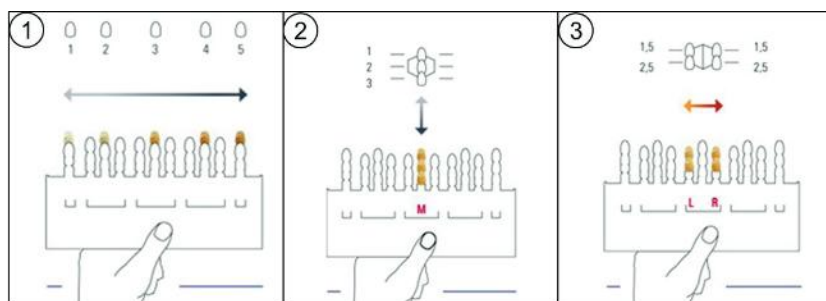


Abbildung 8: Zahnfarbenbestimmung mit dem VITA 3D-Master (modifiziert nach VITA 2011) [58]

2.5.2. Digitale Zahnfarbenbestimmung

Im Vergleich zu der oben beschriebenen Farbbestimmung verspricht der instrumentelle Vorgang eine Objektivierung des Prozesses. Bei diesem Verfahren zur Bestimmung der Farbe eines natürlichen Zahnes findet die Messung unabhängig der menschlichen Wahrnehmung statt. Ein Farbmessgerät zeigt digital die gemessene Zahnfarbe in der Nomenklatur einer der verschiedenen Farbskalen an. Beleuchtung und Umgebung nehmen dabei keinen Einfluss auf die Farbmessung [46][52][59][60].

In beiden im Folgenden vorgestellten Messgeräten wird das von einer Quelle im Gerät ausgestrahlte Licht vom Messobjekt remittiert (zurückgeworfen) und von einem Sensor erfasst. Die errechneten bzw. mit Referenzwerten verglichenen Farbmaßzahlen werden in $L^*a^*b^*$ - bzw. $L^*C^*h^\circ$ -Werten nach CIE-Norm angegeben. Die genaue Bestimmung der Grundfarbe eines Zahnes kann so zuverlässig bestimmt werden [60][61][62][63].

Kolorimeter

Die kolorimetrische Messmethode kommt der visuellen Farbbestimmung sehr nahe [60]: mit Hilfe optischer Filter wird das vom Objekt zurückgestrahlte Licht in seine Rot-, Grün- und Blau-Anteile zerlegt, daher auch der Name Dreibereichsmessgerät (siehe Abb.9). Die Filter entsprechen den menschlichen Zapfen der Retina. Dabei wird die Intensität des reflektierten Lichts der durchdringenden Wellenlängen bestimmt und jeder Farbe ein entsprechender Wert im RGB-Farbraum zugeordnet.[61][62].

Nachteile der dentalen Kolorimeter liegen in der Abhängigkeit von Farbfiltern (exakte Feinjustierung gestaltet sich schwierig), sowie dem Unvermögen der exakten Übertragung auf den LCH-Farbraum [63].

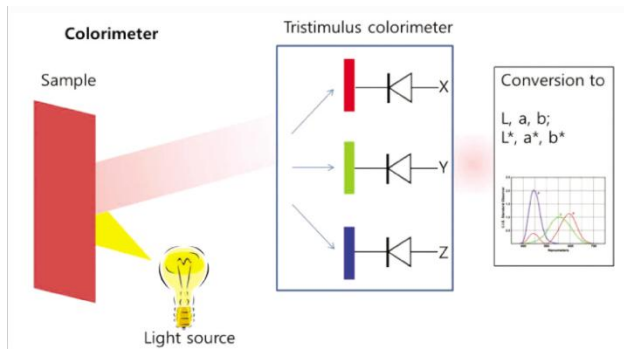


Abbildung 9: Aufbau eines dentalen Kolorimeters [64]

Spektralphotometer

Die präzisesten und genauesten Ergebnisse liefert die Spektralphotometrie [61]. Ein Spektralphotometer enthält eine eigene Lichtquelle, die das zu vermessende Objekt anstrahlt (siehe Abb.10). Wie im Kolorimeter erfasst ein integrierter Sensor das reflektierte Licht und zerlegt es im sichtbaren Bereich (380-700nm) in kleine Messkanäle. Die ausgestrahlte und reflektierte Lichtmenge wird von einem Photoelement ermittelt und im Verhältnis ausgewertet. Die Farbwerte werden durch Multiplikation der Messwerte eines jeden Messkanals mit dem Standardwert errechnet. Anhand der Remissionswerte werden Remissionskurven erstellt, die einen farblichen Fingerabdruck darstellen [63][65].

Polychromatisches Licht wird also im Spektralphotometer durch ein Prisma in monochromatisches zerlegt. Ein Unterschied zum Kolorimeter, wie in der Abbildung zum Aufbau eines Spektralphotometers (siehe Abb.10) ersichtlich [63].

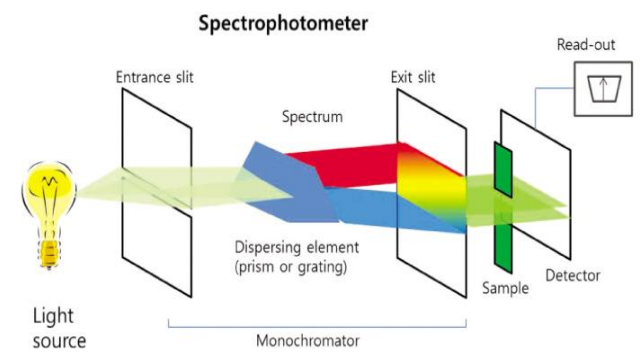


Abbildung 10: Aufbau eines dentalen Spektralphotometers [64]

2.6. Reproduktion von Zahnfarbe

Die Reproduktion von Zahnfarbe ist ein komplexer, fehlersensitiver Vorgang [66]. Wie exakt eine Zahnfarbe im künstlichen Zahnersatz umgesetzt werden kann, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab, die unabhängig der Handhabung von Farbschlüsseln bzw. Farbbestimmungsgeräten oder dem unterschiedlichen Material von Farbschlüssel und Zahn sind. Es gibt individuelle Unterschiede in der Farbwahrnehmung, die wiederum beeinflusst werden können durch Erfahrung, Gesundheit, Ernährung und Alter des Betrachters, eingenommene Medikamente, Emotionen, Dauer der Farbbestimmung, Lichtverhältnisse und Umgebungskontraste [67].

Wie bereits in Kapitel 2.1.3 erwähnt, leiden ca. 8 Prozent der Männer und 0,8 Prozent der Frauen an Rot-Grüschwäche. Des Weiteren färben sich Kornea und Linse gelblich im Alter, klinisch relevant ab dem 60. Lebensjahr. Die Unterscheidung zwischen Gelb und Weiß ist zunehmend erschwert. Durch zusätzliche Eintrübung der Linse kann weniger Helligkeit in das Auge eindringen und das Sehvermögen nimmt ab [67][68].

Eine Ermüdung der Augen, in der Fachsprache als halonierte Augen bezeichnet, tritt häufig auf bei Stress, Schlafmangel, Reizüberflutung oder hohen Sehanforderungen über einen längeren Zeitraum und kann eine Veränderung in der Farbsensibilität hervorrufen. Empfohlen werden das Einlegen von Pausen und der Blick in die Ferne zum Ausgleich [6][42][50].

Neben Zink (Spurenelement), Lutein (gelber Pflanzenstoff) und Decosahexansäure (Omega-3-Fettsäure), ist Vitamin A als klassisches Augenvitamin zu nennen. Die genannten Nährstoffe gelten als Schutzstoffe für die Aufrechterhaltung der Sehkraft und Funktionstüchtigkeit des Auges. Vitamin A im Speziellen sorgt für den Schutz vor Infektionen und Kontrastsehen im Dunkeln. Besondere Beanspruchung der Augen wie oben bereits erwähnt, kann mit einem erhöhten Vitamin A-Bedarf einhergehen. Zu wenig Vitamin A kann zu Xerophthalmie (Augentrockenheit) führen, sodass sich kleine unregelmäßige Beläge auf Binde- und Hornhaut bilden [69].

Gängige Medikamente können das Farbsehen verändern: Digitalis, ein Herzmedikament, das bei Herzinsuffizienz angewendet wird, beeinflusst das Gelb- und Blausehen beispielsweise. Viagra, ein Potenzmittel lässt die Umgebung bläulich erscheinen. Orale Kontrazeptiva erschweren die Unterscheidung zwischen Rot-Grün und Gelb-Blau [70].

Nikotin hat Auswirkungen auf das Rotsehen und selbstgebrannte Spirituosen, die noch Methylalkohol enthalten können zur Erblindung führen. Auch langfristiger Vitamin-B-Mangel führt zu Sehnervschäden [70]. Emotionen können ebenfalls Auswirkungen auf das Sehvermögen haben: dank der muskulären Verbindung zu Sympathikus und Parasympathikus findet eine Beeinflussung der Pupillenweite und damit auf die einfallende Lichtintensität bei unterschiedlichen Gefühlen statt [71].

Dass das Umgebungslicht eine große Rolle bei der Farbbestimmung spielt, belegt eine Studie von Culpepper aus dem Jahre 1970 zur Zahnfarbbestimmung unter verschiedenen Lichtverhältnissen: 37 Zahnärzte/innen haben in diesem Rahmen die Zahnfarbe von sechs natürlichen Zähnen bei unterschiedlichem Licht bestimmt und es gab keine Übereinstimmung [72].

3. Material und Methode

3.1. Material

3.1.1. Geräte

Behandlungseinheit Siemens M1
mit Sprayvit

Siemens Sirona,
Bensheim, Deutschland

Vita Easyshade V mit Kalibrierblock
und Ladestation

VITA Zahnfabrik
H. Rauter GmbH & Co. KG,
Bad Säckingen, Deutschland

Das Farbmessgerät VITA Easyshade V aus dem Jahre 2015 der Firma VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG (siehe Abb.11) besteht aus einer Ladestation, einem Handstück, einem USB Bluetooth Modul zur Übertragung der gemessenen Daten auf einen PC und einem Netzteil. Die zugehörige Software VITA Assist für den Computer wird installiert, sobald das Bluetooth Modul in einen USB Anschluss eines PC' s eingesteckt ist [73].



Abbildung 11: VITA Easyshade V [73]

Das Gerät basiert auf der Technik eines Spektralphotometers und kann Farben im Bereich von 400-700nm erkennen und messen. Optische Filter analysieren dabei welche Anteile der Lichtwellen, die auf den Zahn treffen transmittiert (durchgelassen), welche reflektiert (an der Oberfläche abgeleitet) und welche absorbiert (aufgenommen) werden. Diese sogenannten Remissionswerte geben

Informationen über den genauen Farbort der Farbe, sowie Farbabweichungen, indem mit einem Weißabgleich verglichen wird. Somit entsteht ein farblicher Fingerabdruck. Der Weißabgleich erfolgt zu Beginn einer jeden Messung als Kalibrierung. Für die Farbbestimmung gibt es die Modi Grundfarb-, Mittelungsfarb-, Zahnbereichsfarbbestimmung, Bestimmung der Farbe der keramischen Restauration, sowie Bestimmung der Farbe einer Krone analog zur Grundfarbbestimmung. Die Ausgabe der Zahnfarben im Grundfarbmodus kann in den 26 VITA System 3D Master -®, 3 Bleached -®, 52 3D-Master® Mischfarben, 16 VITA classical® A1-D4 Farben und VITABLOCS®-Farben erfolgen. Die Zahnbereichsfarbbestimmung kann zervikal, zentral und inzisal vorgenommen werden. Neben den genannten Modi gibt es noch den Trainingsmodus und die Möglichkeit der Speicherung von 30 Messergebnissen [73].

Die VITA classical® A1-D4 Farben und die VITA System 3D Master® Farben können detaillierter dargestellt werden. Dabei werden für die VITA classical® Farben die Abstände der gemessenen Zahnfarbe zur nächstgelegenen VITA classical® A1-D4 Farbe im Farbraum in Form von Balken und Zahlen dargestellt. ΔE gibt die Gesamtfarbabweichung an, ΔL ob die gemessene Farbe heller (+) oder dunkler (-) als die nächstgelegene VITA Farbe ist. ΔC steht für die Farbintensität, also ob ein intensiveres (+) oder blässeres (-) Farbergebnis vorliegt und Δh informiert über eine gelblichere (+) oder rötlichere Farbtonabweichung zur VITA Farbe. Die genannten Farbparameter wurden für diese Untersuchung sowohl für die Zahnfarb- als auch die Zahnersatzfarbmessung genutzt. Die Detaildarstellung der 3D- Master® Farben bezieht sich auf den Fall, wenn die gemessene Zahnfarbe zwischen zwei Farben des VITA System 3D-Master® liegt. Somit zeigt das Gerät einen Vorschlag zum Mischen zweier Farben an, um ein exaktes Ergebnis zu erzielen [73].

3.1.2. Instrumente

Grundbesteck (Spiegel, Pinzette, Sonde)

Hu-Friedy Mfg. Co., LLC.

Frankfurt a. M., Deutschland

3.1.3. Verbrauchsmaterial

Schaumstoffpellets

Pluradent AG & Co KG,
Offenbach, Deutschland

VITA Easyshade V Infektionsschutzkappen

VITA Zahnfabrik
H. Rauter GmbH & Co. KG,
Bad Säckingen, Deutschland

3.1.4. Software

SPSS Version 23.0

SPSS GmbH Software,
München, Deutschland

Microsoft Excel 2010

Microsoft Deutschland GmbH,
Unterschleißheim, Deutschland

3.2. Methode

3.2.1. In-vivo Messungen

Für die Untersuchung wurden von 49 Patienten/innen, die in der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik der Universitätsmedizin Mainz mit vollkeramischen Zahnersatz versorgt werden sollten, die Zahnfarbe mit Hilfe des VITA Easyshade V der Firma VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, ermittelt. Unter den Patienten befanden sich 18 Männer und 30 Frauen zwischen 25 und 70 Jahren.

Die Messungen fanden standardisiert am zu präparierenden Zahn statt. Dabei wurde das Messgerät vestibulär am prothetischen Äquator im 90° Winkel des zuvor gereinigten Schmelzes bündig angesetzt, um die Zahngrundfarbe zu bestimmen und Verfälschungen durch dunklere Zahnhäse oder hellere bzw. transluzentere Schneidekanten/ Höckerspitzen zu vermeiden. Die gemessenen Zähne waren an den Messstellen füllungs-, sowie restaurationsfrei.

Im Anschluss daran erfolgte die Anfertigung des Zahnersatzes mittels vollkeramischer Materialien mit den erhobenen klinischen Daten der Zahnfarbe. Vor der definitiven Eingliederung des Zahnersatzes wurde die Zahnfarbe an der gleichen Stelle der neuangefertigten Keramik *in vivo* mit dem oben genannten Gerät vermessen. Fehlfarbmessungen durch verschiedene Einsetzmaterialien wie opaken Zementen/Kunststoffen konnten so ausgeschlossen werden.

Am Ende der Behandlungen wurden sowohl der/die Behandler/in als auch der/die Patient/in nach eigener Zufriedenheit bezüglich der Farbgebung auf einer Skala von 1-10 (wobei 1 für unzufrieden und 10 für überaus zufrieden steht) befragt.

3.2.2. Datenerhebung

Aus der oben genannten Beschreibung ergaben sich zwei Messreihen, wobei insgesamt 98 Messungen erfolgten. Vor jeder Messung wurde das Gerät für einen Weißabgleich in die Ladestation mit der Spitze auf den Kalibrierblock gelegt und der

Messknopf ausgelöst. Erst nach erfolgreicher Kalibrierung in Form eines Signaltones konnte eine Messung durchgeführt werden. Für jeden Patienten wurde eine neue Infektionsschutzkappe, die im Lieferumfang enthalten war, verwendet. Diese befand sich bereits für den Weißabgleich auf der Spitze des Gerätes.

Für die erste Reihe wurde der Modus Grundfarbbestimmung am natürlichen Zahn (siehe Abb.12) gewählt.



Abbildung 12: Anwendungsbeispiel Betriebsmodus Grundfarbbestimmung am natürlichen Zahn [73]

Das Ende der Messung zeigte ein akustisches Signal an. Für die Datenerhebung wurden sowohl die angezeigte VITA classical®-, als auch die VITA System 3D Master®- Farbe notiert. Zusätzlich bezog man die Details der VITA classical® Farbe ein: Delta E (ΔE), Helligkeits- (ΔL), Sättigungs- (ΔC) und Farbtonabweichung (Δh) der gemessenen Farbe zur nächstgelegenen VITA classical® Farbe im Farbraum (siehe Abb.13).

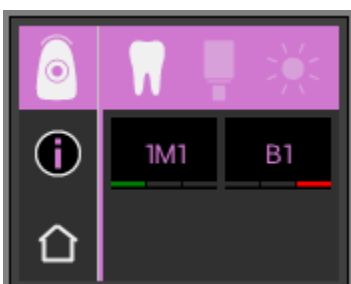


Abbildung 13: Anwendungsbeispiel Farbanzeige der gemessenen Zahnfarbe in der VITA classical ®-, sowie 3D-Master ® Farbkodierung [73]

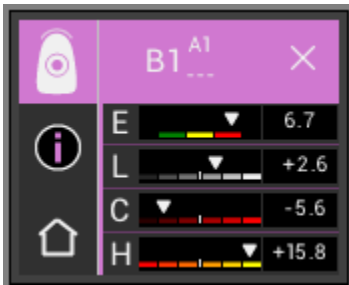


Abbildung 14: Anwendungsbeispiel Detailansicht der VITA classical® Farbe [73]

Die Detailansicht (siehe Abb.14) bot Aufschluss über die Farbabweichungen der gemessenen von der zugehörigen VITA classical® Farbe. ΔE steht für die Gesamtfarbabweichung, ΔL zeigt an, ob der Zahn heller (+) oder dunkler (-) als die VITA classical® Farbe ist, ΔC ob der Zahn intensiver(+) oder blasser (-) und Δh ob der Zahn gelblicher (+) oder rötlicher (-) ist [73]. Zusätzlich wurden alle vier Werte grafisch in einer Farbskala dargestellt, wobei der Mittelpunkt die jeweilige Ausgangsfarbe anzeigt.



Abbildung 15: Anwendungsbeispiel Betriebsmodus "Bestimmung der Farbe einer Krone" [73]

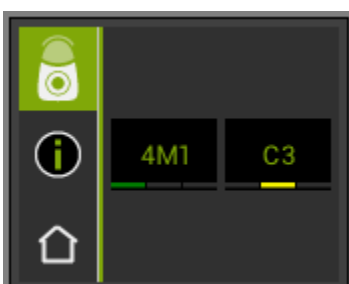


Abbildung 16: Anwendungsbeispiel Farbanzeige der gemessenen Kronenfarbe in der VITA classical-, sowie 3D-Master Farbkodierung [73]

Für die zweite Messreihe befand sich das VE-V im Betriebsmodus „Bestimmung der Farbe einer Krone“ und erfolgte analog zur ersten Messreihe (siehe Abb.15 und 16). Auch hier wurden Farbwerte, sowie ΔL , ΔC und Δh notiert.

Um anschließend die gemessenen Werte von vor und nach Anfertigung der Restauration miteinander vergleichen zu können, wurden die Werte C^* , L^* und h° mit Hilfe von folgenden Formeln umgerechnet:

$$a = C + \cos(h^\circ) \quad b = C * \sin(h^\circ)$$

Mit den erhaltenen Werten a^* und b^* konnte ΔE , sprich der Abstand der gemessenen Zahn- von der gemessenen Zahnersatzfarbe im Farbraum errechnet werden:

$$\Delta E = \sqrt{(L(ZE) - L(Z))^2 + (a(ZE) - a(Z))^2 + (b(ZE) - b(Z))^2}$$

3.3. Versuchsauswertung

Die statistische Auswertung der Messwerte erfolgte mit den Programmen SPSS 23 und Excel. Dafür wurden Tabellen erstellt und anschließend graphisch in Form von Balkendiagrammen, Box-Whisker-Plots oder Streudiagrammen dargestellt. Berechnet wurden Mittelwerte, Standardabweichung und Minimal- und Maximalwerte der Patienten-, sowie Zahnarztzufriedenheit. Folgende statistische Tests wurden angewendet, für die ein Signifikanzniveau von 5% festgelegt wird: Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben, Einstichproben-Signifikanztest, Shapiro-Wilk-Test, Korrelationsanalyse mit Korrelationskoeffizient nach Spearman und Mann-Whitney-U-Test.

Es wurden folgende Nullhypothesen generiert:

1. Das getestete Gerät Easyshade V der Firma VITA wirkt nicht unterstützend für die Farbproduktion im Herstellungsprozess keramischen Zahnersatzes.
2. Die Zufriedenheitswerte lassen weder Rückschlüsse auf die gemessene Farbabweichung des Zahnersatzes zur VITA classical® Farbe, noch auf die errechnete Farbabweichung der Zahn- zur Zahnersatzfarbe zu.

4. Ergebnisse

4.1. Vergleich der Häufigkeitsverteilung der Zufriedenheit von Zahnärzten und Patienten bei Verwendung einer Analogskala von 1-10

Die beiden folgenden Balkendiagramme stellen die prozentuelle Häufigkeitsverteilung der Zufriedenheit von Patienten sowie Zahnärzten dar, wobei die Zufriedenheit auf einer visuellen bzw. verbalen Analogskala von 1 bis 10 erhoben wurde (1=unzufrieden, 10= sehr zufrieden). Für die Patienten ist ersichtlich, dass der Wert 10, d.h. die größtmögliche Zufriedenheit überwiegt. Knapp 80% der Patienten sind mit dem Ergebnis sehr zufrieden, während Werte unter 7 überhaupt nicht vorkommen.

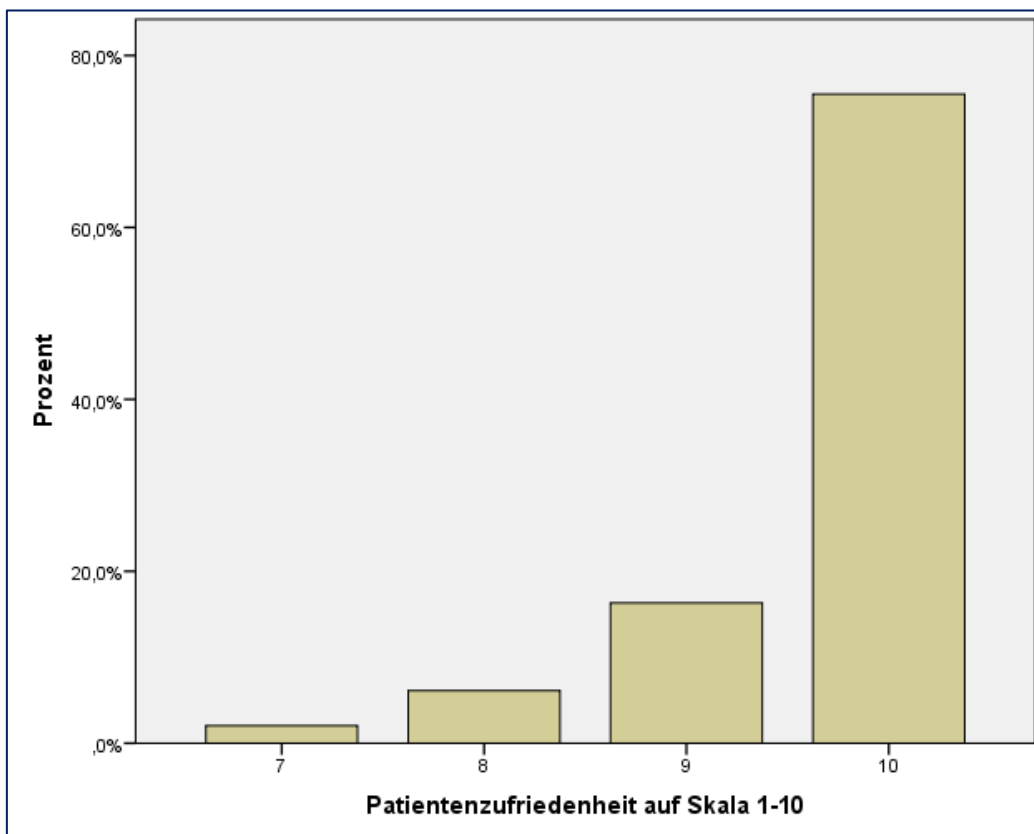


Abbildung 17: Häufigkeit der Patientenzufriedenheit in Prozent

Bei der Zufriedenheit der Zahnärzte zeigt sich, dass der Wert 9 am häufigsten angegeben wurde, jedoch nur mit einem Anteil von ca. 35%. Im Gegensatz zur Patientengruppe wurden auch Werte von 5 und 6 ausgewählt.

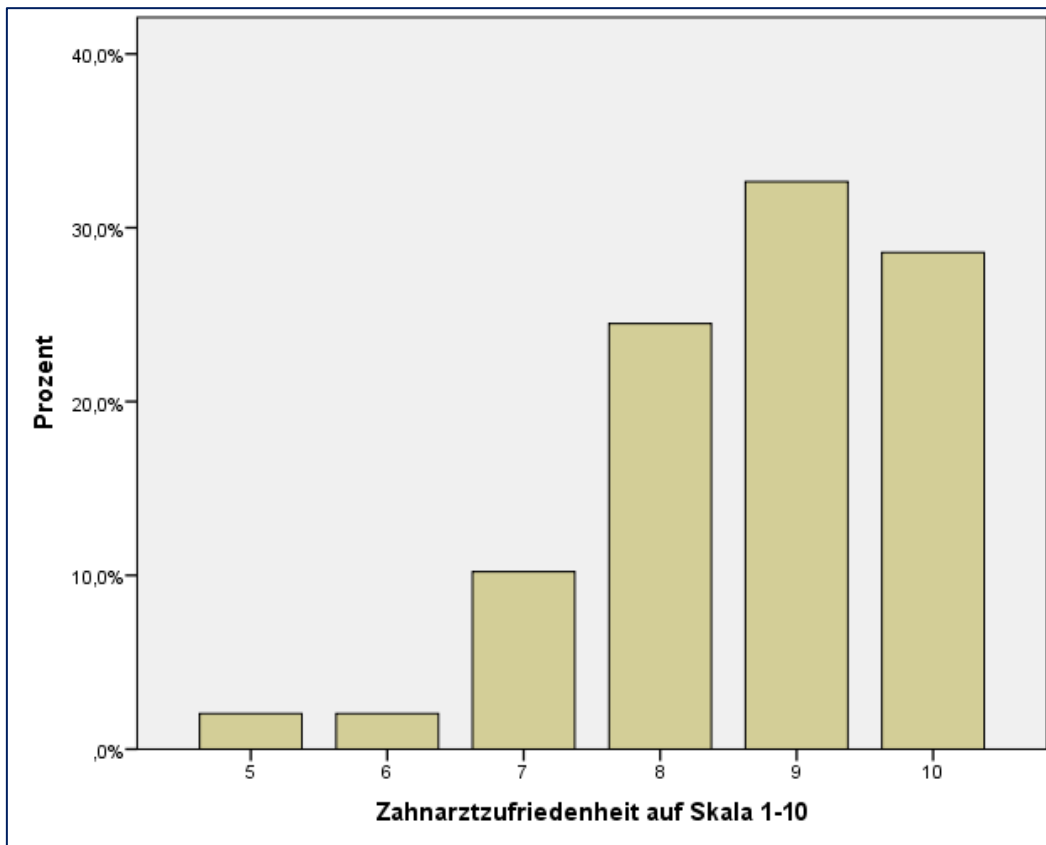


Abbildung 18: Häufigkeit der Zahnarztzufriedenheit in Prozent

Insgesamt sind die Patienten deutlich zufriedener als die Zahnärzte. Im Durchschnitt liegt die Zufriedenheit der Patienten bei $M=9,65$ ($SD=0,69$) und die der Zahnärzte bei $M=8,69$ ($SD=1,18$), womit die Patienten durchschnittlich um ca. einen Punktwert zufriedener sind als die Behandler. Auf zahnärztlicher Seite liegt eine stärkere Variation hinsichtlich ihrer Zufriedenheit vor, da die Standardabweichung bei den Zahnärzten größer ist.

Um zu prüfen, ob sich die durchschnittliche Zufriedenheit von Patienten signifikant von der der Zahnärzte unterscheidet wurde ein Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben angewandt. Da für jedes Farbergebnis eine Meinung von Zahnarzt und Patient erfragt wurde und es sich dabei um verbundene Stichproben handelt, ist dieser Test hier geeignet. Außerdem wie in obigen Histogrammen ersichtlich, sind die Bewertungen nicht normalverteilt.

Der Wilcoxon-Test für verbundene Stichproben ergibt einen p-Wert von $p < 0,001$. Da der p-Wert unter 0,05 liegt, unterscheiden sich beide Gruppen signifikant hinsichtlich der durchschnittlichen Zufriedenheit, bzw. die Patienten sind signifikant

zufriedener als die Zahnärzte. Die folgende Abbildung soll den Unterschied bzgl. der angegebenen Zufriedenheitswerte der beiden befragten Gruppen mittels eines Box-Whisker-Plots verdeutlichen:

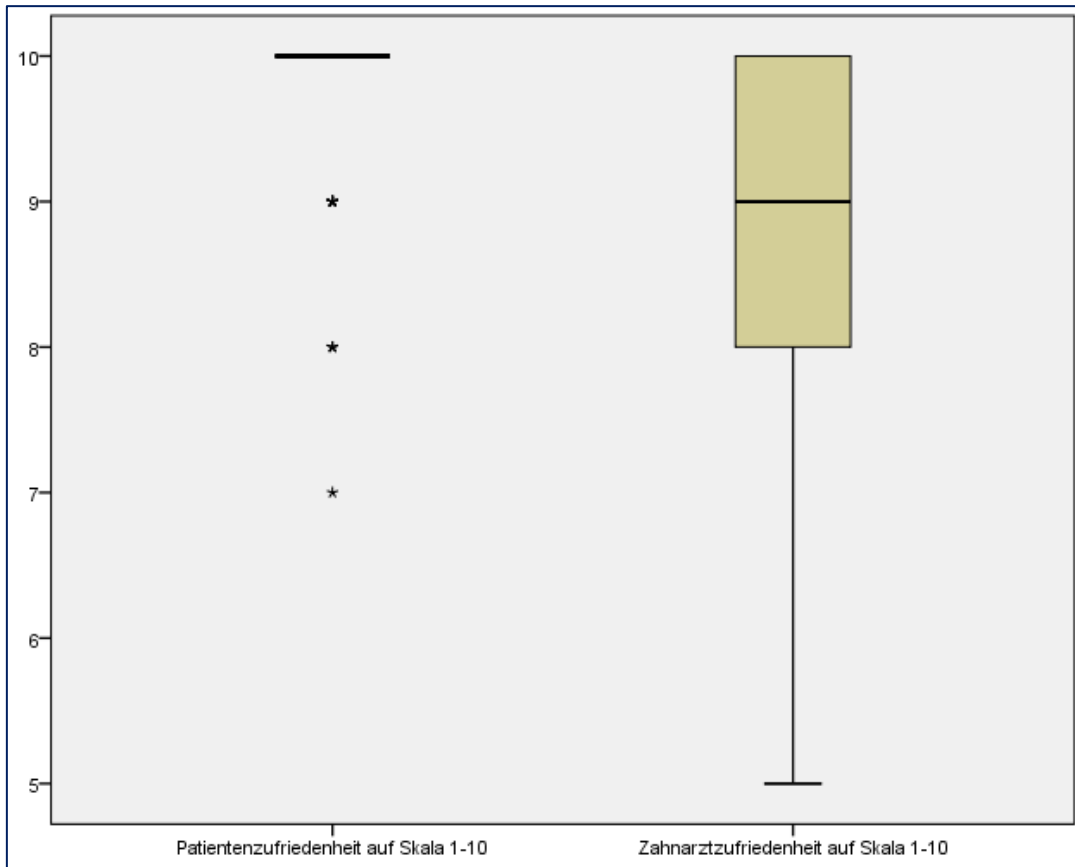


Abbildung 19: Box-Whisker-Plot zu Patienten- und Zahnarztzufriedenheit auf einer Skala von 1-10

Die Häufigkeit der sehr zufriedenen Patienten mit dem Wert 10 spiegelt sich im Median und beiden Quartilen wider, die ebenfalls bei 10 liegen. Die Box der Patientengruppe besteht hier also nur aus einem Strich im Gegensatz zur Behandlergruppe deren Box deutlich dargestellt ist.

4.2. Ergebnisse der Signifikanztestung der einzelnen gemessenen Farbabweichungsvariablen sowie im Speziellen dreier binärer Variablen

Weiterhin sind in folgender Tabelle die Mittelwerte, Standard sowie Minimum und Maximum aller vom VE-V angezeigten und von uns errechneten Farbabweichungsvariablen zur im Farbraum jeweilig nächstliegenden VITA classical Farbe dargestellt. Für jede Abweichungsvariable wurde ein Einstichproben-Signifikanztest durchgeführt um zu prüfen, ob die durchschnittliche Abweichung signifikant von Null abweicht. Hierzu wurde jede Variable zunächst mittels des Shapiro-Wilk-Tests auf Normalverteilung geprüft, der p-Wert dieses Tests ist in der Spalte „p NV“ dargestellt. Alle p-Werte über 0,05 zeigen eine Normalverteilung an, für die daraufhin ein Einstichproben-t-Test angewandt wurde, um die Signifikanz zu testen. Für p-Werte unter 0,05 wurde der Wilcoxon-Test angewendet, weil keine Normalverteilung vorlag.

Tabelle 1: Mittelwerte und Signifikanztestung für alle Farbabweichungsvariablen

Variable	M	SD	Min	Max	p NV	p t	p M
ΔL Helligkeit Zahn	0,87	3,58	-5,00	11,20	0,251	0,095	0,138
ΔC Sättigung Zahn	1,65	3,20	-6,60	9,30	0,134	0,001	0,001
Δh Farbton Zahn	-0,36	2,22	-6,10	7,80	0,002	0,265	0,069
ΔL Helligkeit ZE	-0,22	1,74	-5,60	2,40	0,046	0,375	0,571
ΔC Sättigung ZE	-0,30	2,17	-4,80	4,40	0,457	0,332	0,349
Δh Farbton ZE	-0,55	2,41	-8,10	5,10	0,045	0,117	0,191
Δa RG-Anteil Zahn	0,13	2,45	-8,01	5,57	<0,001	0,709	0,291
Δb BG-Anteil Zahn	-0,57	2,57	-8,96	5,74	0,001	0,126	0,334
Δa RG-Anteil ZE	-0,52	1,62	-3,04	4,52	0,037	0,030	0,018
Δb BG-Anteil ZE	0,25	1,36	-4,05	3,70	0,026	0,207	0,193
ΔE Zahn zu ZE errechnet	2,78	2,70	-0,78	12,18	0,018	<0,001	<0,001
ΔE ZE zu VITA gemessen	2,47	1,35	0,20	2,00	0,089	<0,001	<0,001

In Tabelle 1 ist Folgendes ersichtlich:

Für die Variablen ΔC Farbintensität Zahn, Δa Rot-Grün-Anteil Zahnersatz, errechnete Farbabweichung von gemessener Zahn- und Zahnersatz-Farbe (ΔE errechnet), sowie gemessene Gesamtfarbabweichung des Zahnersatzes von der VITA classical® Farbe (ΔE Zahnersatz zu VITA) liegt im Durchschnitt eine signifikante Abweichung vor.

Weiterhin sind die drei binären Variablen „gemessener Farbwertunterschied Zahn zu Zahnersatz“, „errechnete Farbabweichung ΔE des Zahnes zum Zahnersatz“, sowie die „Gesamtfarbabweichung ΔE des Zahnersatzes“ von Interesse. Für diese Variablen ist in nachfolgender Tabelle jeweils die absolute und prozentuelle Häufigkeitsverteilung dargestellt. Zusätzlich wurde für jede der Variablen ein Chi-Quadrat-Anpassungstest durchgeführt. Dieser soll eine signifikante Abweichung der prozentuellen Verteilung der Merkmale von einer Gleichverteilung untersuchen. Der p-Wert des Tests ist in der Spalte „p“ der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 2: Häufigkeitsverteilungen und Signifikanztestung für gemessene Farbwerte und ΔE

	N	%	p
Kein Farbunterschied Zahn / Zahnersatz	31	63,3	0,063
Farbunterschied Zahn / Zahnersatz	18	36,7	
$\Delta E_{er} < 4$	19	38,8	0,116
$\Delta E_{er} > 4$	30	61,2	
$\Delta E_{ZE} < 4$	38	77,6	<0,001
$\Delta E_{ZE} > 4$	11	22,4	

Aus Tabelle 2 lässt sich ableiten:

In 63,3% der Fälle liegt kein Unterschied in den gemessenen Farbwerten von Zahn und Zahnersatz vor. Dieser Anteil ist mit einem p-Wert von $p=0,062$ nicht signifikant. In Bezug auf die unterschiedlich gemessenen Farbwerte kann von keiner signifikanten Mehrheit der Fälle gesprochen werden.

Für die zweite Variable „errechnete Farbabweichung von gemessener Zahn- und Zahnersatzfarbe“ liegt mehrheitlich, also in 61,2% der Fälle eine Abweichung > 4 vor.

Der p-Wert von $p=0,116$ steht auch hier für keine signifikante Abweichung von der Gleichverteilung.

Für die dritte Variable „Gesamtfarbabweichung des Zahnersatzes gemessen“ liegt in 77.6% eine Abweichung von < 4 vor. Der Chi-Quadrat-Test ergibt einen p-Wert von $p<0,001$.

4.3. Ergebnisse der Korrelationsanalyse von Zufriedenheitswerten und Farbabweichungsvariablen

Um zu prüfen, ob die Zufriedenheit der Zahnärzte oder Patienten mit den Variablen zur Farbabweichung zusammenhängt, wurde eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Auf Grund der nicht vorhandenen Normalverteilung der Zufriedenheitsvariablen wurde hierzu der Korrelationskoeffizient nach Spearman eingesetzt. Dabei handelt es sich um einen nichtparametrischen Korrelationskoeffizienten, der keine Normalverteilung der untersuchten Variablen voraussetzt. In folgender Tabelle sind die Korrelationskoeffizienten zwischen den Zufriedenheits- und den Farbabweichungsvariablen („r“) sowie die zugehörigen p-Werte („p“) dargestellt:

Tabelle 3: Korrelationskoeffizienten zwischen Zufriedenheits- und Farbabweichungsvariablen mit zugehörigen p-Werten

	Patienten		Zahnarzt	
	Zufriedenheit		Zufriedenheit	
	R	P	R	p
Δ L Helligkeit Zahn	-0,26	0,070	-0,13	0,375
Δ C Sättigung Zahn	-0,08	0,575	-0,23	0,114
Δ h Farbton Zahn	0,08	0,580	0,07	0,632
Δ L Helligkeit ZE	-0,04	0,764	0,07	0,654
Δ C Sättigung ZE	0,04	0,763	0,09	0,562
Δ h Farbton ZE	-0,10	0,513	-0,12	0,402
Δ a RG-Anteil Zahn	-0,14	0,326	0,03	0,848
Δ b BG-Anteil Zahn	0,10	0,485	0,14	0,323
Δ a RG-Anteil ZE	0,08	0,603	-0,01	0,968
Δ b BG-Anteil ZE	-0,10	0,497	-0,31	0,032
Δ E Zahn zu ZE errechnet	-0,15	0,297	-0,18	0,229
Δ E ZE zu VITA gemessen	0,05	0,756	0,07	0,613

Der Korrelationskoeffizient r kann Werte von -1 bis +1 annehmen, wobei ein positiver Wert für eine Beziehung der Art „je mehr desto mehr“ und ein negativer Wert für eine Beziehung der Art „je mehr desto weniger“ zwischen den beiden Variablen besteht.

Die Korrelation ist weiterhin umso stärker, je weiter der Korrelationskoeffizient von 0 entfernt ist. Im Allgemeinen gilt eine Korrelation bei einem Betrag von bis zu 0,30 als schwach, bis 0,50 als mittel und ab 0,50 als stark.

Tabelle 3 kann folglich interpretiert werden:

Für die Patientenzufriedenheit ergeben sich schwache Korrelationen mit den Differenzvariablen. Keine Korrelation ist statistisch signifikant, da alle p-Werte über 0,05 liegen. Nennenswert ist die negative Korrelation von $r=-0,26$ zwischen der Patientenzufriedenheit und der Helligkeitsabweichung ΔL der gemessenen Zahnfarben von der entsprechenden VITA-Farbe, d.h. je höher (ins Positive) die Abweichung des Zahnes von der VITA-Farbe ist, desto niedriger fallen die Zufriedenheitswerte der Patienten aus.

Für die Zufriedenheit der Zahnärzte ergeben sich ebenfalls größtenteils schwache Korrelationen. Eine signifikante negative Korrelation von $r=0,31$ besteht mit der Abweichung des Blau-Gelbanteils des Zahnersatzes Δb von der VITA classical® Farbe. Je höher diese Abweichung, desto niedriger die Zufriedenheitswerte des Zahnarztes (siehe Abb.20).

Zwei weitere negative Korrelationen sind nennenswert: die gemessene Abweichung der Farbintensität ΔC des Zahnes zur VITA classical® Farbe mit $r=-0,23$, sowie die errechnete Gesamtfarbabweichung ΔE des Zahnes zum Zahnersatz mit $r=-0,18$. Auch hier gilt je höher die Ausprägung der Abweichungen, desto unzufriedener der Behandler.

Die gefundene signifikante negative Korrelation ist in folgendem Streudiagramm dargestellt:

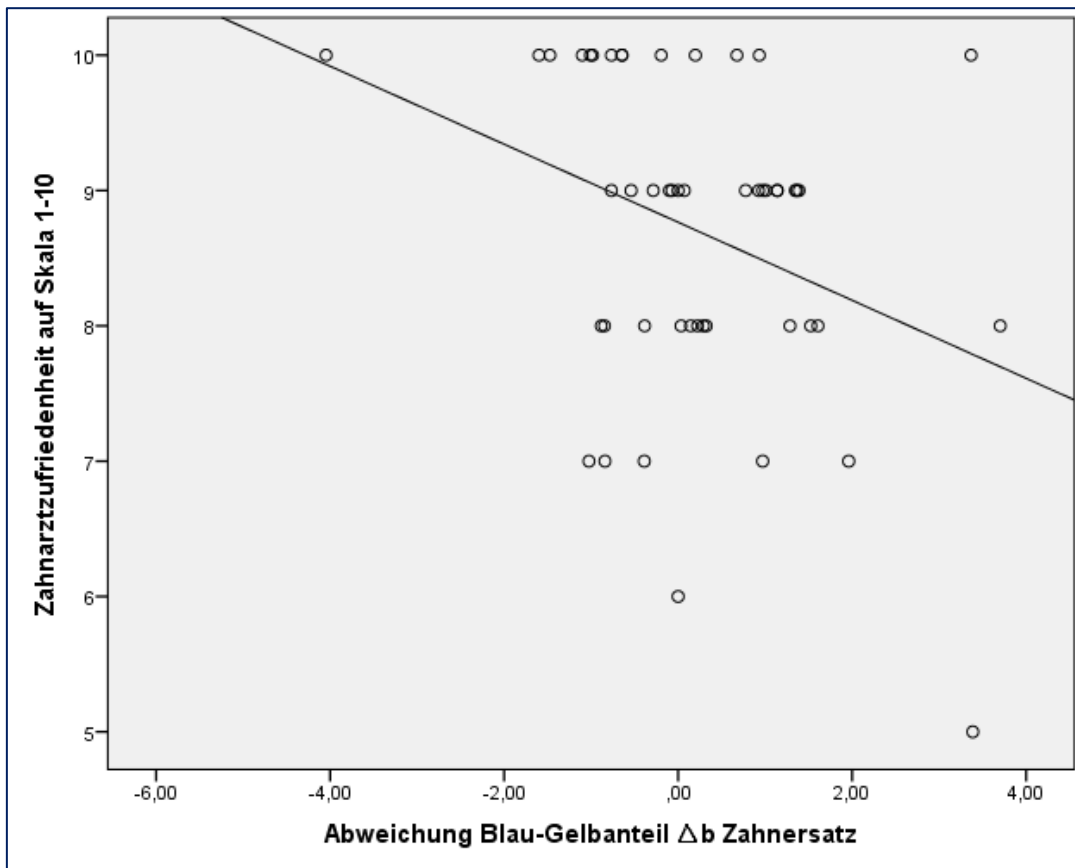


Abbildung 20: Streudiagramm für Abhängigkeit Zahnarztzufriedenheit und Δb

Das Streudiagramm, sowie die eingezeichnete Trendgerade zeigen einen recht deutlichen negativen Zusammenhang, d.h. je stärker der Blau-Gelbanteil des Zahnersatzes von der VITA classical® Farbe ins Positive abweicht, desto geringer ist im Durchschnitt die Zufriedenheit des Zahnarztes.

4.4. Ergebnisse der Kausalitätsprüfung von Zufriedenheitswerten und der unter 4.2 verwendeten binären Variablen

Darüber hinaus ist von Interesse, ob eine Abhängigkeit bzw. ein Zusammenhang zwischen der Zufriedenheit von Zahnärzten und Patienten und den 3 binären Variablen „gemessener Farbwertunterschied Zahn / Zahnersatz“, „errechnete Farbabweichung von gemessener Zahn- und Zahnersatz-Farbe $\Delta E_{er} < / > 4$ “, sowie „gemessene Gesamtfarbabweichung ΔE des Zahnersatzes $< / > 4$ “ besteht. Bei den durch die binären Variablen festgelegten Gruppen handelt es sich um unabhängige Stichproben, da jeder Proband jeweils nur einer der beiden Gruppen angehört. Als Analyseverfahren zum Vergleich der Zufriedenheiten zwischen den beiden Gruppen eignen sich daher der t-Test für unabhängige Stichproben sowie der Mann-Whitney-U-Test. Der t-Test setzt eine Normalverteilung der untersuchten Variablen in beiden Gruppen voraus und verfügt bei vorhandener Normalverteilung über eine höhere Teststärke als der Mann-Whitney-U-Test. Dieser ist ein nichtparametrischer Test und wird bei nicht vorhandener Normalverteilung verwendet, da diese keine Voraussetzung darstellt.

Folgende Tabelle enthält die Ergebnisse der Signifikanztestung. Um zu prüfen, ob eine Normalverteilung vorliegt, wurde zunächst der Shapiro-Wilk-Test angewandt. Dessen p-Wert ist in der Spalte „p NV“ dargestellt. Eine Normalverteilung kann ausgeschlossen werden, da für jeden der Fälle in mindestens einer Gruppe ein p-Wert unter 0,05 liegt.

Aus diesem Grund wird der Vergleich der Zufriedenheits-Variablen mit dem Mann-Whitney-U-Test durchgeführt, dessen p-Wert in der Spalte „p“ zu finden ist.

Tabelle 4: Mittelwerte und Signifikanztestung für Zufriedenheiten und gemessene Farbwerte, sowie $\Delta E_{er} < 4$

Variable	Gruppe	M	SD	p NV	p
Zufriedenheit Patient	K. U. Z. / ZE	9,74	0,58	<0,001	0,270
	U. Z. / ZE.	9,50	0,86	<0,001	
Zufriedenheit Patient	$\Delta E_{er} < 4$	9,79	0,54	<0,001	0,263
	$\Delta E_{er} > 4$	9,57	0,77	<0,001	
Zufriedenheit Patient	$\Delta E_{ZE} < 4$	9,74	0,55	<0,001	0,238
	$\Delta E_{er} > 4$	9,36	1,03	<0,001	
Zufriedenheit Zahnarzt	K. U. Z. / ZE	9,03	0,95	<0,001	0,014
	U. Z. / ZE.	8,11	1,32	0,124	
Zufriedenheit Zahnarzt	$\Delta E_{er} < 4$	8,89	1,05	0,001	0,322
	$\Delta E_{er} > 4$	8,57	1,25	0,002	
Zufriedenheit Zahnarzt	$\Delta E_{ZE} < 4$	8,79	1,07	<0,001	0,418
	$\Delta E_{er} > 4$	8,36	1,50	0,111	

Die Gruppenvergleiche können wie folgt ausgelegt werden:

für den Vergleich der Zahnarzt-Zufriedenheit zwischen den Gruppen „Kein Unterschied in der gemessenen Zahn- und Zahnersatzfarbe“ und „Unterschied Zahn / Zahnersatz“ ergibt der Mann Whitney-U-Test ein signifikantes Ergebnis mit $p=0,014$. Anhand der Mittelwerte ist zu erkennen, dass die Zufriedenheit des Behandlers mit $M=9,03$ signifikant höher ist, wenn die gemessenen Farbwerte von Zahn und Zahnersatz gleich sind.

In allen anderen Fällen zeigt der Mann-Whitney-U-Test einen p-Wert über 0,05 und somit keinen signifikanten Unterschied. Die Mittelwerte sprechen allerdings im Vergleich für eine höhere Gesamtzufriedenheit wenn kein Farbunterschied zu sehen ist und wenn die errechnete und auch gemessene Gesamtfarbabweichung unter 4 liegt.

Der signifikante Unterschied in der Zufriedenheit des Zahnarztes zwischen den beiden Gruppen „kein Farbwertunterschied und Unterschied zwischen der gemessenen Zahn- und Zahnersatzfarbe“ ist in folgendem Box-Whisker-Plot dargestellt:

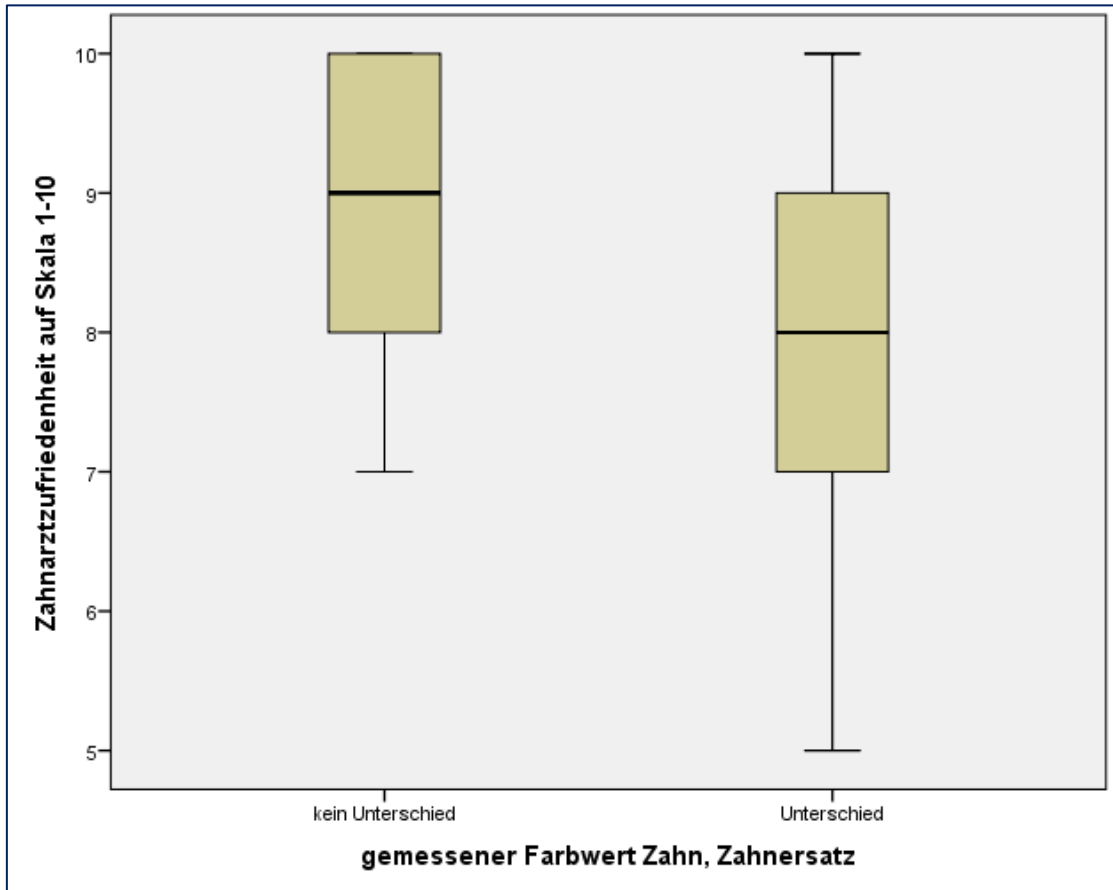


Abbildung 21: Box-Whisker-Plot für Zusammenhang Zahnarztzufriedenheit und gemessenen Farbwerten

Es zeigt sich auch im Box-Whisker-Plot ein deutlich sichtbarer Unterschied zwischen den beiden Gruppen.

5. Diskussion

5.1. Methodendiskussion

Ziel dieser Studie ist es herauszufinden, ob das Zahnfarbenmessgerät VITA Easyshade V im Herstellungsprozess von keramischem Zahnersatz reproduzierbare Ergebnisse liefert und somit in der Praxis einsetzbar ist. Dies wurde anhand von Patienten- und Zahnarztzufriedenheitswerten auf einer Skala von 1-10 validiert und mit Farbparametern verglichen, um nach Korrelationen zu suchen. Im Rahmen der beschriebenen Untersuchung wurden erstmalig Zusammenhänge zwischen subjektiven menschlichen Empfindungen und von einem Gerät gemessenen Parametern gesucht und gefunden. Mit hauptsächlichem Augenmerk auf die ΔE -Werte und einzelne Farbparameter wie ΔC und Δa im Herstellungsprozess keramischer Prothetik könnten im Labor Fehler eindämmbar sein.

Dass die visuelle Farbbestimmung fehlerbehafteter ist als die digitale [74][75] und Spektralphotometer präzise und fehlerfreie Ergebnisse liefern und äußerst verlässliche Resultate bei Grundfarbmessungen von Zähnen erbringen, haben bereits Chen *et al* [76] und Martin *et al* [77] beschrieben. Umso interessanter war die Frage nach der Funktion der neuesten Version der digitalen Zahnfarbmessgeräte. Im Vergleich zum Vorgängermodell VITA Easyshade Advance haben Klotz *et al* [78][79] bereits in zwei Studien eine präzisere Arbeitsweise untersucht. Es lässt sich folglich festhalten, dass das Potential weiter ausgeschöpft wurde.

In der Praxis fanden alle Versuchsdurchführungen standardisiert und alltagstauglich statt, um das verwendete Farbbestimmungssystem für den klinischen Einsatz zu prüfen: beide Messungen erfolgten ohne Messstativ, Messschablone oder Kofferdam am zuvor gesäuberten, restaurationsfreien, unbehandelten Zahn bzw. noch nicht definitiv eingesetztem Zahnersatz *in-vivo* statt. Einsetzmaterialien konnten als Fehlerquelle folglich ausgeschlossen werden. Damit wurde eine praxisnahe realistische Situation geschaffen.

Bereits in der digitalen Farbbestimmung erfahrenes Personal führte die Farbmessungen durch, sodass die Messsonde des Gerätes zentral (laut Ahn und Lee *et al* [80] gleichmäßigere Farbergebnisse) und plan aufgesetzt wurde, obwohl kleinere Winkelabweichungen, so Degesys *et al* [81] die Genauigkeit des

Messgerätes nicht beeinflussen. Auch die umgebende Gingiva im zervikalen Bereich und die transluzentere Schneidekante können die Farbmessung beeinflussen. Dank des geschulten Personals konnten Bedienfehler jedoch weitestgehend reduziert werden. Auf Messstativ, Messschablone und Kofferdam wurde verzichtet, da diese Hilfsmittel nicht als praxistauglich gelten: eine individuelle Messschablone für jeden zu vermessendem Zahn und anschließend für diesen Zahn hergestellten Zahnersatz ist zu zeit- und kostenintensiv und beeinflusst laut Blum *et al* [82] die reine Zahnfarbmessung nicht maßgeblich. Des Weiteren verändert sich durch Trockenheit die Zahnfarbe und der Zahn wird heller bei Verwendung eines Kofferdams [83].

Vor einer jeden Farbbestimmung wurde das Easyshade nach Bedienanleitung kalibriert. Dieser Weißabgleich spielt für die Reproduzierbarkeit von Zahnfarben laut Olms und Martin eine große Rolle [84]. Bei der Messung am Zahn befand sich das VE-V im Modus „Grundfarbbestimmung“ und während der 2. Messung nach hergestelltem keramischem Zahnersatz im Modus „Bestimmung der Farbe einer Krone“ analog zur Grundfarbenbestimmung. Dafür wurde stets das gleiche Farbbestimmungssystem verwendet, es kamen keine unterschiedlichen Geräte zur Anwendung. Auch wenn Weyhrauch *et al* bereits in einer Studie mit acht unterschiedlichen VITA Easyshade Advance-Geräten (Vorgängermodell) eine hohe Reproduzierbarkeit nachgewiesen haben [85], stellten Kim *et al* [86] in ihrer Studie fest, dass zwei VE-V-Geräte mit unterschiedlicher Seriennummer verschiedene Werte am gleichen Zahn messen können. Somit konnten Messunterschiede basierend auf dem Gerät ausgeschlossen werden. Fehlerquellen von Spektralfotometern, insbesondere von Punktmessgeräten wie dem Easyshade liegen im Verlust der ausgesendeten Lichtintensität, wenn die flache Messsonde aufgrund der natürlichen Krümmung des Zahnes nicht plan aufliegen kann und das Licht gestreut wird. Die gemessene Farbe wird dann dunkler ausgegeben [87]. Bezüglich des Punktmessgerätes ist allerdings von Vorteil, dass die Farbmessung von Reflektionen der restlichen Zahnoberfläche unbeeinflusst bleibt [88]. Auch der sogenannte „double layer effect“ sei an dieser Stelle erwähnenswert: je nachdem wo die Messsonde auf der Oberfläche des Zahnes aufliegt können Schwankungen in den Messungen auftauchen, da die Schichtung von Dentin und Schmelz nicht an allen Stellen gleich dick ist [89].

Anschließend erfolgte die Zufriedenheitsbewertung von Patient/in und erfahrenem Mitarbeiter der Abteilung Prothetik nach der eigenen Zufriedenheit auf einer Skala von 1-10. Solche visuellen oder auch verbalen Analogskalen drücken ein subjektives Empfinden aus und finden seit 1921 [90] in der Forschung Anwendung. Um die Zufriedenheit eines Menschen zu bewerten, empfahlen auch Voutilainen *et al* [91] in ihrer Studie die Anwendung einer visuellen Analogskala. Es wurden unmissverständliche Adjektive für die Endpunkte 0 = unzufrieden und 10 = überaus zufrieden gewählt, um diese quantifizieren zu können.

Dem Zahntechniker im Labor wurde lediglich die gemessene Zahnfarbe in den Systemen VITA classical® A1-D4 und VITA System 3D-Master® übermittelt, die Detailangaben zu ΔE , ΔL , ΔC und Δh wurden nur für die Studie notiert. Hier sahen Sorensen und Torres *et al* [92] eine der häufigsten Fehlerquellen im Farbproduktionsprozess. Der Techniker verwendete kein VITA Easyshade zur Überprüfung der Farben, dies hätte das Ergebnis verfälschen können. Auch ist nicht bekannt, ob und mit welchen unterschiedlichen keramischen Rohmassen die Keramiken hergestellt wurden.

Trotz der Zahnindividualitäten, wie Oberflächenmorphologie, Schichtdicke des Dentinkerns und Schmelzes, Transluzenzen, Reflektionen und auch den Gegebenheiten im Labor, sollte geprüft werden, ob die Anwendung des VE-V im Praxisalltag stattfinden kann. Daher fanden keine Laborbedingungen Platz und die Gesamtanzahl der Messungen blieb überschaubar.

Abschließend lässt sich festhalten, dass für die Kontrolle der Ergebnisse eine weitere Gruppe hilfreich gewesen wäre, da es nicht nur um die Beständigkeit des Gerätes ging, sondern auch um die Ermittlung der Eigenfarbe des Zahnes. Eine solche zusätzliche Kontrollgruppe, die die Zahnfarben visuell mit Farbskalen gegenüber dem Messgerät überprüft, sollte in weiteren Studien mit ähnlichen Aufbauten eingesetzt werden.

5.2. Ergebnisdiskussion

Im Vergleich der Zufriedenheitsangaben von Patienten und Zahnärzten fällt auf, dass die Bewertungen der Zahnärzte breiter gefächert sind und ca. ein Drittel mit dem Wert neun bewertet haben. Die Patienten sind deutlich zufriedener mit dem Farbergebnis als ihre Behandler: die Angaben liegen hier zwischen Werten von 7-10 und drei Viertel sind sogar sehr zufrieden (entsprechend dem Skalenwert 10). Dies ist wohl dem geschulten und somit kritischeren Auge des Zahnarztes geschuldet. Täglich ist das Thema Zahnfarbe in seinem Beruf präsent und bringt die Frage nach Erfahrung mit sich. Im Geschlechtervergleich schneiden weder Frauen noch Männer besser oder schlechter bei der Farbbestimmung ab, so Aswini *et al* [93]. Bezogen auf diese Studie ist es demnach uninteressant, ob Zahnarzt oder –ärztin die Farbbestimmung durchgeführt haben.

Aus den gemessenen Farbabweichungsvariablen ΔL , ΔC und Δh , die das VE-V bei jeder Farbmessung angab, wurden jeweils für Zahn und Zahnersatz die Variablen Δa (Rot-Grün-Anteil) und Δb (Blau-Gelb-Anteil) errechnet. Daraus wiederum ließ sich die Farbabweichung ΔE zwischen Zahn und Zahnersatz berechnen. Die ΔE -Werte des Gerätes beziehen sich auf die Abweichung der gemessenen Farbe zur im Farbraum nächstgelegenen VITA classcial® Farbe. Nach statistischer Analyse liegen für vier dieser Variablen signifikante Abweichungen vor: die Intensität oder Sättigung des Zahnes (ΔC), den Rot-Grün-Anteil des Zahnersatzes (Δa), die errechnete Farbabweichung von Zahn zu Zahnersatz, sowie die gemessene Farbabweichung des Zahnersatzes zur nächstgelegenen VITA classical® Farbe. Fehler im Gesamtprozess können schließlich von diesen Variablen abhängen oder anders ausgedrückt: hier könnte das Potential zu Verbesserungen im Farbbestimmungs- und Farbproduktionsprozess liegen. Ist dies bekannt, hat der Zahntechniker beim Herstellungsverfahren der Keramik die Möglichkeit mit Nachmessungen des gleichen Gerätes und Augenmerk auf die o.g. Variablen Feinjustierungen vorzunehmen.

Lediglich in einer knappen Mehrheit der Fälle (63,3%) weisen Zahn und zugehöriger keramischer Zahnersatz exakt die gleiche Farbe auf. Hier hätte es mehr Übereinstimmungen gegeben, aber bereits bei einer abweichenden VITA 3D-Master®- oder VITA classical®-Farbe wurde das Ergebnis zur Kategorie ‚Farbunterschied‘ gezählt. Auch zählt an dieser Stelle sicherlich der unterschiedliche

Aufbau eines Zahnes gegenüber einer Keramik eine nicht zu unterschätzende Rolle. Eine Keramik besitzt einen simulierten Dentinkern, wobei aber möglicherweise andere Lichtreflexionen stattfinden können. Dass die Dicke der Keramik die Farbe maßgeblich beeinflusst, haben Igiel *et al* [94] in einer Studie mit 30 Keramikkrone herausfinden können. Aber auch die Schmelzdicke des Zahnes spielt eine tragende Rolle in der Farbgebung wie He *et al* [95] kürzlich an 50 extrahierten Zähnen untersuchten.

Um Farbunterschiede quantifizieren zu können gibt es die Möglichkeit den Farbabstand ΔE zu berechnen und somit den sogenannten euklidischen Abstand zweier Farben im Farbraum zu analysieren. So ist es möglich zwei gemessene Farben, die des Referenzzahnes und die der Restauration vergleichbar zu machen und Farbabweichungen zu beschreiben. Dieser Wert lässt sich für jede Zahnfarbe immer wieder individuell errechnen und macht die Reproduktion im Labor mit einem Zahnfarbmessgerät gegenüber der visuellen Farbbestimmung überprüfbar. So ist eine objektive Reevaluation möglich. Allerdings herrscht noch keine Einigkeit darüber, ab welchen Werten das menschliche Auge die Farbunterschiede wahrnehmen und ab welchen Werten eine Intoleranz gegenüber den Unterschieden entsteht. Laut Baltzer *et al* [63] werden ΔE -Werte zwischen 1 und 3 angestrebt, Werte unter 2 hingegen werden nur schwer als Unterschied erkannt. Johnsten *et al* [96] gaben als oberen Grenzwert $\Delta E = 3,7$ an, alles darüber hinaus sei intraoral als Farbunterschied nicht mehr tolerierbar. Khurana *et al* [97] hingegen beschrieben eine Abweichung über 5 als überaus störend. Der untere Grenzwert liegt unter optimalen Bedingungen bei 1 [98]. Das Studiendesign beeinflusst diese Empfindungswerte maßgeblich, so finden sich Unterschiede in Farbmessung unter Laborbedingungen und Farbmessungen intraoral. Da in dieser Studie ein *in-vivo*-Verfahren gewählt wurde, welches die Bedingungen realistisch, aber damit nicht einfacher macht [99], orientierte man sich für die Grenze des noch akzeptablen Farbunterschiedes an den ΔE -Werten selbst, die am häufigsten um 4 herum lagen. In einer knappen Mehrheit der Fälle übersteigen die errechneten Farbabweichungswerte der Zahn- und Zahnersatzfarben den Wert 4 ($p=0,116$). Gründe dafür können kleine Messwinkeländerungen des VE-V Objektivs, aber auch die Individualitäten der Zähne sein. So sind nicht nur, wie bereits oben erwähnt, der vielschichtige Aufbau und die damit unterschiedlichen Lichtreflexionen, sondern auch Oberflächenbeschaffenheit, Transluzenz und Krümmung des Zahnes zu nennen, die

die Messergebnisse beeinflussen können [99]. Allerdings konnte in einer signifikanten Mehrheit der Fälle eine Abweichung der gemessenen Farbabweichungswerte vom Zahnersatz zur nächstgelegenen VITA classical® Farbe im Farbraum unter 4 errechnet werden ($p < 0,001$). Dies spiegelt sich auch deutlich in der Zufriedenheit der Patienten, aber auch der der Zahnärzte wider. Alles in allem wirkt demnach das Gerät VITA Easyshade V unterstützend im Farbproduktionsprozess keramischer Prothetik und lehnt damit die erste Nullhypothese ab.

Im Vergleich der Zufriedenheitsangaben mit den Farbabweichungsvariablen sind Zusammenhänge wie folgt darstellbar: die Zufriedenheit der Zahnärzte fällt niedriger aus, je positiver die Abweichung der Blau-Gelb-Anteile des Zahnersatzes (Δb), die Farbsättigung des Zahnes (ΔC) und die errechneten ΔE -Werte von Zahn und Zahnersatz. Die Patientengruppe war unzufriedener mit steigender Helligkeitsabweichung (ΔL) der Zähne. Wünschenswert ist an dieser Stelle der Bezug zur Abweichung von ΔL des Zahnersatzes und ein ähnlicher Zusammenhang in der Zahnärztesgruppe, da die Helligkeit in Bezug auf Übereinstimmung oder Differenz von Zahnfarben hauptsächlich einen Einfluss auf die menschliche Wahrnehmung hat [100]. Die Korrelation der Zufriedenheit mit ΔE -Werten ist schlüssig: „je positiver die Abweichung“, desto größer ist der sichtbare Farbunterschied. Dass abweichende Farbsättigungen bzw. –intensitäten, sowie Helligkeiten zusammen eine 25-fach stärkere Auswirkung auf die Empfindung der Farbabweichungen haben als der Farbton h ist bereits bekannt und liegt an der geringen Rot-Gelb-Distanz bei natürlichen Zähnen [63]. Der Zusammenhang der Zufriedenheit mit einer Abweichung von Δb hingegen ist neu und kann nicht mit bisherigen Studien verglichen werden, da die Suche nach solchen Zusammenhängen bisher einmalig ist.

Bei Betrachtung der angegebenen Zufriedenheitswerten und den Gruppen Farbunterschiede und Farbabweichungswerte kleiner und größer vier fällt ein signifikantes Ergebnis mit $p = 0,014$ auf: die Zahnärzte sind signifikant zufriedener, wenn die gemessenen Farbwerte von Zahn- und Zahnersatz exakt übereinstimmen. Auch die Mittelwerte in diesem Gruppenvergleich sagen aus, dass insgesamt eine höhere Gesamtzufriedenheit ohne Farbunterschiede und Farbabweichungswerten (ΔE errechnet und gemessen) unter vier herrscht. Dies ist ein eindeutiges Ergebnis

und widerlegt damit auch die zweite Nullhypothese: „die Zufriedenheitswerte lassen weder Rückschlüsse auf die gemessene Farbabweichung des Zahnersatzes zur VITA classical® Farbe, noch auf die errechnete Farbabweichung der Zahn-zur Zahnersatzfarbe zu“.

Trotz unsicherer Einflussfaktoren wie die subjektive Empfindung „Zufriedenheit“, die Durchführung aller Messungen im Patientenmund, eine nicht vorhandene objektive Kontrollgruppe konnte diese Studie zeigen, dass die neueste Generation der Zahnfarbmessgeräte die Forderung an instrumentelle Farbbestimmungen nach Reproduzierbarkeit, Objektivität und konstanter Leistung [63] erbringen kann. Im gesamten Farbbestimmungs-, Farbkommunikations- und –reproduktionsprozess ist eine Anwendung des VITA Easyshade V nach aktueller Studienlage [77][78][79] empfehlenswert - mit Beachtung der Limitationen. Dabei sollte es allerdings zusätzlich im Labor während der Keramikherstellung zur Farbüberprüfung verwendet werden, um exaktere Ergebnisse zu erzielen und die Kosten für neuen Zahnersatz einzudämmen [74][75]. Diesen Vorgang gilt es in weiteren Studien zu evaluieren, um zusätzlich die Frage nach einer schrittweisen Ablöse der visuellen Farbbestimmung zu klären. Auch eine Kontrollgruppe und die Testung weiterer Modi des Gerätes sollten mit einbezogen werden.

6. Zusammenfassung

In dieser *In-vivo*-Studie ging es um die Evaluation der Messgenauigkeit des Zahnfarbmessgerätes Easyshade V der Firma VITA H. Rauter GmbH & Co. KG, anhand von 98 Vorher-Nachher-Messungen an Zähnen und dafür angefertigten keramischen Zahnersatzes. Auf Basis der 49 vorher gemessenen Zahnfarben wurde die Keramik hergestellt, deren Farbe mit einer Nachher-Messung überprüft wurde. Anschließend sollten Patient und Zahnarzt ihre Zufriedenheit bezüglich der reproduzierten Zahnfarbe auf einer Skala von 1-10 angeben. Die Zufriedenheit der Patienten unterschied sich signifikant von der der Zahnärzte. Entsprechend der gemessene Farbwert des Zahnes dem des Zahnersatzes waren die Zahnärzte insgesamt zufriedener.

Anhand der einzelnen Farbparameter, die das Gerät Easyshade V für jede Messung anzeigte, konnten signifikante Abweichungen für die Buntheit des Zahnes (ΔC), den Rot-Grün-Anteil des Zahnersatzes (Δa), die errechnete Gesamtfarbabweichung ΔE des Zahnes zum Zahnersatz, sowie die gemessene Farbabweichung ΔE des Zahnersatzes festgestellt werden ($p < 0,001$). Speziell für gemessene ΔE -Werte des Zahnersatzes unter 4 fielen signifikante Abweichungen auf ($p < 0,001$). Hier liegen Möglichkeiten für den Zahntechniker in der Zahnfarbreproduktion Fehler einzudämmen.

Korrelationen zwischen den Zufriedenheitswerten und den einzelnen Farbparametern können wie folgt ausgedrückt werden: mit zunehmender Helligkeitsabweichung des Zahnes von der VITA classical® Farbe sinkt die Patientenzufriedenheit. Die Behandler sind unzufriedener mit dem Ergebnis je höher der Blau-Gelbanteil Δb des Zahnersatzes und die Buntheit des Zahnes ΔC von der VITA classical® Farbe abweicht und je positiver die errechnete Gesamtfarbabweichung ΔE von Zahn zu Zahnersatz ausfällt. Eine höhere Gesamtzufriedenheit ergibt sich für alle Farbabweichungen ΔE (errechnet und gemessen) unter 4, sprich für den Bereich des vom menschlichen Auge wahrgenommenen, aber noch akzeptierten Farbunterschied.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass das Spektralphotometer VITA Easyshade V für den klinischen Einsatz im Herstellungsprozess keramischen

Zahnersatzes verwendet werden sollte und den Zahntechniker mit Blick auf die einzelnen Farbparameter positiv unterstützen kann. Diese Parameter, insbesondere der Farbabstand ΔE , sollten jedoch entsprechend bewertet werden, um eventuelle Nachkorrekturen an der Keramikfarbe des Zahnersatzes während der Laborarbeiten vornehmen zu können.

7. Literaturverzeichnis

- [1] Miller LI. Shade matching. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*. 1993; 5(4):143-53.
- [2] Deutscher Zahnärztetag. Der Kongress. Das Premium Partner Jahrbuchbuch 2010. Berlin. Quintessenz-Verlags GmbH. 2010. S. 53.
- [3] Lehmann KM, Devigus A, Igiel C, Wentaschek S, Azar MS, Scheller H. Repeatability of color-measuring devices. *The European journal of esthetic dentistry: official journal of the European Academy of Esthetic Dentistry*. 2011; 6(4):428-35.
- [4] van der Burgt TP, ten Bosch JJ, Borsboom PC, Kortsmits WJ. A comparison of new and conventional methods for quantification of tooth color. *The Journal of prosthetic dentistry*. 1990;63(2):155-62.
- [5] Lim HN, Yu B, Lee YK. Spectroradiometric and spectrophotometric translucency of ceramic materials. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2010; 104(4):239-46.
- [6] Grehn F. *Augenheilkunde*. 30. Aufl. Heidelberg. 2008.
- [7] Lang GK, Lang GE. *Augenheilkunde essentials*: Thieme; 2015.
- [8] Huppelsberg J, Walter K. *Kurzlehrbuch Physiologie*: Georg Thieme Verlag; 2013.
- [9] Hick C, Hick A. *Kurzlehrbuch Physiologie7: Kurzlehrbuch Physiologie*: Elsevier Health Sciences; 2013.
- [10] Deetjen P, Speckmann E, Hescheler J. *Physiologie*, 4. Vollständig überarbeitete Auflage. Urban und Fischer Verlag, München-Jena. 2005.
- [11] M. H. Bernd Hering: *Weißes Farbmittel*. Ein Nachschlagewerk für Konservatoren, Restauratoren, Studenten, Architekten, Denkmalpfleger, Kunstwissenschaftler, Maler, Sachkundige und Interessierte. Eigenverlag, Fürth. 2000.
- [12] Sharpe LT, Gegenfurtner KR. *Color vision: from genes to perception*: Cambridge University Press Cambridge; 1999.
- [13] Schmidt R, Lang F, Thews G. *Physiologie des Menschen*. 2005. *Physiologie des Menschen*. 29.
- [14] Silbernagl S, Despopoulos A. *Taschenatlas der Physiologie*, 6., korrigierte Auflage. Stuttgart und New York: Thieme. 2003.
- [15] Erb C, Fahle M. Farbsehen und erworbene Farbsinnstörungen. *Der Ophthalmologe*. 2006; 103(4):349-61.
- [16] Verriest G. Further studies on acquired deficiency of color discrimination. *JOSA*. 1963;53(1):185-95.

-
- [17] Köllner H. Die Störungen des Farbensehens: Karger Publishers; 1912.
- [18] Newton I. Opticks, or, a treatise of the reflections, refractions, inflections & colours of light: Courier Corporation; 1952.
- [19] Zollinger H. Das Farbensehen des Menschen. Ein interdisziplinäres Forschungsproblem zwischen Natur- und Humanwissenschaften. Lenzinger Berichte. Februar 1974. Folge 36. S.15.
- [20] Baltzer A, Kaufmann-Jinoian V. Die Bestimmung der Zahnfarben. Quintessenz Zahntechnik. 2004;30(7):726-41.
- [21] Welsch N, Liebmann CC. Theorien des Farbensehens. Farben: Springer; 2012. p. 227-32.
- [22] Richter M. Einführung in die Farbmeterik: Walter de Gruyter; 2011.
- [23] von Helmholtz H. Ueber die Theorie der zusammengesetzten Farben: physiologisch-optische Abhandlung: Unger; 1852.
- [24] Eysel U. Sehen. Neuro-und Sinnesphysiologie: Springer; 1998. p. 263-304.
- [25] Koppers H. Harmonielehre der Farben: Theoretische Grundlagen der Farbgestaltung. Köln: DuMont. 1989.
- [26] Gegenfurtner KR, Rieger J. Sensory and cognitive contributions of color to the recognition of natural scenes. Current Biology. 2000;10(13):805-8.
- [27] Wenisch T. Kurzlehrbuch Physik, Chemie, Biologie: Kurzlehrbuch zum Gegenstandskatalog: Elsevier, Urban&FischerVerlag; 2009.
- [28] Bragg WH. Die Welt des Lichtes: Aus d. Engl. übers. von Günter Nagelschmidt: Vieweg; 1935.
- [29] Fuchs H. Eine experimentelle Untersuchung zur Farbkonstanz: S. Roderer; 1992.
- [30] Hunter RS, Harold RW. The measurement of appearance: John Wiley & Sons; 1987.
- [31] Scheidle W. CIELab. Wie ist CIELab aufgebaut? [Internet] [zitiert am: 28.05.2017] URL: www.cielab.de.
- [32] Hasche E. Farbe, Farbmodelle und Farbräume. Game of Colors: Moderne Bewegtbildproduktion: Springer; 2016. p. 1-50.
- [33] de l'Eclairage CI. Recommendations on uniform color spaces, color-difference equations, psychometric color terms. Paris: CIE. 1978.
- [34] Ditzinger T. Achte Reise: Der Alltag ist gar nicht grau—Täuschungen in unserem täglichen Leben. Illusionen des Sehens: Springer; 2013. p. 233-64.
- [35] Stoll R, Frankenberger R. Theory and practice of tooth color for the restorative therapy. Quintessenz. 2010;61:581-5.

-
- [36] Touati B, Miara P, Nathanson D. Ästhetische Zahnheilkunde und keramische Restauration: Elsevier, Urban&FischerVerlag; 2001.
- [37] Steiniger B, Schwarzbach H, Stachniss V. Mikroskopische Anatomie der Zähne und des Parodonts: Thieme; 2010.
- [38] Amato M, Krastl G. Verfärbter obliterated Frontzahn. Stomatologie. 2012;109(4-5):40-4.
- [39] Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung: Elsevier, Urban&FischerVerlag; 2007.
- [40] Hegenbarth EA. Systematik der individuellen keramischen Farbgestaltung: Quintessenz Verlag-GmbH; 1993.
- [41] Cogo E., Sibilla P., Turrini R. Zahnbleaching. Wege zum Erfolg. Berlin: Quintessenz-Verlag. 2013, 3: 16-19.
- [42] Schmideder J. Ästhetische Zahnmedizin: Georg Thieme Verlag; 2008.
- [43] Hoffmann A. Systematische Erforschung und Analyse der Zahnfarbe, Zahnfarbmessung und dentaloptischer Phänomene: Neue wissenschaftliche Erkenntnisse und neuartige Methoden zur Zahnfarbmessung und-bestimmung: BoD–Books on Demand; 2010.
- [44] Muia P.J. Das vierdimensionale Farbsystem. Berlin: Quintessenz. 1982.
- [45] Vanini L. Light and color in anterior composite restorations. Practical periodontics and aesthetic dentistry: PPAD. 1996;8(7):673-82.
- [46] Berger-Schunn A. Praktische Farbmessung: ein Buch für Anfänger, eine Gedächtnisstütze für Könner: Muster-Schmidt; 1991.
- [47] Chu SJ, Devigus A, Mielezsko AJ. Fundamentals of color: shade matching and communication in esthetic dentistry: Quintessence Publishing Company Illinois; 2004.
- [48] Kvaal S, Solheim T. Fluorescence from dentin and cementum in human mandibular second premolars and its relation to age. European Journal of Oral Sciences. 1989; 97(2):131-8.
- [49] Ardizzone VC, Ardizzone R. Lo sbiancamento dentale domiciliare e professionale. Colore del dente e discromie (I parte). Dental Cadmos. 2005;10(73):1-17.
- [50] Bücking W. Die dentale Trickkiste. Quintess. 2005; 53:1199-207.
- [51] Corcodel N, Rammelsberg P, Moldovan O, Dreyhaupt J, Hassel AJ. Effect of external light conditions during matching of tooth color: an intraindividual comparison. International Journal of Prosthodontics. 2009; 22(1).
- [52] Strub J, Türp J, Witkowski S, Hürzeler M, Kern M. Curriculum Prothetik Band 2: Artikulatoren. Ästhetik, Werkstoffkunde, festsitzende Prothetik Quintessenz Verlag, Berlin. 2005:505-24.

-
- [53] Kern M, Kohal R, Mehl A, Pospiech P, Frankenberger R, Reiss B, et al. „Vollkeramik auf einen Blick“, Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e. V; 2015. S.109-10.
- [54] Yuan JC-C, Brewer JD, Monaco Jr EA, Davis EL. Defining a natural tooth color space based on a 3-dimensional shade system. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2007;98(2):110-9.
- [55] VITA Zahnfabrik. H. Rauter GmbH & Co. KG. Produktinformation. Bad Säckingen.
- [56] Stoll R, Jablonski-Momeni A, Stachniss V. Die Verwendung der Farbskalen Vitapan Classical und Vita Bleachedguide 3D-Master zur Farbkontrolle beim Bleichen vitaler Zähne. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift*. 2008;63(1):53.
- [57] Ditzinger T. Farbkompetenz in der Zahnfarbbestimmung. *ZM*. 2004;1:34-5.
- [58] Ülker N. Digitale Zahnfarbenbestimmung: Reliabilität und Validität des VITA Easyshade Advance 2015.
- [59] Ishikawa-Nagai S, Yoshida A, Da Silva JD, Miller L. Spectrophotometric analysis of tooth color reproduction on anterior all-ceramic crowns: Part 1: analysis and interpretation of tooth color. *Journal of esthetic and restorative dentistry*. 2010; 22(1):42-52.
- [60] Dobberstein I. Objektiv bestimmen – subjektiv wahrnehmen. Vorstellung eines neuen Farbmesssystems. *QZ - Quintessenz Zahntechnik*. 2009; 35:420-2.
- [61] Paravina RD. Performance assessment of dental shade guides. *Journal of dentistry*. 2009;37 Suppl 1:e15-20.
- [62] Kourtis S, Chronopoulos V, Papadimitriou P. Die Verwendung von easys shade und spectroshade: Bewertung elektronischer Geräte zur Bestimmung der Zahnfarbe. *Cont Dental Edu*. 2009;12:232-40.
- [63] Baltzer A, Kaufmann-Jinoian V. Die digitale Farbmessung der Zähne. *Quintessenz Zahntechnik*. 2004:834-58.
- [64] Park J-W. Understanding of the color in composite resin. *Restorative Dentistry and Endodontics*. 2011; 36(4):271-9.
- [65] Da Silva JD, Park SE, Weber H-P, Ishikawa-Nagai S. Clinical performance of a newly developed spectrophotometric system on tooth color reproduction. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2008; 99(5):361-8.
- [66] Hassel AJ, Nitschke I, Rammelsberg P. Comparing Lab Color Coordinates for Natural Teeth Shades and Corresponding Shade Tabs Using a Spectrophotometer. *International Journal of Prosthodontics*. 2009;22(1).
- [67] Wasson W, Schuman N. Color vision and dentistry. *Quintessence international*. 1992; 23(5).
- [68] Dain S. Coping with colour-blindness, by Odeda Rosenthal and Robert H. Phillips. *Color Research & Application*. 1998;23(3):186-7.

-
- [69] Hamm M, Neuberger D. Gesunde Augen-ein Leben lang: Mit Antioxidanzien, Omega-3 und Mikronährstoffen gegen-Makuladegeneration-Trockene Augen-Grauen Star-Nachtblindheit: Goldmann Verlag; 2012.
- [70] Hartmann B, Goertz W. Farbsehstörung–wenn die Farben blasser werden. Augen-Sprechstunde: Springer; 2013. p. 65-74.
- [71] Buchta M, Höper DW, Sönnichsen A. Pupille. Das Zweite StEx: Springer; 2004. p. 1044-6.
- [72] Culpepper WD. A comparative study of shade-matching procedures. Journal of Prosthetic Dentistry. 1970;24(2):166-73.
- [73] VITA Zahnfabrik. H. Rauter GmbH & Co. KG. Bedienungsanleitung VITA Easyshade® V. Bad Säckingen.
- [74] Walton T, Layton D. Cost satisfaction analysis: a novel patient-based approach for economic analysis of the utility of fixed prosthodontics. Journal of oral rehabilitation. 2012;39(9):692-703.
- [75] Corcodel N, Zenthofer A, Setz J, Rammelsberg P, Hassel AJ. Estimating costs for shade matching and shade corrections of fixed partial dentures for dental technicians in Germany: a pilot investigation. Acta odontologica Scandinavica. 2011;69(5):319-20.
- [76] Chen H, Huang J, Dong X, Qian J, He J, Qu X, et al. A systematic review of visual and instrumental measurements for tooth shade matching. Quintessence International. 2012; 43(8).
- [77] Martin V. Reproduzierbarkeit und Reliabilität von digitalen intraoralen Spektrophotometern-eine experimentelle Untersuchung.
- [78] Klotz A-L, Habibi Y, Corcodel N, Rammelsberg P, Hassel AJ, Zenthöfer A. Laboratory and clinical reliability of two spectrophotometers. J Esthet Restor Dent. 2018;1–5
- [79] Klotz A., Habibi Y., Hassel A.J. *et al.* How reliable and accurate is the shade determination of premolars by spectrophotometry? Clin Oral Invest 2019.
- [80] Ahn J-S, Lee Y-K. Color distribution of a shade guide in the value, chroma, and hue scale. The Journal of prosthetic dentistry. 2008; 100(1):18-28.
- [81] Degesys N.F., Phark J.H., Jasinevicius T.R., Sadan A. Influence of varying a spectrophotometer's angulations on shade-selection accuracy. J Dent Res 2008; 87 (Spec Iss B): Abstract 2918.
- [82] Blum SL, Horn M, Olms C. A comparison of intraoral spectrophotometers-Are there user-specific differences? Journal of Esthetic and Restorative Dentistry. 2018; 30(5):442-8.
- [83] Burki Z, Watkins S, Wilson R, Fenlon M. A randomised controlled trial to investigate the effects of dehydration on tooth colour. Journal of dentistry. 2013; 41(3):250-7.

-
- [84] Olms C, Martin V. Reproducibility and reliability of intraoral spectrophotometers. 2019;1:67-75.
- [85] Weyhrauch, M., Igiel, C., Pabst, A.M. *et al.* Interdevice agreement of eight equivalent dental color measurement devices. Clin Oral Invest 19, 2015; 2309–2318.
- [86] 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 Jun; 10(3):252-258.
- [87] O'Brien WJ, Nelson D, Lorey RE. The assessment of chroma sensitivity to porcelain pigments. J Prosthet Dent 49, 1983; 63–66.
- [88] Okubo SR *et al.*: Evaluation of visual and instrument shade matching. J Prosthet Dent 80, 1998; 642–648.
- [89] O'Brien WJ. Double layer effect and other optical phenomena related to esthetics. Dent Clin North Am 1985; 29: 667-672
- [90] Hayes, M.H.S., Paiterson, D.G. Experimental development of the graphic rating scale. Psychology Bulletin, 18, 1921; 98-99.
- [91] Voutilainen A., Pitkäaho T., Kvist T. How to ask about patient satisfaction? The visual analogue scale is less vulnerable to confounding factors and ceiling effect than a symmetric Likert scale. Journal of Advanced Nursing, 72, 2015; 946-957.
- [92] Sorensen JA, Torres TJ. Improved color matching of metal-ceramic restorations. Part I: A systematic method for shade determination. The Journal of prosthetic dentistry. 1987; 58(2):133-9.
- [93] Aswini KK, Ramanarayanan V, Rejithan A, Sajeev R, Suresh R. The effect of gender and clinical experience on shade perception. Journal of esthetic and restorative dentistry: official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry. 2019; 31(6):608-12.
- [94] 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. The international journal of esthetic dentistry. 2018;13(1):110-9.
- [95] He WH, Park CJ, Byun S, Tan D, Lin CY, Chee W. Evaluating the relationship between tooth color and enamel thickness, using twin flash photography, cross-polarization photography, and spectrophotometer. Journal of esthetic and restorative dentistry: official publication of the American Academy of Esthetic Dentistry. 2020; 32(1):91-101.
- [96] Johnston WM, Kao EC. Assessment of appearance match by visual observation and clinical colorimetry. Journal of dental research. 1989;68(5):819-22.

- [97] Khurana R, Tredwin CJ, Weisbloom M, Moles DR. A clinical evaluation of the individual repeatability of three commercially available colour measuring devices. *British dental journal*. 2007;203(12):675-80.
- [98] Seghi RR, Johnston WM, O'Brien WJ. Performance assessment of colorimetric devices on dental porcelains. *Journal of dental research*. 1989;68(12):1755-9.
- [99] Tung FF, Goldstein GR, Jang S, Hittelman E. The repeatability of an intraoral dental colorimeter. *The Journal of prosthetic dentistry*. 2002; 88(6):585-90.
- [100] Baltzer A, Physikalisches Farbsystem und menschlicher Farbeindruck. *Digital Dental News* 2007; 14–19

Anhang

Anbei die Genehmigungen zur Verwendung der im Text sichtbaren Bilder:

-gelöscht aufgrund personenbezogener Daten-

Danksagung

Ich bedanke mich ganz herzlich bei Herrn Dr. med. dent. XXX für die Themenfindung, sowie die gesamte hervorragende Unterstützung und Betreuung dieser Dissertation, v.a. auch noch im Anschluss seiner universitären Klinikpräsenz.

Herrn Prof. Dr. med. dent. XXX danke ich besonders für das Lektorieren und die Verfassung des Erstgutachtens dieser Dissertationsschrift.

Ebenso herzlicher Dank geht an Herrn Prof. Dr. med. dent. XXX für die Anfertigung des Zweitgutachtens.

Ein weiterer Dank gilt der Abteilung Prothetik mit allen Teilnehmern/innen für die Möglichkeit der Durchführung der zweizeitigen Untersuchungen.

Vielen Dank auch an Herrn XXX M. Sc. Statistik, für die Unterstützung in der statistischen Auswertung.

Für die Bereitstellung des Messgerätes für den Zeitraum der Untersuchungen möchte ich mich bei der Firma VITA Zahnfabrik Rauter GmbH & Co. KG bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt an dieser Stelle meinem Ehemann, der mich in der gesamten Zeit unterstützte und es nicht versäumte, mich stets an meine Stärken zu erinnern. Ohne seine Geduld und Ermutigungen wäre der Abschluss dieser Arbeit fraglich gewesen. Auch meiner Familie möchte ich herzlich danken für den Rückhalt in meiner Studienzeit und natürlich auch im Anschluss.