

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

Photospektrometrische Auswertung maschinell gefräster Dentalkeramiken Vita MK® II, Vita  
Suprinity® HT und Vita Suprinity® T in der Höhe 1mm 1,5mm und 2 mm mittels Thermo  
Scientific™ Evolution™ 600

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

Vorgelegt von

Julia Dietrich  
aus Mainz

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr Hansjörg Schild

Tag der Promotion: 01.02.2025

Namensnennung, Keine Bearbeitungen (CC-BY-ND-4.0)

**Für meinen Opa Prof. Dr. Dr. Peter Tetsch**

# Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis .....	I
1 Einleitung / Ziel der Dissertation .....	4
2 Literaturdiskussion .....	5
2.1 Physikalische Grundlagen .....	5
2.1.1 Licht.....	5
2.1.2 Transmission und Opazität. ....	5
2.1.3 Fluoreszenz.....	6
2.1.4 Opaleszenz.....	6
2.1.5 Metamerie.....	6
2.1.6 Grundlagen der Farbempfindung .....	7
2.1.7 Das L*a*b* Farbspektrum .....	8
2.1.8 L*C*h° Farbraum .....	8
2.1.9 Bewertung von $\Delta E$ .....	9
2.2 Dentale Farbbestimmung .....	11
2.2.1 Einfluss der Zahnanatomie auf die Farbe .....	11
2.2.2 VITA classical Farbskala A1 - D4® .....	12
2.2.3 Vita Farbskala Toothguide 3D MASTER® .....	12
2.2.4 Farbbestimmung am Patienten .....	13
2.2.5 Digitale Zahnfarbbestimmung .....	14
2.3 Dentalkeramik .....	14
2.3.1 Übersicht der Dentalkeramiken.....	14
2.3.2 Herstellungsprozess herkömmlicher Dentalkeramiken.....	15
2.3.3 Monolithisch gefräste Keramiken .....	15
2.3.4 Monolithische, implantatgetragene Restaurationen.....	16
2.3.5 Leuzitverstärkte Glaskeramiken.....	17
2.3.6 Lithiumsilikatkeramiken .....	17
2.4 Einflüsse auf die Farbe von Dentalkeramiken.....	17
2.4.1 Einfluss der Politur und Oberflächenbehandlung auf die Farbe.....	18
2.4.2 Einfluss der Dicke der Keramik auf die Farberscheinung .....	18
2.4.3 Einfluss der Materialien auf einen Farbunterschied im gleichen Farbraum....	19
3 Material und Methoden .....	20
3.1 Material .....	20
3.1.1 Die Keramiken .....	20
3.1.2 Die Fräse „inLab® MC X5®“ .....	20
3.1.3 Zusammensetzung der Keramiken: .....	21
3.2 Methode .....	21
3.2.1 Herstellung der Probekörper .....	21
3.2.2 Fertigung des Adapters.....	23
3.2.3 Messung mittels Thermo Scientific™ Evolution™ 600 und VisonlitePro .....	24

3.2.4	Computer und Software .....	26
3.2.5	Nullhypothese .....	26
3.2.6	Auswertung der Daten .....	26
4	Ergebnisse .....	28
4.1	Deskriptive Statistik .....	28
4.2	Box-Whisker-Plots .....	30
4.3	Varianzanalyse .....	32
4.3.1	Statistische Auswertung zwischen den Keramiken .....	33
4.3.2	Statistische Auswertung zwischen den Höhen je Keramik .....	36
4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	39
5	Diskussion .....	40
5.1	Diskussion der Materialien .....	40
5.2	Diskussion der Methodik .....	41
5.3	Diskussion von Delta E .....	42
5.4	Zusammenfassung der Ergebnisse .....	43
5.5	Integration der Ergebnisse in die Literatur .....	44
5.5.1	Diskussion des Einflusses der Dicke der Keramik auf die Farberscheinung..	44
5.5.2	Einfluss der Materialien auf einen Farbunterschied im gleichen Farbraum....	45
5.6	Limitation .....	46
5.7	Klinische Relevanz .....	47
5.8	Ausblick .....	48
6	Zusammenfassung .....	49
6.1	Durchführung .....	49
6.2	Ergebnisse .....	49
6.3	Klinische Konsequenz .....	50
7	Literaturverzeichnis .....	52

## **Abkürzungsverzeichnis**

CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CIE	Comission Internationale de L'Éclairage
DIN	Deutsches Institut für Normungen
LED	Light emitting diode
Max	Maximal
Min	Minimal

## Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 1 SPEKTRUM DES SICHTBAREN LICHTS (EIGENE ABBILDUNG) .....	5
ABBILDUNG 2 CIEL *A*B* UND CIEL *C*H° FARBRAUM .....	8
ABBILDUNG 3 FORMEL 1 EUKLIDISCHE FORMEL (2, 14).....	8
ABBILDUNG 4 FORMEL 2 BERECHNUNG DER KOORDINATE L*[2].....	9
ABBILDUNG 5 FORMEL 3 BERECHNUNG DER KOORDINATE C*AB [2].....	9
ABBILDUNG 6 FORMEL 4 BERECHNUNG DER KOORDINATE H° [2] .....	9
ABBILDUNG 7: VITA CLASSICAL® A1-D4.....	12
ABBILDUNG 8: VITA FARBSKALA TOOTHGUIDE 3D MASTER®.....	13
ABBILDUNG 9 KERAMIKBLÖCKE DIREKT NACH DEM SCHLEIFPROZESS .....	22
ABBILDUNG 10 ANSICHT DER PROBEKÖRPER .....	23
ABBILDUNG 11 DESIGN DES HALTERS IN „FREECAD“ .....	24
ABBILDUNG 12 DESIGN DES ADAPTERS FÜR THERMO SCIENTIFIC™ EVOLUTION™ 600 IN „FREECAD “ .....	24
ABBILDUNG 13 HALTER OHNE PROBEKÖRPER .....	25
ABBILDUNG 14 HALTER IN ADAPTER MIT PROBEKÖRPER MIT AUSRICHTUNG DER BRUCHSTELLE NACH UNTEN .....	25
ABBILDUNG 15 GEGENÜBERSTELLUNG DER HELLIGKEIT ZWISCHEN DEN KERAMIKEN UND KERAMIKSTÄRKE .....	30
ABBILDUNG 16 GEGENÜBERSTELLUNG DER ROT-GRÜN ACHSE A* ZWISCHEN DEN KERAMIKEN UND HÖHEN.....	30
ABBILDUNG 17 * GEGENÜBERSTELLUNG DER GELB-BLAU ACHSE B* ZWISCHEN DEN KERAMIKEN UND HÖHE .....	31
ABBILDUNG 18 GEGENÜBERSTELLUNG DER CHROMAZITÄTT C* ZWISCHEN DEN KERAMIKEN UND HÖHEN.....	31
ABBILDUNG 19 GEGENÜBERSTELLUNG DES BUNTTONWINKELS H° ZWISCHEN DEN KERAMIKEN UND HÖHEN.....	32

## Tabellenverzeichnis

TABELLE 1 BEWERTUNG VON $\Delta E$ -WERTEN FÜR ZAHNMEDIZINISCHE RESTAURATIONEN (22).....	10
TABELLE 2 ÜBERSICHT UND ZUSAMMENSETZUNG DER VERWENDETEN MATERIALIEN LAUT HERSTELLERANGABEN (95) (96) .....	21
TABELLE 3 BEWERTUNG DER EFFEKTSTÄRKE $\varepsilon^2$ NACH (REA LM 2014) (99) .....	27
TABELLE 4 DESKRIPTIVE STATISTIK .....	28
TABELLE 5 KRUSKAL WALLIS TEST DER L*A*B*C*H° WERTE BEI GLEICHER HÖHE UND UNTERSCHIEDLICHEN VITA KERAMIKEN (MK®II, SUPRINITY® HT, SUPRINITY® T).....	33
TABELLE 6 PAARWEISE VERGLEICHE NACH DWASS-STEEL-CRITCHLOW-FLIGNER DER L*A*B*C*H- WERTE ZWISCHEN DEN VITA KERAMIKEN MK® II, SUPRINITY® T UND SUPRINITY® HT BEI DEN HÖHEN 1MM, 1,5MM UND 2MM .....	33
TABELLE 7 $\Delta E$ ZWISCHEN DEN KERAMIKEN NACH HÖHE.....	35
TABELLE 8 KRUSKAL-WALLIS-TEST ZWISCHEN DEN HÖHEN JE MATERIAL .....	36
TABELLE 9 PAARWEISE VERGLEICHE ZWISCHEN DEN HÖHEN (1MM, 1,5MM UND 2MM) JE MATERIAL (VITA MKII, VITA SUPRINITY® HT UND VITA SUPRINITY® T).37	
TABELLE 10 $\Delta E$ (L*A*B*) ZWISCHEN DEN HÖHEN JE KERAMIK.....	38

## 1 Einleitung / Ziel der Dissertation

Farben prägen unser Leben und beeinflussen unsere Wahrnehmung sowie unsere Realität. Sie haben Auswirkungen auf unser Wohlbefinden, wobei ihr Eindruck subjektiv ist. Da Farben in vielen Bereichen des Lebens von großer Bedeutung sind, spielen sie auch in der Ästhetik der rekonstruktiven Zahnheilkunde eine wichtige Rolle. Besonders die Keramikwerkstoffe ermöglichen eine präzise Nachahmung natürlicher Zähne und stellen somit einen Meilenstein in der ästhetischen Zahnmedizin dar. Anfangs waren keramikverblendete Metallkonstruktionen der Goldstandard, aber durch die zunehmend präziseren CAD/CAM-Systeme rücken Vollkeramikrestorationen in den Fokus des Praxisalltags. Monolithische Systeme sind aufgrund ihrer einfachen Herstellbarkeit und der überzeugenden Ästhetik besonders attraktiv. Entscheidend für den Erfolg einer keramischen Restauration sind nicht nur eine einfache Handhabung, Passgenauigkeit und Langlebigkeit, sondern auch ein überzeugendes Ergebnis hinsichtlich der Farbe, das mit den aufwendigen Verblendungen zahntechnischer Labore mithalten kann. Monolithisch gefräste Keramiken können zwar nachträglich bemalt und damit farblich gestaltet werden, jedoch sollten sie selbst vorhersehbare und reproduzierbare Farbergebnisse liefern, um ein ästhetisch überzeugendes Endergebnis zu erzielen. In der zahnmedizinischen Praxis ist es von entscheidender Bedeutung, dass das Farbmesssystem, welches zur exakten Farbbestimmung am Patienten eingesetzt wird, mit der entsprechenden Keramikfarbe für die zahntechnische Herstellung übereinstimmt. Ein konsistenter Farbschlüssel für alle Keramiksysteme ist dabei unerlässlich, um sicherzustellen, dass die gemessene Farbe präzise reproduziert werden kann. Das Hauptziel dieser Untersuchung besteht darin, mithilfe des Photospektralphotometers Thermo Fisher™ Evolution™ 600 (Thermo Fisher™ Scientific, Waltham, USA), festzustellen, ob zwischen verschiedenen Keramiksystemen der Firma Vita (VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG, Bad Säckingen, Deutschland) in der Farbskala A2 signifikante farbliche Abweichungen festzustellen sind. Zusätzlich wird erörtert, wie sich die verschiedenen Keramiken in das gesamte farbliche Spektrum einfügen lassen, um eine solide Grundlage für die Farbauswahl im täglichen Praxisbetrieb zu schaffen.

## 2 Literaturdiskussion

### 2.1 Physikalische Grundlagen

#### 2.1.1 Licht

Der Begriff Licht umfasst sowohl das physikalische Phänomen, welches unabhängig von der menschlichen Wahrnehmung betrachtet werden kann, als auch den Sinneseindruck "Licht", welcher erst durch die menschliche Wahrnehmung entsteht. Es ist wichtig, diese beiden Bedeutungen des Begriffs Licht deutlich zu unterscheiden (1, 2).

Licht ist der Bereich der elektromagnetischen Strahlung, welcher durch das menschliche Auge wahrgenommen werden kann. Dieser befindet sich zwischen 380nm und 780nm. Der kurzwelligere Bereich ist der UV-Bereich und der langwelligere der IR-Bereich (2).

Licht ist eine elektromagnetische Welle und somit Streuung, Brechung, Absorption und Interferenz unterworfen.

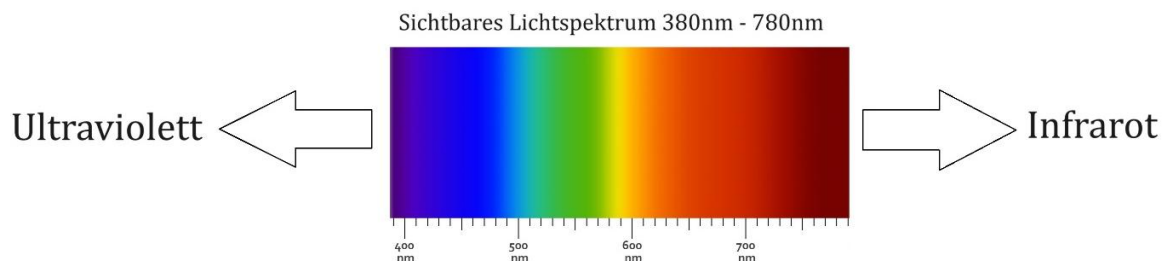


Abbildung 1 Spektrum des sichtbaren Lichts (eigene Abbildung)

#### 2.1.2 Transmission und Opazität.

Transmission stellt eine grundlegende physikalische Eigenschaft dar, welche die Fähigkeit eines Mediums quantifiziert, elektromagnetische Wellen zu durchdringen (1). Der Transmissionsgrad, ein Parameter, der im Zusammenhang mit Transmission steht, beschreibt das Verhältnis des transmittierten Lichtanteils eines Mediums zur ursprünglichen Lichtintensität. Gegensätzlich dazu steht die Opazität, welche als Maß für die Undurchlässigkeit eines Mediums fungiert und häufig mit einer Art Trübung einhergeht (1).

Nicht transmittiertes Licht unterliegt entweder der Absorption durch das Medium oder wird in Richtung der Lichtquelle reflektiert. Diese Reflexion kann unter einem Winkel von  $180^\circ$  erfolgen, was oft einen glänzenden Effekt zur Folge hat. Die Beschaffenheit der Oberfläche, sei sie matt oder poliert, beeinflusst maßgeblich das Ausmaß dieser Reflexion (3).

Es ist wichtig anzumerken, dass die Summe aus Transmission, Absorption und Reflexion stets den Wert 1 beträgt, gemäß den Prinzipien des Energieerhaltungsgesetzes (1).

### 2.1.3 Fluoreszenz

Fluoreszenz beschreibt das Phänomen, dass bei bestimmten Wellenlängen von einem Werkstoff fluoreszierendes Licht durch Anregung von elektromagnetischen Wellen emittiert wird (1). Bei menschlichen Zähnen wird Fluoreszenz bei Wellenlängen im ultravioletten Bereich bemerkbar. Dementsprechend sollten keramische Materialien, wenn möglich, ebenfalls fluoreszieren können, um den keramischen Restaurationen eine lebendige Ausstrahlung zu verleihen. Hierbei kann die Fluoreszenz durch seltene Erdelemente wie Europium oder Ytterbium bewirkt werden (4, 5).

### 2.1.4 Opaleszenz

Opaleszenz entsteht dadurch, dass nur selektiv Licht durch einen Werkstoff transmittiert wird und so teilweise absorbiert und teilweise reflektiert wird. Reflektiertes Licht führt zu einer bläulichen Erscheinung, da blaues Licht kurzwelliger ist und somit reflektiert wird. Langwelliges orangenes Licht dringt eher durch die Strukturen und somit erscheint das transmittierte Licht orangefarben. Dieser Effekt ist hauptsächlich am Zahnschmelz zu beobachten, tritt jedoch auch am menschlichen Dentin auf (6). Um eine opaleszente Wirkung zu erzielen, enthalten Dentalkeramiken in der Regel  $ZrO_2$  und  $Y_2O_3$ , um ein starkes Ungleichgewicht im Brechungsindex hervorzurufen (7, 8).

### 2.1.5 Metamerie

Unter verschiedenen Lichtquellen können bestimmte Farbpigmente unterschiedliche Farben aufweisen, was besonders deutlich wird, wenn metallkeramische und vollkeramische Restaurationen nebeneinander platziert werden. Während die Restaurationen bei der Anprobe

und unmittelbar nach dem Eingliedern in der Praxis möglicherweise nahezu identisch erscheinen, so können diese gegebenenfalls unter verschiedenen Lichtbedingungen Unterschiede zeigen (9). Insbesondere durch die unterschiedlichen spektralen Eigenschaften von Metallkeramik und Vollkeramik kann dieser Effekt hervorgerufen werden (9). Daher ist es erforderlich, beim Vergleich der Farben zweier Objekte auf ein Spektralphotometer zurückzugreifen (10, 11).

### 2.1.6 Grundlagen der Farbempfindung

Für eine Farbempfindung im klassischen Sinne benötigt man Licht, ein farbiges Medium und die menschliche Farbwahrnehmung (12). Da Licht lediglich eine physikalische Größe darstellt und Farbe das subjektive Empfinden beschreibt, wird durch die sogenannte Farbmetrik versucht, diese Wahrnehmung messbar zu machen. Diese basiert auf den Zapfen im menschlichen Auge, welche jeweils für die Wahrnehmung von Rot, Blau und Grün zuständig sind. Hierbei wird die Helligkeit einer Farbe durch die Summe der Nervensignale bestimmt. Die Farbe selbst lässt sich anhand der Verteilung auf die einzelnen Rot- (rr), Grün- (rg) und Blau- (rb) Zapfen beschreiben. Die Summe dieser Signale ergibt bei jeder Farbe immer den Wert 1, wodurch zur Bestimmung einer Farbe lediglich zwei Werte notwendig sind (2, 13). Da die Farbwahrnehmung eine subjektive Wahrnehmung des Lichts durch den Menschen ist, kann sie nicht rein physikalisch gemessen werden. Eine Farbe ist jedoch messbar. Farben lassen sich zum Beispiel, wie in diesem Fall, mittels eines Spektralfotometers messen (1, 13). Hierbei kann Licht nun auf ein Medium treffen und in bestimmten Wellenlängen absorbiert oder reflektiert werden. Die Summe der reflektierten Wellenlängen ergibt die physikalisch messbare Farbe, welche mittels verschiedener Methoden beschrieben werden kann (2). Um die Wirkung auf das menschliche Auge objektiv zu beschreiben, bestimmt man die Farbvalenz durch eine valenzmetrische Auswertung des Farbreizes und verwendet sie als Farbmaßzahl. Hierzu integriert man die Farbreizfunktion und multipliziert sie mit einer der Normalspektralwertfunktionen. So erhält man die Normfarbwerte X, Y und Z (2).

### 2.1.7 Das L\*a\*b\* Farbspektrum

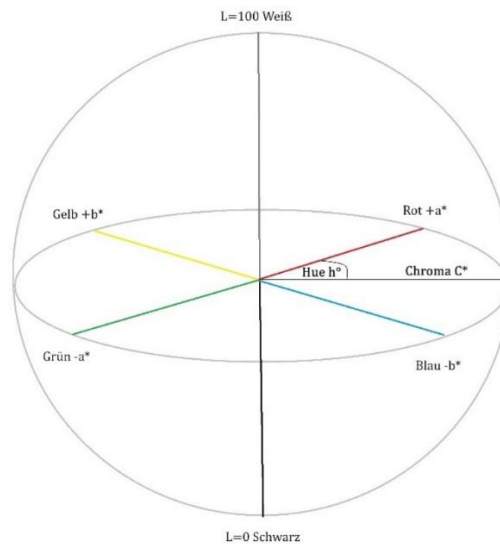


Abbildung 2 CIE L\*a\*b\* und CIE L\*C\*h° Farbraum

Der L\*a\*b\* Farbraum kann aus dem XYZ-Farbraum berechnet werden. L\* gibt dabei die Helligkeit nach der Gegenfarbtheorie an, a\* steht für die Rot-Grün Buntheit und b\* für die Gelb-Blau Buntheit (14). Der L\*a\*b\* Farbraum beschreibt im 3-dimensionalen Raum alle wahrnehmbaren Farben. Wenn die a\* oder b\* Skala positiv oder negativ größer wird, wird die Farbe rötlicher, grünlicher, bläulicher oder gelblicher. Die Skala des CIE L\*a\*b\*-Farbraums reicht von -128 bis 127 und basiert auf einer wahrnehmungsbezogenen Farbabstimmung, die sich auf den Normalbeobachter unter Standardlichtbedingungen bezieht und unabhängig von den verwendeten Geräten ist. Weiterführend können Farbdifferenzen mittels der euklidischen Formel berechnet werden (2, 13).

$$\Delta E_{Lab} = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}$$

Abbildung 3 Formel 1 euklidische Formel (2, 14)

### 2.1.8 L\*C\*h° Farbraum

Aus den L\*a\*b\* Werten des CIELAB Farbraums können die L\*C\*h° Werte berechnet werden. Der L\*C\*h° Farbraum entspricht den Koordinaten des L\*a\*b\* Farbraums, ist jedoch

anschaulicher.  $L^*$  bleibt dabei unverändert und beschreibt die Helligkeit,  $C^*$  beschreibt die Sättigung oder Chromazität und wird im Farbraum als Abstand von der Mitte definiert. Der Bunttonwinkel  $h^\circ$ , welcher den Farbton bestimmt, wird als Winkel der chromatischen Achse im Farbraum dargestellt (2).

$$L_{Lab}^* = L_{LCh}^*$$

Abbildung 4 Formel 2 Berechnung der Koordinate  $L^*$  [2]

$$C_{ab}^* = \sqrt{(a^{*2}) + (b^{*2})}$$

Abbildung 5 Formel 3 Berechnung der Koordinate  $C^*_{ab}$  [2]

$$h^\circ_{ab} = \arctan\left(\frac{b^*}{a^*}\right)$$

Abbildung 6 Formel 4 Berechnung der Koordinate  $h^\circ$  [2]

### 2.1.9 Bewertung von $\Delta E$

Der Farbabstand  $\Delta E$  basiert auf der Farbvalenz, die wiederum durch die Gewichtung der Farbreize auf die Zapfen definiert wird (13).

$\Delta E$ -Wert von 1 beschreibt eine tolerierbare Farbabweichung, die vom durchschnittlichen Betrachter („usual user“) nicht unterschieden werden kann. Ein Farbunterschied von mehr als 5 wird in der Regel als neuer Farbton wahrgenommen. Ein „usual user“ kann, abhängig von seiner Sensibilität und seinem Farbseh-Training, Farbunterschiede von einem  $\Delta E$  zwischen 1 und 2,5 unterscheiden (15, 16).

Die klinische Farbanpassung kann anhand von  $\Delta E$ -Werten bewertet werden (17). Zudem muss zwischen einem wahrgenommenen Farbunterschied (PT) und einem akzeptierten Farbunterschied (AT) bei einer zahnärztlichen Restauration unterschieden werden. PT beschreibt einen  $\Delta E$ -Werte, bei dem 50% der Probanden einen Farbunterschied wahrnehmen können. AT beschreibt den Akzeptabilitätswert, das ist der  $\Delta E$ -Wert, bei dem 50% der Probanden einen Farbunterschied bei einer zahnärztlichen Restauration noch akzeptieren würden. Der 50:50% wahrgenommene Wert eines Farbunterschieds (PT), bei dem 50% der

Probanden einen Unterschied bemerken konnten, ist je nach Studie zwischen  $\Delta E$  1 und 1,9 (17, 18). Der akzeptierte 50:50%  $\Delta E$ -Wert (AT) von einem Farbunterschied schwankt zwischen  $\Delta E$ 2,7 und  $\Delta E$ 4,2 (18, 19). Die meisten Studien beziehen sich auf  $\Delta E$  von 3,7. In einer Studie von Kashayar et al. von 2014 (20) wurde die Verwendung der  $\Delta E$ -Werte für Akzeptanz (AT) und Wahrnehmbarkeit (PT) analysiert. Die meisten Studien in der zahnärztlichen Werkstoffkunde beziehen den PT ( $\Delta E$  1) und AT ( $\Delta E$  3,7) Wert aus wenigen veralteten Studien. Auf diesem Gebiet bedarf es weiterer Forschung, um diese Werte für den zahnmedizinischen Gebrauch aussagekräftig bestimmen zu können. Das Auge bewertet zudem Unterschiede im Farbton stärker als Unterschiede in der Helligkeit oder Sättigung (21).

Für die Farbunterschiede in dieser Studie wurden die Bewertungsgrenzen wie folgt festgelegt:

Tabelle 1 Bewertung von  $\Delta E$ -Werten für Zahnmedizinische Restaurationen (22)

---

<b><math>\Delta E</math></b>	<b>Bewertung</b>
0,0 – 0,5	nahezu unmerklich
0,5 – 1,0	für das geübte Auge bemerkbar
1,0 – 2,0	geringer Farbunterschied
1,2	50:50% Wahrnehmungsgrenze ( <b>PT</b> ) (18)
2,0 – 4,0	wahrgenommener Farbunterschied
2,7	50:50% Akzeptabilitätsgrenze ( <b>AT</b> ) (18)
4,0 – 5,0	wesentlicher, selten tolerierter Farbunterschied
4,2	klinisch inakzeptabler Farbunterschied (19)
oberhalb 5,0	die Differenz wird als andere Farbe bewertet

---

## 2.2 Dentale Farbbestimmung

Die Beschaffenheit und Zusammensetzung eines Zahnes haben großen Einfluss auf seine Farbe (23). Das Verhältnis von Schmelz und Dentin beeinflusst die Transluzenz und Opazität des Zahnes und somit auch Farbton, Farbsättigung und Helligkeit (24). Nicht nur Verfärbungen, sondern auch die Anatomie und Nachbarstrukturen spielen eine große Rolle in der Farberscheinung eines Zahnes. Auch die Beleuchtung und ihre Intensität können dazu führen, dass Zähne unterschiedlich erscheinen und somit die Farbbestimmung der Zähne beeinflussen (25).

### 2.2.1 Einfluss der Zahnanatomie auf die Farbe

Während Schmelz sehr transparent und lichtdurchlässig ist, weist Dentin eine höhere Opazität auf, die mit dem Alter zunimmt. Je nach Schmelzmasse und Dentinbeschaffenheit können die Zähne opaker erscheinen (23). Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass Zähne im Alter opaker werden, da das Chroma des Dentins durch Sekundärdentinbildung und Schmelzverlust (Abrasion, Attrition, Abfraktion) deutlich sichtbarer wird (23). Neben der Opaleszenz beeinflussen auch die Fluoreszenz des Dentins, die Reflektion des Dentins an der Schneidekante (26) (der sogenannte Halo-Effekt (2)) und die Oberflächenbeschaffenheit eines Zahns die Farbwahrnehmung. Bei einer Zahnrestauration müssen diese verschiedenen Einflüsse berücksichtigt werden, um ein ästhetisches Ergebnis zu erzielen (2, 25, 27).

### 2.2.2 VITA classical Farbskala A1 - D4®

Die herkömmliche Methode zur Bestimmung der Zahnfarbe erfolgt mit einer Farbskala. Es gibt verschiedene Farbwahlsysteme von verschiedenen Herstellern. In diesem Fall wurde die am weitesten verbreitete und zu dem Hersteller der verwendeten Keramiken passende VITA classical-Farbskala (VITA Zahnfabrik, Bad Säckingen) verwendet, nach der die Keramiken farblich klassifiziert werden (28, 29). Hierbei wird eine Zahnfarbe in einen Farbton (A/B/C/D) und Helligkeit (1/2/3/4) klassifiziert. Dabei ist A1 - A4 rötlich-bräunlich, B1 - B4 rötlich-gelblich C1 - C4 Grautöne und D2 - D4 rötlich-grau (25). Die Vita classical Farbskala A1 - D4® orientiert sich an den empirisch häufigen Zahnfarben und ist somit für die sehr dunklen und sehr hellen Randbereiche der Zahnfarben weniger abgedeckt, jedoch ist sie ein einfaches und schnelles Verfahren zur Zahnfarbbestimmung und somit weit verbreitet (30, 31). Die Keramiken, welche in dieser Studie verwendet werden, sind mit dem Farbwert A2 klassifiziert.



Abbildung 7: Vita classical® A1-D4

### 2.2.3 Vita Farbskala Toothguide 3D MASTER®

Die umfangreichste Farbskala von Vita ist der VITA Toothguide 3D-MASTER® (30). Laut Herstellerangaben sind hier die Farbmuster nach optimaler Abdeckung des Farbraums angeordnet. Die Farbauswahl erfolgt in 3 Schritten über die Bestimmung von Helligkeit,

Farbintensität (Chroma) und Farbton (Hue). Zudem können Zwischenfarben durch Mischen erzielt werden. Dieses System erleichtert eine genaue Beschreibung der Farbe und die Kommunikation zwischen Zahnarzt und Zahntechniker. Auch diverse Studien zeigen, dass der VITA Toothguide 3D-MASTER® Farbring eine genauere Beschreibung der Zahnfarbe ermöglicht als die VITA classical-Farbskala (32-34). Für konventionelle Feldspatverblendkeramiken wie zum Beispiel der VITA VMK Master® werden 3D-MASTER® Farben angeboten. Auch bei CAD-CAM-Keramikblöcken gibt es für den hochästhetischen Bereich Keramiken, welche mit dem VITA SYSTEM 3D MASTER® klassifiziert werden, wie zum Beispiel die VITA ENAMIC®, die Vita Mk® II und die Vita Suprinity®. Für die Vergleichbarkeit mit anderen Studien wurden Keramikblöcke in der VITA classical Farbskala A1 - D4® gewählt.



Abbildung 8: Vita Farbskala Toothguide 3D MASTER®

#### 2.2.4 Farbbestimmung am Patienten

Aufgrund der Vielzahl der Einflussfaktoren auf die Farbe empfiehlt die DGZMK (35) ein standardisiertes Verfahren. Die visuelle Farbbestimmung sollte unter tageslichtähnlichen Bedingungen durchgeführt werden, 2000 Lux sind optimale Beleuchtungsverhältnisse (36).

Zudem sollte die Farbbestimmung von einem farbtüchtigen und geschulten Bewerter durchgeführt werden (37). Auffällige Farben sollten aus der Umgebung entfernt oder verdeckt werden, beispielsweise Lippenstift, auffällige Tapete, bunte Kleidung. Zudem ist es empfehlenswert, bei ästhetisch anspruchsvollen Restaurationen einen erfahrenen Zahntechniker bei der Farbbestimmung hinzuzuziehen (35).

### 2.2.5 Digitale Zahnfarbbestimmung

Aufgrund der Subjektivität von herkömmlichen Zahnfarbbestimmungen, der möglichen Farbsehschwächen von Zahnärzten (38) und der damit einhergehenden Unsicherheit dieser Methodik (39, 40) gibt es einen Bedarf für eine objektive, umgebungsunabhängige und interpretationsfreie Methode. Optoelektronische Farbmessgeräte können hier Abhilfe leisten, wie zum Beispiel das VITA Easyshade® (VITA-Zahnfabrik, Bad Säckingen), welches reproduzierbare Messergebnisse liefert (41-43), jedoch sagt dies nichts darüber aus, ob auch tatsächlich die richtige Farbe gemessen wird. Auch einige Intraoralscanner wie der 3Shape TRIOS® (3Shape A/S, Kopenhagen) haben mittlerweile eingebaute Farbbestimmungssysteme in der intraoralen Kamera, diese weichen jedoch signifikant von den Werten der optoelektronische Farbmessgeräte ab (44, 45), sind jedoch genauer als die herkömmliche Messmethode mittels visueller Messmethode (46, 47). Eine Studie von Igiel et al. (48) hat das Farbmessgerät VITA Easyshade® mit der Farbmessmethode mittels Farbring verglichen. Das Farbmessgerät lieferte verlässlichere Farbergebnisse als die visuelle Farbmessmethode. Eine Studie von Liberato et al. bestätigt die höhere Verlässlichkeit der Farbmessgeräte. In dieser Studie schnitt die Farbmessung mittels Intraoralscanner am besten ab (49).

## 2.3 Dentalkeramik

### 2.3.1 Übersicht der Dentalkeramiken

Dentalkeramiken sind spröde und steife Werkstoffe, die hinsichtlich Farbe und Transluzenz zahntechnisch gestaltet werden können. Werkstoffkundlich gliedert sich die Welt der Dentalkeramiken in zwei Teilgebiete: die Silikatkeramiken, zu denen die Lithiumdisilikatkeramiken und leuzitverstärkten Keramiken gehören, und die Oxidkeramiken (25, 27). Dentalkeramiken können sowohl als keramische Verblendung als auch als vollkeramischer Zahnersatz Verwendung finden. Die gute Biokompatibilität und das große Interesse an natürlich aussehendem Zahnersatz lenken jedoch eine immer größere

Aufmerksamkeit vor allem auf Vollkeramiksysteme. Unter Vollkeramik fallen alle mineralischen zahnfarbenen Restaurationen, welche ohne metallische Gerüste konstruiert sind. Vollkeramische Restaurationen können zahntechnisch auf unterschiedliche Weise hergestellt werden. Hierbei haben oxidkeramische Materialien aufgrund der Stabilität einen größeren Indikationsbereich, während Silikatkeramiksysteme sich in der Indikation je nach Modifikation auf Einzelzahnrestaurationen beschränken, jedoch durch ihre Transluzenz deutlich ästhetischer sind (23). Diese Arbeit konzentriert sich auf maschinell gefräste CAD-CAM-Silikatkeramiksysteme, da diese hauptsächlich im ästhetisch relevanten Frontzahnbereich Verwendung finden und hier die Farbe eine besonders wichtige Rolle spielt (50, 51).

### 2.3.2 Herstellungsprozess herkömmlicher Dentalkeramiken

Pulverförmiges Material wird mit einer Flüssigkeit zu einer breiigen Masse verarbeitet. Aus dieser Keramikmasse wird die Restauration geformt, welche bei Temperaturen zwischen 700 und 2000 °C gebrannt wird. Bei Silikatkeramiken sind die Ausgangssubstanzen meist Feldspat, Quarz und Kaolin, welche für bessere Kristallisation unter anderem mit Leuzit verstärkt werden können (24). Bei Oxidkeramiken werden Metalloxide, wie zum Beispiel Zirkonoxide ( $ZrO_2$ ), verwendet, welche ebenfalls als Flüssigkeits-Pulver-Gemisch verarbeitet werden können (52). Die Farbgebung der Keramiken erfolgt über brennfeste Oxide von verschiedenen Metallen, beispielsweise Kobalt für Blau, Chrom für Grün, Titan für Gelb, Eisen für Rot. Das Pulver mit der geeigneten Zusammensetzung und der korrekten Farbmischung wird vom Hersteller zu Scherben (Fritten) gebrannt und diese anschließend für den zahntechnischen Gebrauch zerkleinert und zu einem Pulver gemahlen. Da die Metalloxide bei unterschiedlichen Temperaturen unterschiedlich reagieren, muss die Temperatur beim Brennvorgang genau kontrolliert und nach Protokoll gebrannt werden. Ein weiterer Punkt ist die Volumenänderung beim Brennvorgang, welche von 15 Vol% bis zu 40 Vol% betragen kann. Dies muss bei der Gestaltung mit einkalkuliert werden und ist abhängig von der Packungsdichte der Teilchen in der Modelliermasse (24, 52).

### 2.3.3 Monolithisch gefräste Keramiken

Aufgrund der Weiterentwicklung der CAD-CAM-Keramiksysteme gibt es mittlerweile die Möglichkeit, verblendfreie, sogenannte monolithische Restaurationen, welche aus einem Keramikblock gefräst werden, ästhetisch ansprechend zu gestalten. Die CAD-CAM-Technik, bei der eine Restauration digital designt und anschließend maschinell aus einem Block

maschinell gefräst wird, vereinfacht den Prozess der Herstellung von Dentalkeramiken. Da im silikatkeramischen Spektrum die Keramiken schon zu Rohlingen mit der korrekten Farbe gebrannt sind, entfällt der fehleranfällige Brennprozess mit der Volumenschumpfung. Zudem werden monolithische Keramiken nicht verblendet. Somit wird der zahntechnisch aufwändige Schritt der Verblendung umgangen und es entfällt das Risiko einer Verblendfraktur (53). Außerdem kann minimalinvasiv präpariert werden, was eine ästhetische Alternative zur metallischen Vollgusskrone im Seitenzahnbereich darstellen kann (23, 54). Monolithische Restaurationen können durch die Zeitersparnisse in einer Sitzung angefertigt werden, was sowohl dem Patienten als auch dem Zahnarzt zugutekommt. Zudem haben monolithische Lithiumdisilikatbrücken eine bessere Überlebenswahrscheinlichkeit als verblendete Brückenkonstruktionen (55). Somit werden monolithische Restaurationen aus zeitlicher und ökonomischer Sicht im Praxisalltag immer präsenter werden, was die Notwendigkeit einer natürlichen und reproduzierbaren Farbgestaltung der Keramiksysteme bekräftigt. Die farbliche Gestaltung der monolithischen Keramiken erfolgt, wenn notwendig, über Bemalen mit geeigneten Keramikfarben und einem Glanzbrand. Das Bemalen soll jedoch nur charakteristische Farbverläufe und nicht die komplette Farbe der Restauration vorgeben. Aus diesem Grund ist die Grundfarbe des Keramikblocks entscheidend für einen ästhetischen Erfolg (50, 51). Nicht nur die Farbe der keramischen Restauration hat einen Einfluss auf die Farberscheinung der Restauration in vivo, sondern auch die Dicke der Keramik, die Farbe des Klebers, die Stumpffarbe oder die Abutmentfarbe und auch die Transluzenz der Keramik (56-59). Die Einflüsse dieser Faktoren werden umso größer, je dünner die Keramik gestaltet ist (59).

#### 2.3.4 Monolithische, implantatgetragene Restaurationen

Bei den implantatgetragenen Restaurationen verhält es sich ähnlich wie bei dentalgetragenen Restaurationen. Bei vollkeramischen Keramiken, welche mit Silikatkeramik verblendet sind, und bei metallkeramischen Suprakonstruktionen ist die häufigste Komplikation das Abplatzen der Verblendkeramik (60). Diese ist bei implantatgetragenen Restaurationen aufgrund der fehlenden Resilienz des Desmodonts noch größer als bei zahngetragenen Restaurationen, da die Kraftübertragung auf die Verblendung durch die fehlende Intradierbarkeit der Implantate erhöht ist (61). Monolithische Restaurationen unterliegen deutlich weniger technische Komplikationen (62, 63) und können auch bei guter Politur für Bruxismuspatienten als Versorgung in Betracht gezogen werden (64). Für monolithische Restaurationen auf Implantaten gibt es noch nicht genügend klinische Langzeitdaten, um eindeutige Aussagen treffen zu können. Eine Studie von Spies et al. (65, 66) berichtet von einer 5 Jahre Überlebensrate von 100% für zementierte Implantatkronen aus monolithischem

Lithiumdisilikat. Für verblendete Implantatkronen wird eine 5 Jahre Überlebensrate von 89% bei verblendeten Zirkonoxidkronen beobachtet (67).

### 2.3.5 Leuzitverstärkte Glaskeramiken

Leuzitverstärkte Keramiken zeichnen sich durch gezielt erzeugte Leuzit-Kristalle aus, die durch Oberflächenkristallisation entstehen und homogen in der Glasphase verteilt sind (54). Diese Leuzit-Kristalle weisen einen größeren Wärmeausdehnungskoeffizienten im Vergleich zur Glasphase auf. Durch Abkühlung unter Druckspannung wird die Glasphase in einen Zustand erhöhter Druckspannung versetzt, was eine Steigerung der Festigkeit zur Folge hat (68). Darüber hinaus besitzt die kristalline Phase die Fähigkeit, Rissenergie zu absorbieren und somit der Ausbreitung von Rissen entgegenzuwirken. In der Gesamtbetrachtung zeigen leuzitverstärkte, glasbasierte Keramiken eine erhöhte Festigkeit im Vergleich zu konventionellen Feldspatkeramiken (26).

### 2.3.6 Lithiumsilikatkeramiken

In dieser Silikatkeramik besteht ein Teil der Struktur aus Lithiumdisilikat-Kristallen, die in einer vernetzten, stabförmigen Form vorliegen und eine ungefähre Länge von 3 bis 6  $\mu\text{m}$  aufweisen (69). Aufgrund der Anwesenheit dieser Lithium-Disilikat-Kristalle sind die Biegefestigkeiten deutlich höher, bis zu doppelt so hoch im Vergleich zu leuzitverstärkten Keramiken (70). Diese verbesserten mechanischen Eigenschaften ermöglichen ihre Anwendung als Werkstoffe für dreigliedrige Front- und Prämolarenbrücken (71).

Bei der zirkonoxidverstärkten Silikatkeramik Vita Suprinity® erfolgt die Verstärkung sowohl durch Lithium-Silikat-Kristalle als auch durch die Zugabe von Zirkonoxid mit einem Anteil von etwa 10% (72).

## 2.4 Einflüsse auf die Farbe von Dentalkeramiken

Nicht nur die Auswahl des Werkstoffes kann Einfluss auf die Farbwirkung nehmen, sondern auch die Glasur oder Politur (73). Um diese Unterschiede so gering wie möglich zu halten, werden die Keramiken nach dem maschinellen Fräsen gemessen, ohne anschließende Weiterbehandlung. In der Literatur (74, 75) wird beschrieben, dass die Stärke der Keramik

eine Auswirkung auf die Farbwahrnehmung hat. Auch die Umgebungsfarbe und Hintergrundfarbe haben einen Einfluss auf die Farbwahrnehmung (13, 76, 77) und Messung. In einer Studie von Saláta aus dem Jahr 2023 ist der Einfluss des Hintergrundes umso größer, je dünner und transluzenter die Keramik ist (78). Für einen Messaufbau resultiert die Notwendigkeit eines einheitlichen Hintergrundes und einer immer gleichbleibenden Umgebung für die photospektrometrische Messung.

#### 2.4.1 Einfluss der Politur und Oberflächenbehandlung auf die Farbe

Jeglicher Auf- und Abtrag einer Keramik kann einen Einfluss auf die Farbwahrnehmung und das photospektrometrische Verhalten der Keramik haben. So wurden in einer Studie von Akar et al. (79) verschiedene Methoden zur Oberflächenbehandlung an Aluminiumoxidkeramiken, Zirkonoxidkeramiken und Lithiumdisilikatkeramiken untersucht. Signifikante Unterschiede in der Farbe wurden sowohl mit der Politur, mit und ohne Paste, als auch mit einer Glasur gemessen. Lediglich in der Zirkonoxidkeramik konnten keine signifikanten Farbunterschiede untersucht werden. In einer Studie aus dem Jahr 2016 von Özarlan et al. (80) wurde die Hybridkeramik VITA Enemic® nach verschiedenen Oberflächenbehandlungen auf Farbveränderungen untersucht. Auch hier ließen sich signifikante Farbunterschiede zwischen den verschiedenen Oberflächenbehandlungen feststellen.

#### 2.4.2 Einfluss der Dicke der Keramik auf die Farberscheinung

Die Dicke einer Dentalkeramik beeinflusst unter anderem, wie die Farbe endgültig wirkt (81) und wie sehr der Hintergrund die Farberscheinung mit beeinflusst (82, 83). Jedoch geht mit einer erhöhten Deckkraft auch eine erhöhte Opazität einher (84) was wiederum eine verringerte Transluzenz bedeutet. Die Deckkraft einer Keramik ist vor allem dann entscheidend, wenn der Hintergrund kein natürlicher Zahn ist, sondern zum Beispiel Titanabutments, ein Metallgerüst oder Zirkonoxidkeramik (85). Je nach Hintergrundmaterial, Keramikopaleszenz und Befestigungsmaterial müssen die Keramiken unterschiedliche Mindeststärken aufweisen (83, 85). Beispielsweise brauchen CAD-CAM chairside Keramiken wie Vita Suprinity® T im Farbraum A2 laut Studie eine Mindeststärke von 1,5mm und VITA Suprinity® HT von 2mm (82). Opaleszente Befestigungsmaterialien können die Deckkraft einer Keramik unterstützen und  $\Delta E$ -Werte unterhalb der Wahrnehmungsgrenze (PT) erreichen mit einer Dicke von nur 1mm (82, 86). Somit spielen Dicke und Hintergrund und vor allem auch Opazität der Keramik eine große Rolle und beeinflussen das ästhetische Endergebnis. Aus

diesem Grund müssen diese Faktoren bei der Farbwahrnehmung und Farbwirkung einer dentalkeramischen Restauration mitbegutachtet werden.

#### 2.4.3 Einfluss der Materialien auf einen Farbunterschied im gleichen Farbraum

In der aktuellen Forschung gibt es Hinweise auf eine starke Abweichung der Farbe zwischen unterschiedlichen Keramiken im gleichen Farbraum. Eine Studie von Della-Bona et al. aus dem Jahr 2015 (87) berichtet zwischen den Keramiken im gleichen Farbraum  $\Delta E$ -Werte zwischen 6,3 und 13,4. Die Probendicke betrug dabei 1mm. Die Farbabstände zwischen den Keramiken in einem Farbraum war größer als zwischen den Farbräumen der einzelnen Keramiken. Bei den einzelnen Keramiken waren die Farbabstände zwischen A1 - A2 und A2 - A3  $\Delta E$  -Werte zwischen 1,2 und 8,8

In einer Studie aus dem Jahr 2016 von Pop-Ciutrila et al. (88) wurden zwei CAD-CAM-Hybridkeramiksysteme (VITA ENAMIC® Translucent; VITA ENAMIC® high Translucent) mit menschlichem Dentin im gleichen Farbraum verglichen. Keine der getesteten Keramiken konnte unterhalb der Akzeptabilitätsgrenze (AT) im Farbvergleich zu dem menschlichen Dentin liegen. In einer weiteren Studie von Pop-Ciutrila et al. aus dem Jahr 2021 (89) wurden erneut weitere Keramiksysteme mit menschlichem Dentin verglichen (Vita Suprinity-VS, Vita Enamic-VE (Vita Zahnfabrik) und Noritake Super Porcelain (Kuraray Noritake Dental)). Alle Keramiksysteme unterschieden sich statistisch signifikant vom menschlichen Dentin, wobei die zirkoninfiltrierte Glaskeramik Vita Suprinity® als einzige Keramik unterhalb der AT-Grenze im Farbvergleich zur Schmelzfarbe in 1mm Dicke liegt, jedoch oberhalb der PT-Grenze.

Auch im Bereich der Komposite wurden in vorherigen Studien große Farbunterschiede im gleichen Farbraum festgestellt. In einer Studie aus dem Jahr 2009 von William D. Browning (90) konnten Farbunterschiede  $\Delta E$  zwischen 3,9 und 22,8 gemessen werden.

## 3 Material und Methoden

### 3.1 Material

#### 3.1.1 Die Keramiken

Alle Keramiken sind CAD-CAM Materialien und werden vom Hersteller mit der Farbe A2 kodiert. Die Keramikblöcke der einzelnen Keramiken haben alle die gleiche LOT-Nummer und stammen aus einer Charge. Pro Keramik wurden 9 Blöcke gemessen. Aus jedem Block wurden 3 Probekörper hergestellt, welche eine Höhe von 1mm, 1,5mm und 2mm aufwiesen.

##### 3.1.1.1 Vita Mark® II

Bei der VITABLOC® Mark II Keramik (VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG; Bad Säckingen) handelt es sich um eine Feldspatkeramik mit einer Biegefestigkeit nach Politur von 130 MPa, welche sich als Indikation für kleine ästhetische Restaurationen wie Inlays, Onlays und Teilkronen eignet. Feldspatkeramiken sind gekennzeichnet durch einen hohen Glasanteil, welcher ihnen eine hervorragende Ästhetik, jedoch eine geringere Stabilität verleiht (91).

##### 3.1.1.2 Vita Suprinity®

Bei der Vita Suprinity® (VITA Zahnfabrik H. Rauter GmbH & Co. KG; Bad Säckingen) handelt es sich um eine zirkonoxidverstärkte Glaskeramik mit einer biaxialen Biegefestigkeit von 540 MPa (92). Die laut Hersteller empfohlenen Indikationen reichen vom Veneer bis zur Seitenzahnkrone. Zur Auswahl stehen Rohlinge in zwei Transluzenzstufen (T, HT) zur Verfügung (93).

#### 3.1.2 Die Fräse „inLab® MC X5®“

Die Fräse inLab® MC X5® (Sirona Dental Services GmbH, Bensheim, Germany) ist eine fünfschneidige Fräs- und Schleifeinheit, welche für die Zahntechnik konzipiert und laut Herstellerangaben für die Bearbeitung von Keramiken geeignet ist (94).

### 3.1.3 Zusammensetzung der Keramiken:

Tabelle 2 Übersicht und Zusammensetzung der verwendeten Materialien laut Herstellerangaben (95) (96)

<i>Keramik</i>	<i>Zusammensetzung (Gewichts-%)</i>	<i>Hersteller</i>	<i>Lot Nummer</i>
<i>Vita MK® II</i>	SiO <sub>2</sub> 56-64	Vita Zahnfabrik H.	90 000
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 20-23	Rauter GmbH & Co.	
	Na <sub>2</sub> O 6-9	KG	
	K <sub>2</sub> O 6-8		
	CaO 0,3-0,6		
	TiO <sub>2</sub> 0,0-0,01		
<i>Vita Suprinity® HT + Vita Suprinity® T</i>	SiO <sub>2</sub> 56 – 64	Vita Zahnfabrik H.	89151
	Li <sub>2</sub> O 15 – 21	Rauter GmbH & Co.	98820
	K <sub>2</sub> O 1 – 4	KG	
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 3 – 8		
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1 – 4		
	ZrO <sub>2</sub> 8 – 12		
	CeO <sub>2</sub> 0 – 4		
	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 0,1		
	Pigmente 0 – 6		

## 3.2 Methode

### 3.2.1 Herstellung der Probekörper

#### 3.2.1.1 Design

Mithilfe der CAD-Software inLab® CAM der Firma Dentsply Sirona (Sirona Dental Services GmbH, Bensheim, Germany) wurde ein E-förmiges Arbeitsstück designt, welches jeweils 3 Probekörper in der Größe von 11cm × 13cm mit einer Höhe von 1mm, 1,5mm und 2mm beinhaltet. Dies passt von der Dimension in alle Keramikblöcke der hier verwendeten Hersteller. Die Höhe wurde mittels einer digitalen Schublehre kontrolliert. Eine Abweichung von +/- 0,01mm wurde geduldet.

### 3.2.1.2 Schleifen mittels inLab® MC X5®

Für das Herausschleifen der Probekörper wurde die fünfschichtige Fräseinheit „inLab® MC X5®“ der Firma Dentsply Sirona (Sirona Dental Services GmbH, Bensheim, Germany) verwendet, welche speziell für zahntechnische Arbeiten konzipiert wurde und für das Bearbeiten von Dentalkeramiken geeignet ist. Der Computer mit der oben genannten Datei inLab® CAD wird ausschließlich für die Bedingung der inLab® MC X5® verwendet. In der Software wurde nun das designte Arbeitsstück einer Keramik zugeordnet, welches beim Wechsel einer Keramikart jedes Mal angepasst wurde. Anschließend sendet die Software die STL-Informationen an die Schleifmaschine, welche die Probekörper monolithisch im Subtraktionsverfahren herausschleift. Die Wartung der Maschine erfolgt in regelmäßigen, vom Programm vorgegebenen Abständen, welche das Wechseln der Schleifer, Reinigen der Kammer, Wechseln des Wasserfilters und Nachfüllen des Kühlwassers mit destilliertem Wasser und Warten der Spindel beinhaltet.

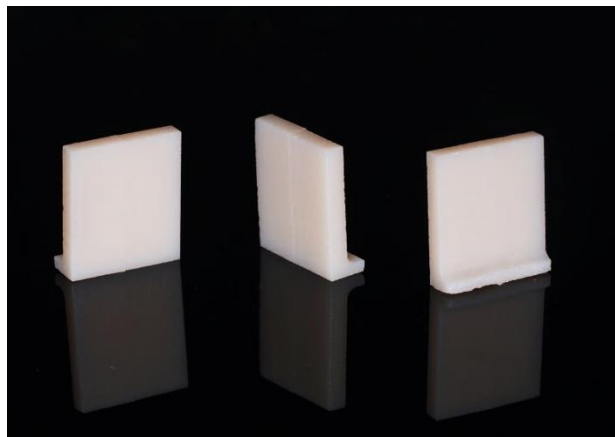


Abbildung 9 Keramikblöcke direkt nach dem Schleifprozess

### 3.2.1.3 Ausarbeitung und Kristallisierung

Nach dem Schleifen werden die Probekörper mit einem Handstück und einem Diamantschleifer voneinander getrennt und beim Mittelstück wird die Seite der dünneren Trennstelle geglättet. Die andere Seite der Trennstelle wird belassen, um als Marker für die

Ausrichtung im Spektrophotometer zu dienen, um sicherzustellen, dass alle Probekörper gleich ausgerichtet werden. Die Probekörper Vita Suprinity® HT und T werden nach Brennprotokoll nach Herstellerangaben in dem Ofen Ivoclar Vivadent Programat® P510 (Ivoclar Vivadent GmbH, Ellwangen, Germany) gebrannt. Es werden maximal 5 Probekörper pro Brennvorgang gebrannt, um eine gleichbleibende Brennkammertemperatur zu gewährleisten. Die Keramiken wurden bewusst nicht poliert oder glasiert, um alle Keramiken vergleichbar zu halten. Je Höhe und Keramik wurden 9 Probekörper hergestellt, was insgesamt 81 Probekörper ergibt.



*Abbildung 10 Ansicht der Probekörper*

#### *3.2.1.4 Aufbewahrung der Probekörper*

Die einzelnen Probekörper werden einer Prüfgruppe zugeordnet und systematisch sortiert und eingelagert. Sie werden licht- und staubgeschützt und bei gleicher Raumtemperatur gelagert.

#### *3.2.2 Fertigung des Adapters*

Mithilfe der CAD-Software "FreeCAD" wird ein Halter design (Abbildung 11), welcher die Prüfkörper genau zentral in dem Messfeld des Fotospektrometers positioniert. Um den Halter fixieren zu können, wurde ein Adapter (Abbildung 12) speziell für das Photospektrometer Thermo Scientific™ Evolution™ 600 design, in welchem der Halter mit Klemmpassung positioniert werden kann. Mit dem 3D-Drucker „Raised3D E2®“ (Raise 3D Technologies, Inc., USA) wird dieser Halter in weißer Farbe gedruckt und der Adapter in schwarzer Farbe.

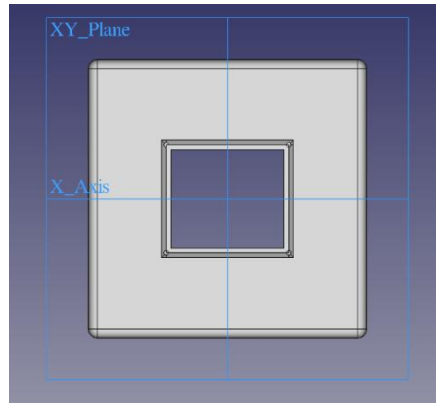


Abbildung 11 Design des Halters in „FreeCAD“

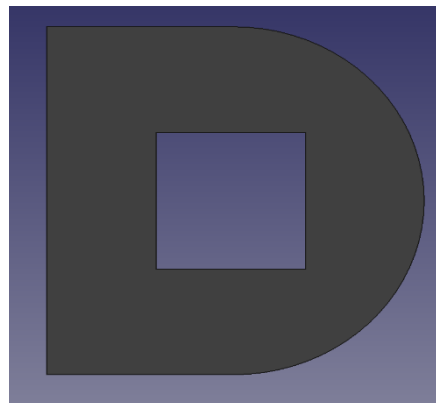
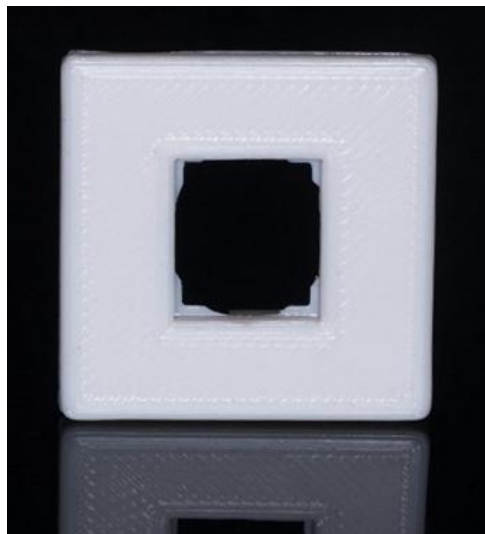


Abbildung 12 Design des Adapters für Thermo Scientific™ Evolution™ 600 in „FreeCAD“

### 3.2.3 Messung mittels Thermo Scientific™ Evolution™ 600 und VisonlitePro

Die Farbmessung der Probekörper erfolgt durch das Spektralphotometer Thermo Scientific™ Evolution™ 600 (Thermo Scientific™ Evolution™ 600, Thermo Fisher Scientific Inc., Waltham, USA) mittels einer Ulbrichtkugel mit dem Durchmesser von 75mm. Die Ulbrichtkugel, welche mit einem hochreflektierenden Material beschichtet ist (Spektralton), misst die diffuse Reflexion eines Probekörpers, welcher auf der Öffnung der Ulbrichtkugel platziert wird. Die direkte

Reflexion des Probekörpers wird durch einen Abschatter blockiert und so wird sichergestellt, dass nur die diffuse Reflexion den Detektor erreicht. Im Messprogramm „OptLAB-SPX“ (Ascanis, Überlingen, Deutschland) wurde zwischen 380 nm und 800 nm ein Scanbereich eingestellt. Mit 2-nm-Abtastschritten und einer Messgeschwindigkeit von 60 nm pro Minute misst das Spektralphotometer die Proben. Das Gerät Thermo Scientific™ Evolution™ 600 ist für CIE-Messungen geeignet und die Ratio Kugelöffnungen zur Oberfläche beträgt 3,6%.



*Abbildung 13 Halter ohne Probekörper*



*Abbildung 14 Halter in Adapter mit Probekörper mit Ausrichtung der Bruchstelle nach unten*

Vor jeder Verwendung wird das Spektralphotometer 10 Minuten aufgewärmt und anschließend von dem Programm Vision Pro™ (Thermo Fisher Scientific™, Waltham, USA) geprüft. Mithilfe eines weißen, spectralonbeschichteten Kalibrierungsstandards wird das Photospektrometer vor und zwischen den Messungen (6 Messungen pro Probekörper) kalibriert. Ein Probekörperhalter wurde hergestellt. Mithilfe einer CAD-Software (freeCAD) und eines 3D-Druckers (Raised3D E2) wurde dieser spezifisch auf das Thermo Scientific™ Evolution™ 600 und auf die Probengröße angepasst. Der Halter wurde in Weiß gedruckt, um die Messung nicht zu verfälschen. Somit können eine gleichbleibende Positionierung, eine komplette Abdeckung und eine plane Auflage auf der Messöffnung garantiert werden. Spektralphotometer bieten die insgesamt höchste Genauigkeit und Präzision unter verschiedenen Methoden zur Farbauswahl. Dabei ist jedoch eine klinische Umgebung erforderlich, um relevante Einflussfaktoren und Bedingungen zu kontrollieren (97).

#### 3.2.4 Computer und Software

Das Spektralphotometer "Thermo Scientific™ Evolution™ 600" wurde in seiner PC-Steuerungsvariante über die serielle Schnittstelle angesteuert. Ein speziell für diesen Zweck verwendeter Computer nutzte die Kalibrierungssoftware Vision Pro™, Version 4.20, sowie die Messsoftware VISIONlite™ ColorCalc Advanced™, Version 2.0.2, beide vom Hersteller Thermo Scientific™. Das Betriebssystem des Computers war Microsoft® Windows® 7 Professional 32-Bit.

#### 3.2.5 Nullhypothese

Die Nullhypothese lautet: Die Keramiken eines Herstellers Vita mit dem Farbcode A2 ergeben die gleichen Farbkoordinaten im  $L^*a^*b^*$ -Farbraum.

#### 3.2.6 Auswertung der Daten

Die mittels des Spektralphotometers gemessenen  $L^*a^*b^*$ -Werte wurden händisch in Microsoft® Excel® notiert (Microsoft® Corporation, Redmond, USA). Für jede Keramik ergaben sich 9 Probekörper mal 3 Stärken, somit 27 Probekörper pro Keramik und 81 Probekörper insgesamt. Jeder Probekörper wurde 6 mal gemessen und diese 6 Messungen wurden zu einem Mittelwert mittels Microsofts® Excel® zusammengefasst. Zudem wurden die

L\*a\*b\*-Werte der 9 Probekörper einer Keramik einer Stärke zu einem Mittelwert mit Standardabweichung zusammengefasst und die unterschiedlichen Stärken einer Keramik und die gleichen Stärken unterschiedlicher Keramiken mittels der euklidischen Formel verglichen und  $\Delta E$  Werte berechnet.

Die spätere statistische Auswertung erfolgt mittels IBM® SPSS Statistic 27 (IBM Corporation, Armonk, USA) und Jamovi (98). Mithilfe einer einfaktoriellen Varianzanalyse sollen die Mittelwerte auf Signifikanz getestet werden. Dafür werden die Ergebnisse zunächst auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk Test), und Varianzhomogenität (Levene`s-Test) getestet. Die Normalverteilung und Varianzhomogenität fallen signifikant aus ( $p < 0,001$ ), somit wird eine nichtparametrische einfaktorielle Anova (Kruskal-Wallis-Test), einmal zum Vergleich der Keramiken in der gleichen Höhe und einmal zum Vergleich der unterschiedlichen Höhen innerhalb der gleichen Keramik berechnet. Die Effektstärke der Ergebnisse des Kruskal-Wallis Tests wird mittels  $\epsilon^2$  beschrieben. Die Bewertung von  $\epsilon^2$  nach Rea LM ist in Tabelle 3 abzulesen. Im Anschluss erfolgen paarweise Vergleiche nach Dwass-Steel-Critchlow-Fligner.

Tabelle 3 Bewertung der Effektstärke  $\epsilon^2$  nach (Rea LM 2014) (99)

Effektstärke ( $\epsilon^2$ )	Interpretation
(0,00 - 0,01)	Negligible
(0,01 - 0,04)	Weak
(0,04 - 0,16)	Moderate
(0,16 – 0,36)	Relatively strong
(0,36 – 0,64)	Strong
(0,64 – 1,00)	Very strong

## 4 Ergebnisse

Ziel dieser statistischen Auswertung ist es, die Werte der  $L^*a^*b^*C^*h^\circ$  Werte deskriptiv zu beschreiben, die Unterschiede der Werte auf Signifikanz zu prüfen und mithilfe der euklidischen Formel die  $\Delta E$ -Werte zu berechnen. Dies erfolgt sowohl zwischen den Keramiken in den gleichen Höhen als auch zwischen den Höhen der gleichen Keramiken, um sowohl den Einfluss der Keramikart auf die Farbe als auch den Einfluss der Höhe auf die Farbe zu ermitteln.

### 4.1 Deskriptive Statistik

Die deskriptive Statistik wurde mithilfe von Jamovi (98) erstellt. Die Mittelwerte, Mediane, Standardabweichung, Minimum und Maximum lassen sich in Tabelle 4 ablesen. Zudem wurden Boxplots zum Vergleich erstellt.

Tabelle 4 Deskriptive Statistik

Deskriptive Statistik

	Keramik	Breite (mm)	L*	a*	b*	C*	h°
Mittelwert	Vita MK® II	1,0	77,8	0,68	3,94	4,00	1,40
		1,5	79,0	0,96	5,07	5,16	1,39
		2,0	79,3	1,39	6,38	6,53	1,36
	Vita Suprinity® T	1,0	82,3	1,91	9,04	9,23	1,37
		1,5	82,7	2,87	10,7	11,1	1,30
		2,0	84,1	3,64	11,5	12,1	1,29
	Vita Suprinity® HT	1,0	81,6	0,89	7,64	7,70	1,46
		1,5	82,5	1,73	9,11	9,26	1,40
		2,0	83,2	2,36	9,99	10,3	1,33
Standardabweichung	Vita MK® II	1,0	0,46	0,11	0,43	0,45	0,01
		1,5	0,69	0,20	0,61	0,62	0,02
		2,0	0,67	0,14	0,50	0,51	0,05
	Vita Suprinity® T	1,0	0,44	0,24	0,60	0,61	0,04
		1,5	0,65	0,15	0,42	0,42	0,00
		2,0	0,40	0,28	0,63	0,67	0,03
	Vita Suprinity® HT	1,0	0,30	0,26	0,58	0,61	0,05
		1,5	0,32	0,20	0,48	0,52	0,00
		2,0	0,36	0,30	0,65	0,69	0,05
Minimum	Vita MK® II	1,0	77,2	0,5	3,4	3,5	1,3
		1,5	78,0	0,6	3,9	4,0	1,3
		2,0	78,0	0,6	3,9	4,0	1,3

Deskriptive Statistik

	<b>Keramik</b>	<b>Breite (mm)</b>	<b>L*</b>	<b>a*</b>	<b>b*</b>	<b>C*</b>	<b>h°</b>
		2,0	78,2	1,1	5,4	5,6	1,3
	Vita Suprinity®	1,0	81,6	1,4	8,1	8,2	1,3
	T	1,5	81,3	2,6	9,7	10,1	1,3
		2,0	83,4	3,1	10,3	10,8	1,2
	Vita Suprinity®	1,0	81,0	0,2	6,6	6,6	1,4
	HT	1,5	81,9	1,4	8,5	8,6	1,4
		2,0	82,3	1,7	8,2	8,4	1,3
Maximum	Vita MK® II	1,0	78,6	0,9	4,8	4,9	1,4
		1,5	80,2	1,4	5,9	6,0	1,4
		2,0	80,1	1,6	7,3	7,5	1,4
	Vita Suprinity®	1,0	83,0	2,3	9,9	10,2	1,4
	T	1,5	83,4	3,1	11,5	11,9	1,3
		2,0	84,6	4,1	12,2	12,8	1,3
	Vita Suprinity®	1,0	82,0	1,4	8,6	8,7	1,5
	HT	1,5	82,9	2,1	9,9	10,1	1,4
		2,0	83,5	2,8	10,8	11,1	1,4

## 4.2 Box-Whisker-Plots

Parameter L\* (Helligkeit)

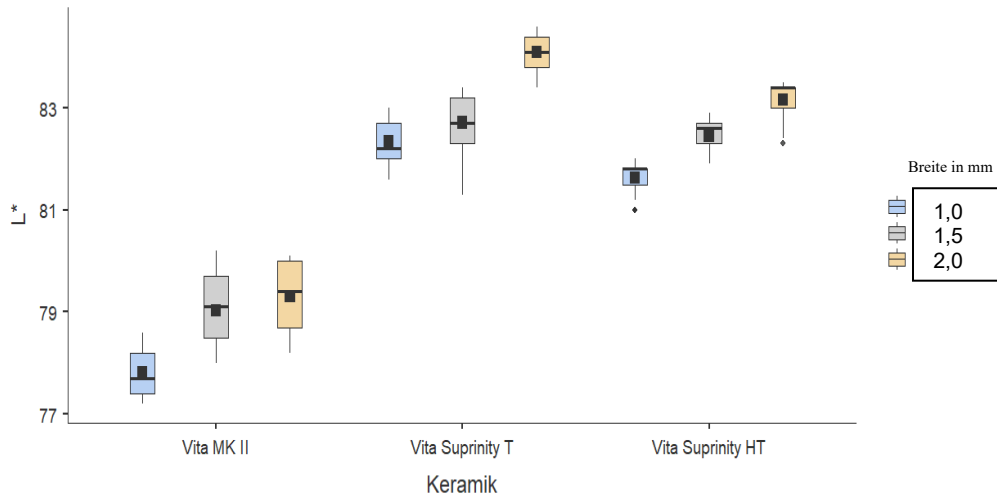


Abbildung 15 Gegenüberstellung der Helligkeit zwischen den Keramiken und Keramikstärke

Parameter a\* (Rot-Grün-Achse)

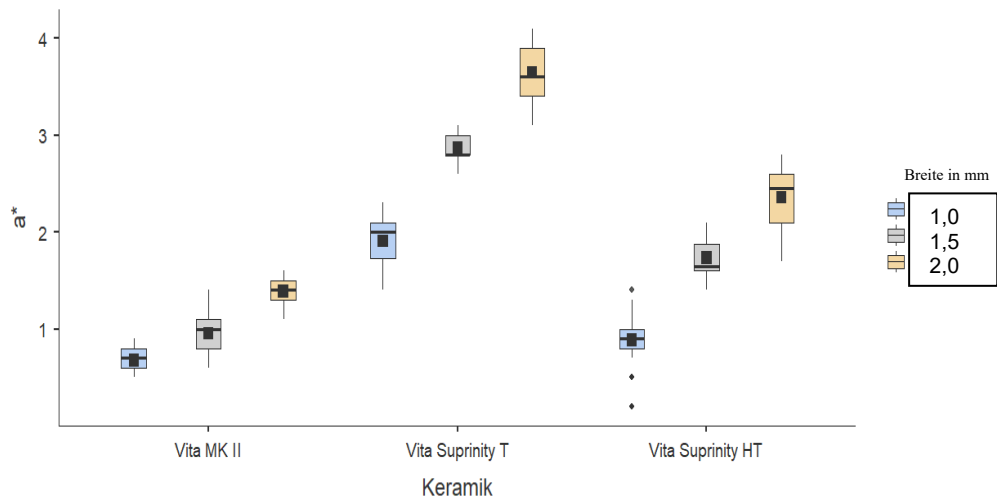


Abbildung 16 Gegenüberstellung der Rot-Grün Achse a\* zwischen den Keramiken und Höhen

Parameter  $b^*$  (Gelb-Blau-Achse)

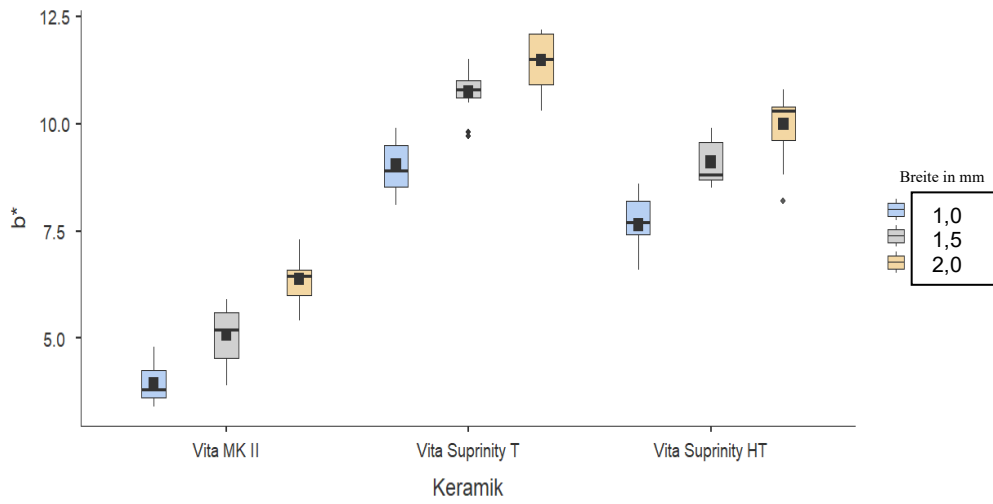


Abbildung 17 \* Gegenüberstellung der Gelb-Blau Achse  $b^*$  zwischen den Keramiken und Höhe

Parameter  $C^*$  (Chromazität)

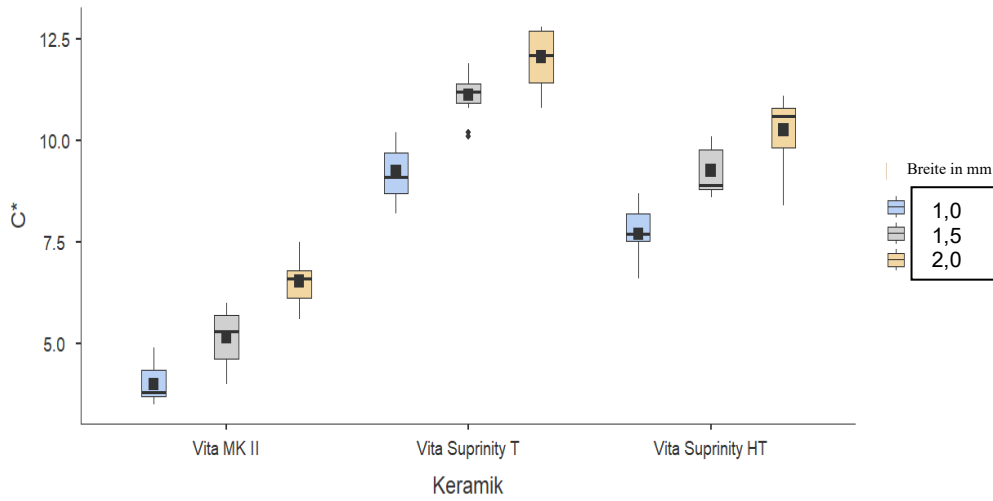


Abbildung 18 Gegenüberstellung der Chromazität  $C^*$  zwischen den Keramiken und Höhen

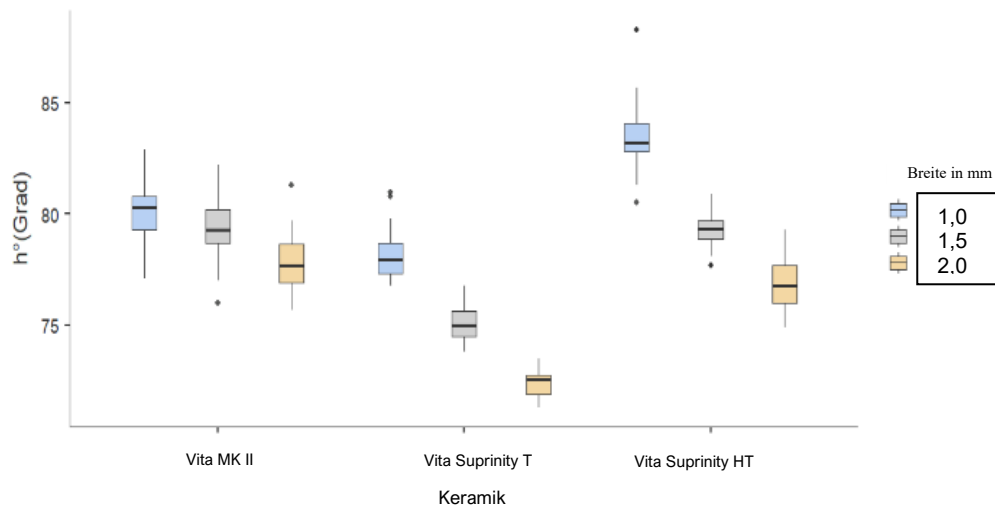
Parameter  $h^\circ$  (Bunntonwinkel)

Abbildung 19 Gegenüberstellung des Bunntonwinkels  $h^\circ$  zwischen den Keramiken und Höhen

Anhand der Box-Whisker-Plots, welche die  $L^*a^*b^*C^*h^\circ$ -Werte zwischen den Keramiken und den Dicken gegenüberstellt, sind verschiedene Trends erkennbar. Mit zunehmender Dicke der Keramiken nehmen die  $L^*a^*b^*$ - und  $C^*$ - Werte zu. Der Bunntonwinkel  $h^\circ$  nimmt mit zunehmender Keramikdicke ab. Zwischen den Keramiken unterscheiden sich die  $L^*a^*b^*C^*h^\circ$ -Werte ebenfalls. Vita Suprinity® T weist in der Buntheit  $C^*$  und den Farbachsen  $b^*$  und  $a^*$  die höchsten Werte auf, Vita MK II® die niedrigsten.

### 4.3 Varianzanalyse

Mithilfe einer einfaktoriellen Anova werden nun die Unterschiede der  $L^*a^*b^*C^*h^\circ$ -Werte zwischen den Keramiken in gleicher Höhe und zwischen den Höhen gleicher Keramik auf Signifikanz überprüft.

Zunächst erfolgt ein Test auf Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test), welcher bei allen Variablen signifikant geworden ist,  $p < 0,001$ , und ein Test auf Varianzhomogenität (Levene`s-Test), welcher ebenfalls signifikant ausgefallen ist mit  $p < 0,001$ . Für die Varianzanalyse wurde aus diesen Gründen eine nicht parametrische Anova (Kruskal-Wallis-Test) mit paarweisen Vergleichen nach Dwass-Steel-Critchlow-Fligner durchgeführt.

### 4.3.1 Statistische Auswertung zwischen den Keramiken

In diesem Abschnitt werden die Vergleiche zwischen den Keramiken Vita MK® II, Vita Suprinity® HT und Vita Suprinity® T jeweils in den Höhen 1mm, 1,5mm und 2mm berechnet.

#### 4.3.1.1 Einfaktorielle Anova nichtparametrisch (Kruskal-Wallis Test)

Tabelle 5 Kruskal Wallis Test der  $L^*a^*b^*C^*h^\circ$  Werte bei gleicher Höhe und unterschiedlichen Vita Keramiken (MK®II, Suprinity® HT, Suprinity® T)

Höhe (mm)	Variable	$\chi^2$	df	p	$\epsilon^2$
1	L*	114,0	2	< 0,001	0,814*
	a*	95,3	2	< 0,001	0,681*
	b*	120,4	2	< 0,001	0,860*
	C*	121,5	2	< 0,001	0,868*
	h°	63,4	2	< 0,001	0,453**
1,5	L*	113	2	< 0,001	0,700*
	a*	144	2	< 0,001	0,893*
	b*	142	2	< 0,001	0,882*
	C*	143	2	< 0,001	0,890*
	h°	149	2	< 0,001	0,923*
2	L*	137,9	2	< 0,001	0,857*
	a*	143,6	2	< 0,001	0,892*
	b*	135,3	2	< 0,001	0,840*
	C*	139,7	2	< 0,001	0,868*
	h°	48,6	2	< 0,001	0,302***

Bei der nichtparametrischen Anova (Kruskal-Wallis-Test) zwischen den Keramiken zeigen sich in allen Variablen jeder Höhe signifikante Unterschiede ( $p < 0,001$ ) (vgl. Tabelle 5). Die Effektstärke  $\epsilon^2$  ist nach der Bewertung von Rea LM und Parker RA (vgl. Tabelle 3) bei allen Variablen „sehr stark“ ( $\epsilon^2 > 0,64$ ). Nur bei der Variable h° bei 1mm ( $\epsilon^2 = 0,453$ ) wird die Effektstärke mit „stark“ bewertet und bei h° bei 2mm ( $\epsilon^2 = 0,302$ ) wird sie mit „relativ stark“ bewertet.

#### 4.3.1.2 Paarweise Vergleiche nach Dwass-Steel-Critchlow-Fligner zwischen den Keramiken

Tabelle 6 Paarweise Vergleiche nach Dwass-Steel-Critchlow-Fligner der  $L^*a^*b^*C^*h^\circ$  Werte zwischen den Vita Keramiken MK® II, Suprinity® T und Suprinity® HT bei den Höhen 1mm, 1,5mm und 2mm

Höhe (mm)	Variable	Vergleich (Vita Keramiken)	W-Wert	p-Wert
1	L*	MK® II vs Suprinity® T	11,06	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,71	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-8,71	< 0,001
	a*	MK® II vs Suprinity® T	11,14	< 0,001

		MK® II vs Suprinity® HT	8,14	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-11,08	< 0,001
	b*	MK® II vs Suprinity® T	11,1	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-10,5	< 0,001
	C*	MK® II vs Suprinity® T	11,1	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-10,7	< 0,001
	h°	MK® II vs Suprinity® T	-4,26	0,007
		MK® II vs Suprinity® HT	9,30	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	8,32	< 0,001
1,5	L*	MK® II vs Suprinity® T	12,70	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,70	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-4,68	0,003
	a*	MK® II vs Suprinity® T	12,7	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-12,7	< 0,001
	b*	MK® II vs Suprinity® T	12,7	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-12,5	< 0,001
	C*	MK® II vs Suprinity® T	12,7	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-12,7	< 0,001
	h°	MK® II vs Suprinity® T	-13,84	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	2,47	0,187
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	14,63	< 0,001
2	L*	MK® II vs Suprinity® T	12,7	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-11,7	< 0,001
	a*	MK® II vs Suprinity® T	12,7	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-12,7	< 0,001
	b*	MK® II vs Suprinity® T	12,7	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-11,2	< 0,001
	C*	MK® II vs Suprinity® T	12,7	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	12,7	< 0,001
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	-12,0	< 0,001
	h°	MK® II vs Suprinity® T	-9,46	< 0,001
		MK® II vs Suprinity® HT	-4,38	0,006
		Suprinity® T vs Suprinity® HT	6,59	< 0,001

Um Informationen darüber zu erhalten, welche Keramiken bei welcher Höhe und Variabel signifikant sind, wurden im Anschluss paarweise Vergleiche nach Dwass-Steel-Critchlow-Flinger (DSCF) durchgeführt (vgl. Tabelle 6). Hier zeigen sich, mit einzelnen Ausnahmen, bei allen Variablen je Keramik und Höhe Signifikanzen ( $p < 0,001$ ). Bei der Variable h° bei 1mm

zwischen Vita MK® II und Vita Suprinity® T ( $p = 0,007$ ) bei 1,5mm und 2mm zwischen Vita MK® II und Vita Suprinity® HT ( $p = 0,187$ ,  $p = 0,006$ ) sind die Werte nicht signifikant. Zudem sind bei der Variable L\* bei 1,5mm zwischen Vita Suprinity® HT und T ( $p = 0,003$ ) keine signifikanten Unterschiede bemerkbar (vgl. Tabelle 8 im Anhang).

#### 4.3.1.3 $\Delta E$ Zwischen den verschiedenen Keramiken

Mittels der Mittelwerte aus Tabelle 4 wurden nun mithilfe der euklidischen Formel und der L\*a\*b\*-Werte die  $\Delta E$ -Werte zwischen den einzelnen Materialien in der gleichen Höhe berechnet und in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7  $\Delta E$  zwischen den Keramiken nach Höhe.

	$\Delta E$ (L*a*b*)	1mm	1.5mm	2mm
	MK® II zu Suprinity® HT	5,4	5,3	5,4
	MK® II zu Suprinity® T	7,0	7,0	7,4
	Suprinity® T zu HT	1,9	2,0	2,2
Gelb	$\Delta E$ 1,2*-2,7**			
Blau	$\Delta E$ 2,7**-4,2***			
Schwarz	$\Delta E > 4,2$ ***			

Bewertung vgl. Tabelle 1

\*1,2 50:50% Wahrnehmungsgrenze

\*\*2,7 50:50% Akzeptabilitätsgrenze

\*\*\*4,2 Klinisch inakzeptabler Wert

In dieser Tabelle werden die Farbunterschiede zwischen den Keramiken durch  $\Delta E$  beschrieben. In jeder Höhe zeigen die verschiedenen Keramiken untereinander ein  $\Delta E > 1,2$  (1,9 – 7,4). Somit wurde zwischen allen Keramiken die 50:50%-Wahrnehmungsgrenze überschritten. Der Unterschied zwischen den beiden zirkondioxidverstärkten Glaskeramiken Vita Suprinity® T zu HT weist in allen Höhen  $\Delta E$  Werte  $< 2,7$  auf. Somit sind alle Werte unterhalb der Akzeptabilitätsgrenze, wohingegen die Abstände zu Vita MK® II  $\Delta E > 4,2$  (5,3 - 7,4) und somit in allen Höhen zu beiden Keramiken Vita Suprinity® HT und T oberhalb des klinisch inakzeptablen Wertes liegen und ebenfalls oberhalb  $\Delta E > 5,0$  liegen.

#### 4.3.2 Statistische Auswertung zwischen den Höhen je Keramik

In diesem Abschnitt werden die Vergleiche zwischen den Höhen 1mm, 1,5mm und 2mm je Keramik (Vita MK® II, Vita Suprinity® HT und Vita Suprinity® T) berechnet.

##### 4.3.2.1 Einfaktorielle Anova nicht parametrisch (Kruskal-Wallis-Test)

Tabelle 8 Kruskal-Wallis-Test zwischen den Höhen je Material

Variabel	Material	$\chi^2$	df	p	$\epsilon^2$
L*	Vita MK® II	84,5	2	< 0,001	0,525**
	Vita Suprinity® HT	129	2	< 0,001	0,803*
	Vita Suprinity® T	113,0	2	< 0,001	0,702*
a*	Vita MK® II	123,2	2	< 0,001	0,765*
	Vita Suprinity® HT	137	2	< 0,001	0,849*
	Vita Suprinity® T	143,2	2	< 0,001	0,890*
b*	Vita MK® II	127,4	2	< 0,001	0,791*
	Vita Suprinity® HT	125	2	< 0,001	0,777*
	Vita Suprinity® T	118,8	2	< 0,001	0,738*
C*	Vita MK® II	128,2	2	< 0,001	0,796*
	Vita Suprinity® HT	126	2	< 0,001	0,784*
	Vita Suprinity® T	125,4	2	< 0,001	0,779*
h°	Vita MK® II	39,2	2	< 0,001	0,244***
	Vita Suprinity® HT	106	2	< 0,001	0,658*
	Vita Suprinity® T	100,0	2	< 0,001	0,621**

Bei der nichtparametrischen Anova (Kruskal-Wallis-Test) zwischen den Höhen der Keramiken zeigen sich in allen Variablen jeder Keramik signifikante Unterschiede ( $p < 0,001$ ), vergleiche Tabelle 8. Die Effektstärke  $\epsilon^2$  ist nach der Bewertung von Rea LM und Parker RA (vgl. Tabelle 3) bei allen Variablen „sehr stark“ bewertet ( $\epsilon^2 > 0,64$ ). Nur bei der Variable h° bei Vita Suprinity® T ( $\epsilon^2 = 0,621$ ) und der Variable L\* bei Vita MK® II ( $\epsilon^2 = 0,525$ ) wird die Effektstärke mit „stark“ bewertet und bei h° bei Vita MK® II ( $\epsilon^2 = 0,244$ ) wird sie mit „relativ stark“ bewertet.

## 4.3.2.2 Paarweise Vergleiche nach Dwass-Steel-Critchlow-Fligner zwischen den Höhen

Tabelle 9 Paarweise Vergleiche zwischen den Höhen (1mm, 1,5mm und 2mm) je Material (Vita MKII, Vita Suprinity® HT und Vita Suprinity® T)

Variabel	Vergleich in mm	W	p	Material
L*	1,0 vs 1,5	10,40	< 0,001	Vita MK® II
	1,0 vs 2,0	11,72	< 0,001	Vita MK® II
	1,5 vs 2,0	2,98	0,088	Vita MK® II
	1,0 vs 1,5	12,1	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 2,0	12,7	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,5 vs 2,0	10,6	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 1,5	5,65	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,0 vs 2,0	12,70	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,5 vs 2,0	12,46	< 0,001	Vita Suprinity® T
a*	1,0 vs 1,5	9,55	< 0,001	Vita MK® II
	1,0 vs 2,0	12,77	< 0,001	Vita MK® II
	1,5 vs 2,0	11,90	< 0,001	Vita MK® II
	1,0 vs 1,5	12,7	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 2,0	12,7	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,5 vs 2,0	11,4	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 1,5	12,7	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,0 vs 2,0	12,7	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,5 vs 2,0	12,7	< 0,001	Vita Suprinity® T
b*	1,0 vs 1,5	10,7	< 0,001	Vita MK® II
	1,0 vs 2,0	12,7	< 0,001	Vita MK® II
	1,5 vs 2,0	11,8	< 0,001	Vita MK® II
	1,0 vs 1,5	12,66	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 2,0	12,60	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,5 vs 2,0	9,18	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 1,5	12,19	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,0 vs 2,0	12,70	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,5 vs 2,0	8,09	< 0,001	Vita Suprinity® T
C*	1,0 vs 1,5	10,7	< 0,001	Vita MK® II
	1,0 vs 2,0	12,7	< 0,001	Vita MK® II
	1,5 vs 2,0	11,9	< 0,001	Vita MK® II
	1,0 vs 1,5	12,65	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 2,0	12,64	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,5 vs 2,0	9,35	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 1,5	12,58	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,0 vs 2,0	12,69	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,5 vs 2,0	9,12	< 0,001	Vita Suprinity® T
h°	1,0 vs 1,5	-1,43	0,568	Vita MK® II
	1,0 vs 2,0	-7,17	< 0,001	Vita MK® II
	1,5 vs 2,0	-6,34	< 0,001	Vita MK® II
	1,0 vs 1,5	-9,28	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 2,0	-11,87	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,5 vs 2,0	-11,00	< 0,001	Vita Suprinity® HT
	1,0 vs 1,5	-11,22	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,0 vs 2,0	-11,18	< 0,001	Vita Suprinity® T
	1,5 vs 2,0	-3,55	0,032	Vita Suprinity® T

Um Informationen darüber zu erhalten, welche Keramiken bei welcher Höhe und Variabel signifikant sind, wurden im Anschluss paarweise Vergleiche nach Dwass-Steel-Critchlow-Flinger (DSCF) durchgeführt (vgl. Tabelle 9). Hier zeigen sich, mit einzelnen Ausnahmen, zwischen allen Höhen je Keramik und Variable signifikante Unterschiede ( $p < 0,001$ ). Lediglich bei der Variable  $h^\circ$  zwischen 1,5mm und 2mm bei Vita Suprinity® T ( $p = 0,032$ ) und zwischen 1mm und 1,5mm bei Vita MK® II ( $p = 0,568$ ) und bei der Variable  $L^*$  zwischen 1,5mm und 2mm bei Vita MK® II ( $p = 0,088$ ) zeigen sich keine signifikanten Unterschiede.

#### 4.3.2.3 $\Delta E$ Zwischen den Höhen je Keramik

Mittels der Mittelwerte aus Tabelle 4 wurden nun mithilfe der euklidischen Formel und der  $L^*a^*b^*$ -Werte die  $\Delta E$ -Werte zwischen den Höhen 1mm 1.5mm und 2mm je Keramik berechnet und in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10  $\Delta E$  ( $L^*a^*b^*$ ) zwischen den Höhen je Keramik

$\Delta E$ ( $L^*a^*b^*$ )	MK® II	Suprinity® HT	Suprinity® T
1mm zu 1.5mm	1,7	1,9	2,0
1.5mm zu 2mm	1,3	1,3	1,7
1mm zu 2mm	3,0	3,2	3,5
Gelb	$\Delta E$ 1,2*-2,7**		
Blau	$\Delta E$ 2,7**-4,2***		
Schwarz	$\Delta E > 4,2$ ***		

Bewertung vgl. Tabelle 1

\*1,2 50:50%-Wahrnehmungsgrenze

\*\*2,7 50:50%-Akzeptabilitätsgrenze

\*\*\*4,2 Klinisch inakzeptabler Wert

Betrachtet man nun den Einfluss der Höhen 1mm, 1,5mm und 2mm auf den Farbunterschied der Keramiken, zeigen sich hier ebenfalls  $\Delta E > 1,2$  (1,3 - 3,5), womit bei allen Keramiken und Höhen die 50:50%-Wahrnehmungsgrenze erreicht ist. Lediglich die Höhen 1mm zu 2mm liegen oberhalb der 50:50%-Akzeptabilitätsgrenze. Kein Wert liegt oberhalb des klinisch inakzeptablen Wertes (4,2) Größere  $\Delta E$  sind bemerkbar zwischen 1mm und 1,5mm und insgesamt die größten  $\Delta E$  zeigt die Vita Suprinity® T 1mm zu 2mm ( $\Delta E$  3,5) und der kleinste  $\Delta E$  ist bei Vita MK 2 1,5mm zu 2mm messbar (1,3).

#### 4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Sowohl die Keramikart, in diesem Fall Vita Suprinity® T, Vita Suprinity® HT und Vita MK® II, als auch die Höhen 1mm, 1,5mm und 2mm haben einen Einfluss auf die Farbwahrnehmung. Alle Gruppen unterschieden sich im Kruskal-Wallis Test signifikant voneinander ( $p < 0,001$ ). In den paarweisen Vergleichen zeigt vor allem der Bunttonwinkel  $h^\circ$  vereinzelt keine Signifikanzen. Die  $\Delta E$ -Werte sind zwischen den Keramiken größer (1,9 - 7,4) als zwischen den Höhen der Keramiken (1,3 - 3,5).

## 5 Diskussion.

Die Wahrnehmung von Farbe vergleichbar zu machen und zu bewerten, stellt aus verschiedensten Gründen eine Herausforderung dar. So haben Hintergrund, Umgebung und Oberflächenbeschaffenheit (79, 85) einen Einfluss auf die Farbmessung und auf die Farbwahrnehmung. Die Bewertung und Akzeptanz von Farbunterschieden ist zudem sehr subjektiv und schwer messbar (100). All diese Einflüsse müssen auch in der Bewertung der gemessenen Farbwerte Beachtung finden. Zudem sind die absolut gemessenen  $L^*a^*b^*$ -Werte mit Vorsicht zu bewerten, da diese sehr vom Messaufbau abhängig sind. Aus diesem Grund werden in dieser Arbeit die Differenzen zur Bewertung herangezogen, welche in Form von  $\Delta E$  berechnet werden.

### 5.1 Diskussion der Materialien

Die Auswahl der Materialien beschränkte sich in dieser Arbeit auf maschinell gefräste Keramiken der Firma VITA. Ausgewählt wurden eine reine Glaskeramik (Vita MKII®) und eine zirkonoxidverstärkte Glaskeramik (Vita Suprinity®), jeweils in transluzent (T) und hoch transluzent (HT). Um eine Übersicht der Farbunterschiede zu erhalten, wurden bewusst eine reine Glaskeramik und eine zirkonoxidverstärkte Glaskeramik in HT und T gewählt. So lässt sich sowohl ein Eindruck über die Farbunterschiede zwischen den Keramiktypen untersuchen als auch die Auswirkung der Transluzenz auf die Farbwirkung. Um die Farbabstände zwischen den Farbräumen zu vergleichen, bedarf es umfangreicherer Analysen in weiteren Farbräumen der Keramiken. Zudem ist ein Vergleich mit weiteren Glaskeramiken im hochästhetischen Spektrum auch von weiteren Herstellern interessant. Diese Arbeit untersucht zunächst den Farbraum A2 innerhalb der Keramiken der Firma Vita. Zusätzlich zu den Materialien wird in dieser Arbeit auch der Einfluss der Keramikdicke auf die Farbwahrnehmung untersucht und kann sowohl innerhalb der Keramik verglichen werden als auch zwischen den Keramiken in den unterschiedlichen Dicken. Bei den Dicken wurde sich an den regulären Schichtstärken der Präparation von Vollkeramikronen orientiert, welche in der Regel zwischen 1 und 2 mm liegen (101). Durch die Auswahl der Keramiken und Dicken soll ein Überblick über die verschiedenen Parameter gegeben werden und darüber, welchen Einfluss sie auf die Farbwahrnehmung haben können. Weitergehend interessant für zukünftige Forschungen wäre der Farbvergleich auch zwischen unterschiedlichen Materialien sowie maschinell gefrästen Materialien und von Hand hergestellten Keramiken in allen Farbräumen.

## 5.2 Diskussion der Methodik

Bei der maschinellen Herstellung und manuellen Weiterverarbeitung und dem anschließenden Kristallisationsbrand von Vita Suprinity® HT und T können Ungenauigkeiten auftreten. Um den Einfluss dieser Fehler so gering wie möglich zu halten, wurden die Probekörper nach dem Ausarbeitungsvorgang auf 0,01mm genau kontrolliert. Der Kristallisationsprozess erfolgte im immer gleichen Ofen nach Brennprotokoll und mit der gleichen Menge und Ausrichtung an Probekörpern in der Brennkammer. Nach dem Schleifen und Kristallisieren wurden die Proben keiner weiteren Oberflächenbehandlung unterzogen, um eine möglichst gleiche Oberflächenbeschaffenheit der Probekörper zu gewährleisten. Eine Studie aus dem Jahr 2014 zeigt, dass unterschiedliche Polituren einen Einfluss auf die Farbe der Probekörper haben können (79, 102). Hier können weitere Studien und Untersuchungen über die Farbveränderung durch die Oberflächenbehandlung dieser Keramiken notwendig sein. Verschmutzungen der Ulbrichtkugel des Spektralphotometers können zu Messfehlern führen, daher wurde diese stets abgedeckt gehalten und auf eine saubere Arbeitsweise geachtet. Durch dieses systematische und genaue Vorgehen sollten die intrinsischen Fehler so minimal gehalten werden, dass sie keinen Einfluss auf die Ergebnisse haben. Bei der Farbmessung mittels des Photospektrometers Thermo Scientific™ Evolution™ 600 wurde darauf geachtet, dass die Probekörper immer gleich zentriert auf dem Messpunkt gemessen wurden. Dies wurde mithilfe des gedruckten Adapters gewährleistet, welcher den Messkörper immer gleich positioniert. Der Halter wurde mit einem weißen Material hergestellt, um die Originalfarbe der Keramik so wenig wie möglich zu verfälschen. Eine Alternative wäre ein schwarzes Material gewesen, da die Messkammer des Photospektrometers ebenfalls schwarz ist. Um einen einheitlichen, genormten Versuchsaufbau zu kreieren, wäre vermutlich ein Halter aus der gleichen Farbe wie die Messkammer am praktikabelsten. Solange es jedoch um die Farbabstände und nicht um die absoluten Farbwerte geht, ist es lediglich wichtig, dass der Versuchsaufbau bei allen Messungen gleich gehalten wird, was durch diesen Versuchsaufbau gewährleistet wird. In zukünftigen Forschungen kann ein einheitlicher und genormter Versuchsaufbau erarbeitet werden, um absolute Farbwerte zwischen den Arbeiten zu vergleichen. Bei den Dicken der Keramiken von 1mm, 1,5mm und 2mm wurde sich an der Standardmindeststärke für Vollkeramikrestorationen aus dem Curriculum der Prothetik M. Kern et Al. orientiert (101). Bei Vollkeramikpräparationen wird eine Mindeststärke von 1,2mm empfohlen, lediglich bei hochfesten Zirkonoxidkeramiken wird hier eine Mindeststärke von 0,8mm angegeben. Inzisal wird ein Abtrag von 2mm empfohlen. Diese Studie eignet sich aus diesem Grund nur zur Beurteilung der Farbunterschiede von Keramiken im Rahmen einer Standardpräparation.

### 5.3 Diskussion von Delta E

Die vorliegenden Studiendaten zeigen, dass Farbkoordinaten für den Farbraum A2 verschiedener Keramiken der Firma Vita unterschiedliche Werte aufweisen. Diese Unterschiede sind für die Bestimmung der Wahrnehmungsschwelle (PT) und der Akzeptanzschwelle (AT) relevant. Es besteht allgemeiner Konsens darüber, dass die Berechnung von  $\Delta E$  zur Festlegung von PT und AT angemessen ist, jedoch herrscht Uneinigkeit darüber, welcher  $\Delta E$ -Wert verwendet werden soll. Die vorliegende Studie verwendete 50:50% PT ( $\Delta E_{ab} = 1,2$ ) und AT ( $\Delta E_{ab} = 2,7$ ) Werte, wie sie von Paravia et al. angegeben wurden (18). Diese Schwellenwerte basieren darauf, dass 50% der Probanden oberhalb und 50% unterhalb dieser Schwelle die Farbe wahrgenommen haben (PT) bzw. akzeptiert haben (AT). In den meisten Studien der Zahnmedizin zu Farbunterschieden wird die euklidische Formel zur Berechnung von  $\Delta E_{ab}$  verwendet. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde diese Formel ebenfalls in dieser Studie verwendet. Dennoch muss darauf hingewiesen werden, dass die CIE seit 2004 die Formel CIEDE2000 empfiehlt (14).

Betrachtet man die  $\Delta E$  Werte zwischen den Keramiken in den Höhen 1mm, 1,5mm und 2mm, zeigen sich Werte zwischen  $\Delta E$  1,9 - 7,4. Der Unterschied zwischen der Feldspatkeramik Vita MK® II und den zirkonoxidverstärkten Glaskeramiken Vita Suprinity® T ( $\Delta E$  7,0 - 7,4) und Vita Suprinity® HT ( $\Delta E$  5,3 - 5,4) ist dabei besonders groß. Diese Farbwertunterschiede befinden sich im klinisch inakzeptablen Bereich.  $\Delta E > 4,2$ . Wohingegen die beiden Keramiken Vita Suprinity® T und HT, welche sich lediglich in Transluzenz unterscheiden, geringere Unterschiede aufweisen ( $\Delta E$  1,9 - 2,2) welche unterhalb der 50:50% AT liegen und somit von mehr als 50% der Probanden akzeptiert werden.

Die  $\Delta E$ -Werte zwischen den Höhen fallen im Vergleich dazu mit  $\Delta E$  1,3 - 3,5 geringer aus. Mit dem kleinsten Wert ( $\Delta E$  1,3) bei Vita MK® II zwischen 1,5mm und 2mm, welcher nur leicht oberhalb der PT-Grenze liegt. Somit wird der Farbunterschied lediglich von 50% der Probanden wahrgenommen. Der höchste Wert ( $\Delta E$  3,5) liegt bei Vita Suprinity® T zwischen 1mm und 2mm, welcher oberhalb der AT liegt und somit von weniger als 50% der Probanden akzeptiert wird. Zudem ist eine tendenzielle Zunahme von  $C^*$ ,  $b^*$  und  $a^*$  mit Zunahme der Höhe erkennbar und somit eine Zunahme der Farbintensität, welche sich mit den Ergebnissen vorangegangener Studien deckt (103, 104).

Die verwendeten CAD-CAM-Keramiken von Vita in dieser Studie haben relevante Farbunterschiede, die zusätzlich durch die Höhe beeinflusst werden. Mit den verwendeten

Keramiken dieser Studie ergeben sich Farbunterschiede, welche teilweise klinisch inakzeptabel sind ( $\Delta E > 4.2$ ). Nach aktuellen Studien beeinflussen jedoch ebenfalls die Transluzenz der Keramik (103, 104), die Farbe des darunterliegenden Zementes (104, 105) und die Farbe des Hintergrunds und somit des Zahnstumpfes (106) das endgültige Ergebnis der Restauration. Damit können in der Praxis am Patienten Farbunterschiede der keramischen Restauration ausgeglichen werden, jedoch bei falscher Einschätzung oder Nichtberücksichtigung auch verschlimmert werden.

#### 5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Alle gemessenen Keramiken des Herstellers Vita (MK® II; Suprinity® HT, Suprinity® T) weisen signifikante Unterschiede des Mittelwertes in allen gemessenen Höhen (1mm, 1,5mm, 2mm) auf. Der Kruskal-Wallis-Test ist in allen Variablen ( $L^*a^*b^*C^*h^\circ$ ) signifikant ( $p < 0,001$ ) mit Effektstärken  $\varepsilon^2 = 0,302 - 0,923$ . Somit wurde die Hypothese dieser Studie widerlegt. Obwohl alle untersuchten Keramiken mit der Farbe A2 gekennzeichnet sind, weichen sie in allen gemessenen Höhen signifikant voneinander ab. Ebenfalls wiesen alle  $L^*a^*b^*C^*h^\circ$ -Werte zwischen den Höhen (1mm, 1,5mm, 2mm) je Keramik im Kruskal-Wallis-Test Signifikanzen auf ( $p < 0,001$ ) mit einer Effektstärke von  $\varepsilon^2 = 0,244-0,890$ . Diese Beobachtungen stimmen mit vorherigen Studien überein (87, 107, 108), in denen ebenfalls sowohl die Höhe der Keramik als auch die Keramikart im Farbraum signifikant voneinander abweichen.

Die Keramik Vita MK® II hat bei 1mm Keramikdicke einen Farbabstand zu Vita Suprinity® HT von  $\Delta E 5,4$  und zu Vita Suprinity® T von  $\Delta E 7$ . Bei 1.5 mm entspricht der Farbabstand zu Vita Suprinity® HT  $\Delta E 5,4$  und zu Vita Suprinity® T  $\Delta E 7$ . Bei 2mm entsprechen die Farbabstände zu Vita Suprinity® HT  $\Delta E 5,4$  und zu Vita Suprinity® T  $\Delta E 7,4$ . Diese  $\Delta E$ -Werte sind in allen Keramikdicken oberhalb des klinisch inakzeptablen Wertes von  $\Delta E >4,2$  und wären somit nicht demselben Farbraum zuzuordnen. Der Abstand zu der hochtransluzenten Keramik Vita Suprinity® HT ist durchweg geringer als zu der transluzenten Keramik Vita Suprinity® T.

Zwischen den Dicken weist die Keramik Vita MK® II Farbwerte zwischen  $\Delta E 1,3 - 1,7$  auf, womit die 50:50%-Wahrnehmungsgrenze ( $\Delta E 1,2$ ) überschritten wurde, jedoch nicht die 50:50%-Akzeptabilitätsgrenze ( $\Delta E 2,7$ ). Lediglich ein Keramikdickenunterschied von 1mm zu 2mm weist ein  $\Delta E$  von 3 auf, welches die 50:50%-Akzeptabilitätsgrenze knapp überschreitet.

Zwischen den beiden Keramiken Vita Suprinity® HT und T fallen die Farbabstände deutlich geringer aus. In der Dicke 1mm wurde ein  $\Delta E$  von 1,9 gemessen, bei 1,5mm  $\Delta E 2,0$  und bei

2mm ein  $\Delta E$  von 2,2. Alle Werte bewegen sich oberhalb der 50:50%-Wahrnehmungsgrenze ( $\Delta E$  1,2), jedoch unterhalb der 50:50%-Akzeptabilitätsgrenze ( $\Delta E$  2,7).

Zwischen den Dicken weist die Keramik Vita Suprinity® HT Farbwerte zwischen  $\Delta E$  1,3 - 1,9 auf, womit die 50:50%-Wahrnehmungsgrenze ( $\Delta E$  1,2) überschritten wurde, jedoch nicht die 50:50%-Akzeptabilitätsgrenze ( $\Delta E$  2,7). Lediglich ein Keramikdickenunterschied von 1mm zu 2mm weist ein  $\Delta E$  3,2 auf, welches die 50:50% akzeptabilitätsgrenze knapp überschreitet.

Zwischen den Dicken weist die Keramik Vita Suprinity® T Farbwerte zwischen  $\Delta E$  1,7 - 2,0 auf, womit die 50:50%-Wahrnehmungsgrenze ( $\Delta E$  1,2) überschritten wurde, jedoch nicht die 50:50%-Akzeptabilitätsgrenze ( $\Delta E$  2,7). Lediglich ein Keramikdickenunterschied von 1mm zu 2mm weist ein  $\Delta E$  von von 3,5 auf, welches die 50:50%-Akzeptabilitätsgrenze knapp überschreitet.

## 5.5 Integration der Ergebnisse in die Literatur

In dieser Studie wurde einerseits die Veränderung der Farbe mit der Höhe untersucht und andererseits wurden unterschiedliche Keramiken im Farbraum A2 verglichen. Diese Werte werden nun mit den Ergebnissen vorheriger Studien verglichen.

### 5.5.1 Diskussion des Einflusses der Dicke der Keramik auf die Farberscheinung

Ob die Dicke eines Werkstoffes einen Einfluss auf die Farbe hat, wurde schon in verschiedenen Studien zu Dentalwerkstoffen und Dentalkeramiken untersucht (78, 81, 86, 109). Spricht man über den Einfluss der Dicke eines Dentalwerkstoffes, sind auch der Effekt der Deckkraft eines Werkstoffes (78) und der Hintergrund (85) entscheidend. Die Auswirkung von verschiedenen Hintergründen auf die Keramik wurde in dieser Studie nicht untersucht. Der Hintergrund dieser Studie war schwarz. Ein dunkler Hintergrund wie Schwarz oder auch metallfarbene Gerüste und Abutments haben einen höheren Einfluss auf die Farbe von Dentalkeramiken als beispielsweise zahnfarbene Zirkonoxidkeramik (85). Der Einfluss des Hintergrundes ist in diesem Versuchsaufbau stärker als bei vollkeramischen Restaurationen, welche auf einem zahnfarbenen Stumpf befestigt werden.

In einer Studie aus dem Jahr 2024 von Li et al. (82) wurden verschiedene chairside-Keramiksyste (IPS e.max® CAD HT/MT/LT, IPS Empress® LT, und VITA Suprinity® HT/T) vor unterschiedlichen Hintergründen auf Farbabweichungen hin untersucht. Die Keramiken wurden im Farbraum A2 in den Dicken 1mm, 1,5mm und 2mm gegen einen schwarzen Hintergrund, einen weißen und eine Farbbasis (A4, B3, C4, A2) gemessen. Nicht nur die Hintergrundfarbe, sondern auch sowohl Keramikdicke als auch das Keramiksyste hatten in dieser Studie einen signifikanten Einfluss auf den  $\Delta E$ -Wert. Bei einer Dicke von 1mm waren alle  $\Delta E$ -Werte größer als 3,3. Im Vergleich sind nur die  $\Delta E$ -Werte zu Vita MK II über 3,3 ( $\Delta E$  5,4 zu VITA Suprinity® HT,  $\Delta E$  7,0 zu VITA Suprinity® T). Eine weitere Beobachtung der Studie von Li et al. war, dass bei jedem Hintergrund die Farbdifferenz abnahm, je dicker die Keramik wurde. Dieser Effekt lässt sich in dieser Studie auch bei dem schwarzen Hintergrund beobachten. In dieser Studie lagen die  $\Delta E$ -Werte zwischen den 1mm und den 1,5mm Proben zwischen  $\Delta E$ 1,7 und  $\Delta E$ 2,0. Zwischen den 1,5mm und den 2mm Proben lediglich zwischen  $\Delta E$ 1,3 und  $\Delta E$ 1,7. Eine Höhenveränderung von 0,5mm führt bei allen Keramiken zu einer Farbveränderung unterhalb der AT-Grenze.

Im weitergehenden Vergleich mit einer Studie von József Saláta aus dem Jahr 2023 ist der Einfluss des Hintergrundes ebenfalls umso größer, je dünner und transluzenter die Keramik ist (78).

All diese Studien haben gezeigt: je dicker die Keramik, desto deckkräftiger wird die Farbe und desto geringer wird der Einfluss des Hintergrundes. In dieser Studie wurde nicht direkt eine spezifische Hintergrundfarbe getestet, jedoch hatte vor dem schwarzen Hintergrund der Messkammer die Dicke der Keramik ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf den  $\Delta E$ -Wert und somit auf die Farberscheinung.

### 5.5.2 Einfluss der Materialien auf einen Farbunterschied im gleichen Farbraum

In der aktuellen Forschung gibt es schon Hinweise auf eine starke Abweichung zwischen unterschiedlichen Keramiken und Herstellern im gleichen Farbraum. Eine Studie von Della-Bona et al. aus dem Jahr 2015 (87) beschreibt in der Keramikhöhe von 1mm zwischen den Herstellern im gleichen Farbraum  $\Delta E$ -Werte von 6,32 bis 13,42. Die Keramiken wurden in den Farbräumen A1, A2 und A3 untersucht. In der Studie von Della-Bona et al. wurden die Keramiken in Vergleich zu den Farben von VITA Classical® shade guide gesetzt und nicht untereinander verglichen. Bemerkbar war dennoch, dass diese  $\Delta E$ -Werte zwischen den Keramiken in dieser Studie größer waren als die Differenzen zwischen den Farbräumen der

einzelnen Keramiken A1 - A2; A2 - A3 ( $\Delta E_{1,22} = 8,84$ ). Die hier gemessenen  $\Delta E$ -Werte zwischen den Keramiken ( $\Delta E_{1,9} = 7,4$ ) lassen sich somit in dem Rahmen einordnen, dass die Farbdifferenzen zwischen den hier gemessenen Keramiksystemen genauso groß sind wie die Differenzen zwischen den Farbräumen in der Studie von Della-Bona et al. Beide Studien haben gezeigt, dass die Farbwerte im gleichen Farbraum zwischen den Keramiken teilweise oberhalb der klinischen Akzeptabilität voneinander abweichen und diese Werte gleich groß sind wie die Farbdifferenz von einem Farbraum zum nächsten.

Auch im Bereich der Komposite wurden in vorherigen Studien große Farbunterschiede im gleichen Farbraum festgestellt. In einer Studie aus dem Jahr 2009 von Browning et al. (90) konnten Farbunterschiede der Komposite im Vergleich zu dem korrespondierenden Farbraum des VITA Classical® shade guide  $\Delta E$  zwischen 3,9 und 22,8 bestimmt werden.

Zum Thema Farbdifferenzen im gleichen Farbraum zwischen verschiedenen Materialien ist die aktuelle Studienlage sehr gering. Um Aussagen über die genauen Abweichungen der Keramiken untereinander im gleichen Farbraum treffen zu können, ist eine noch umfangreichere Forschung auf diesem Gebiet notwendig.

## 5.6 Limitation

Die größte Limitation dieser Studie zeigt sich vor allem in der Beeinflussbarkeit der Farbwahrnehmung durch Umgebungslicht, Form und Hintergrundfarbe sowie Schichtdicke und Politur, wie in Kapitel 2 beschrieben. Somit ist die Messung der absoluten  $L^*a^*b^*$ -Werte stark an den Versuchsaufbau gekoppelt und kann außerhalb dieses Settings nur schwer reproduziert werden, was eine Vergleichbarkeit mit vorherigen Studien erschwert. Mithilfe des Farbabstands  $\Delta E$  ist ein Vergleich der Studien zwar möglich, jedoch bleiben die absoluten  $L^*a^*b^*$ -Werte kaum vergleichbar, solange es keinen standardisierten Messvorgang für Farben von Dentalprodukten gibt.

Zudem sind nicht nur die  $L^*a^*b^*$ -Werte ausschlaggebend für den Erfolg einer ästhetischen Restauration, sondern ebenfalls Transluzenz und Zahnform. Diese Variablen wurden in diesem Versuchsaufbau nicht beachtet, müssen jedoch für eine umfassende Betrachtung der Zahnfarbe und ihres ästhetischen Erfolgs mitbetrachtet werden.

Die Limitation der Form besteht vor allem darin, dass die Probekörper dieser Studie flach waren und nicht der Form einer Zahnkrone folgten. Eine exakte klinische Situation lässt sich somit nicht eindeutig simulieren. Außerdem waren die Probekörper nicht glasiert oder poliert,

was ebenfalls abweichend von dem klinischen Endergebnis ist. Die Umgebungsfarbe war schwarz und somit nicht mit den Farben der Mundhöhle vergleichbar, auch die Benetzung des Speichels wurde in dieser Studie nicht simuliert.

Durch Verschmutzung der Ulbrichtkugel des Photospektrometers oder des Kalibrierungskörpers kann die Messung ebenfalls beeinflusst werden. In diesem Fall wurde die Ulbrichtkugel immer abgedeckt gehalten und ein neuer Kalibrierungskörper verwendet, jedoch ist eine Verschmutzung durch Staubpartikel nie auszuschließen.

## 5.7 Klinische Relevanz

Eine große Variation an Keramiken mit verschiedenen Farbtönen und Transluzenzen ermöglicht die Anfertigung der für den Patienten optimalen Restauration. Mit einer großen Variation an Farben der CAD-CAM-Keramiken muss jedoch auch ein ebenso umfangreiches Farbauswahlssystem einhergehen. In dieser Studie sind alle Keramiken mit A2 codiert. Sie weisen aber sehr große Unterschiede in den Farbkoordinaten auf.

Da die gemessenen Farbwerte der Keramiken innerhalb der Firma Vita im Farbraum A2 nicht einheitlich sind, ergibt sich die klinische Schwierigkeit, die richtige Keramikfarbe für eine Restauration mit nur einem Farbwahlssystem auszuwählen. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Farben der unterschiedlichen Keramiken im gleichen Maße vom Farbwahlssystem abweichen wie untereinander. Hier bedarf es noch genauerer Untersuchung. Eine Möglichkeit, dieses Problem zu beheben, wäre ein individuelles Farbwahlssystem für jeden Keramiktyp, welches für hochästhetische Restaurationen zusätzlich zur Auswahl benutzt werden kann. Hier kann im Praxisalltag auch eine individuell gefertigte Probe der jeweiligen Keramik verwendet werden. Hier könnte auch eine umfangreichere Klassifizierung der Keramikfarbe hilfreich sein. Das Farbwahlssystem Vita toothguide 3D MASTER® dient ebenfalls als Grundlage, mithilfe derer die Keramikblöcke klassifiziert werden.

Um einen umfangreichen Überblick über die Farbabweichungen und eine Einordnung der Keramiken im Farbspektrum vornehmen zu können, bedarf es noch weiterer Untersuchungen von unterschiedlichen CAD-CAM-Keramiken in allen Farbräumen. Zudem ist der genaue Einfluss von Politur und Glasur auf die Farbe noch ungeklärt, was durch weitere Studien untersucht werden sollte.

Da die Dicke der Keramik ebenfalls einen Einfluss auf die Farbe hat, vor allem durch den Einfluss des Hintergrundes, lässt sich hiermit durch eine Verstärkung der Keramikdicke das

endgültige Farbergebnis beeinflussen. Auch in Hinblick auf eine mögliche Normierung der Farbräume muss beachtet werden, dass die Dicke der Keramik ebenfalls einer Norm unterliegen muss.

## 5.8 Ausblick

Im Bereich der CAD-CAM-Keramiken gibt es derzeit noch wenige farbanalytische Studien, weshalb es derzeit nicht möglich ist, eindeutige Aussagen zu treffen, jedoch gibt es deutliche Hinweise darauf, dass die Farben von unterschiedlichen Keramiken im gleichen Farbraum nicht übereinstimmen. Da es somit nahezu unmöglich ist, ein ästhetisch zufriedenstellendes Ergebnis zu erzielen, benötigt es noch weitere Studien zur Analyse verschiedener Keramiken in allen Farbräumen, um eine Einordnung der Keramiken vornehmen zu können. Mithilfe von umfangreichen Farbanalysen mit gleichen Versuchsaufbau und unterschiedlichen Farbräumen könnte es möglich sein, die Keramiken im Verhältnis zueinander in einem Farbraum einzuordnen und somit eine Grundlage zu schaffen für eine präzisere Farbestimmung. Außerdem gäbe es eine Grundlage, um die Farbräume einheitlich mittels  $L^*a^*b^*$ -Koordinaten zu benennen, um somit die Produktion und die Präzision für die Hersteller zu vereinfachen.

Eine wichtige Grundlage für standardisierte Farbräume wäre ein standardisierter Messaufbau für Dentalkeramiken, was für eine einheitliche Farbmessung unabdingbar wäre. Dieser Versuchsaufbau müsste Messgerät, Plättchenform und -dicke, Hintergrund und Umgebungsfarbe berücksichtigen.

Eine keramische Restauration in der Zahnmedizin ist so individuell wie der Patient selbst. Um dem gerecht zu werden, benötigt es eine große Auswahl an Farben und Transluzenten in Dentalkeramiken. Das Ziel ist es nicht, alle Keramiken in genau der gleichen Farbe anzufertigen und diese gemessenen Unterschiede zu minimieren. Vielmehr ist es Ziel dieser Studie, auf die Mängel der aktuellen Farbcodierung aufmerksam zu machen und Anstöße für ein standardisiertes und umfangreicheres Farbauswahlssystem zu geben, welches individuell an die Keramiken angepasst ist.

Auch im Zusammenspiel mit diversen Farbmessgeräten ist eine Einheitlichkeit in der gemessenen Farbe der Keramiken sinnvoll. Ein System aus Intraoralscanner mit Farbmesssystem und einem abgestimmten CAD-CAM-System kann für die zukünftige rekonstruktive Zahnheilkunde interessant sein, um ästhetischere Ergebnisse zu erzielen.

Hierfür müssten die einzelnen Keramiken mit der Farbcodierung einheitlich sein, um die korrekte Farbe auswählen zu können.

## 6 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Studie stellte die photospektrometrische Auswertung von den Vita-Keramiken Vita MK® II, Vita Suprinity® HT und Vita Suprinity® T (Vita Zahnfabrik GmbH & Co, Bad Säckingen, Deutschland) da.  $L^*a^*b^*$ -Werte wurden in den Höhen 1mm, 1,5mm und 2mm mittels des Photospektrometers Thermo Scientific™ Evolution™ 600 ermittelt. Zwischen den  $L^*a^*b^*$ -Koordinaten der Keramiken gleicher Höhe und gleicher Höhe unterschiedlicher Keramiken wurden mithilfe der euklidischen Formel Farbabstände berechnet ( $\Delta E$ ). Aus den  $L^*a^*b^*$ -Koordinaten wurden zudem die Sättigung ( $C^*$ ) und der Bunttonwinkel ( $h^\circ$ ) berechnet.

### 6.1 Durchführung

Die Keramikblöcke wurden mithilfe der Schleifeinheit InLab® MC X5® (Sirona Dental Services GmbH, Bensheim, Germany) in jeweils 3 Probekörper mit der Höhe 1mm, 1,5mm und 2mm geschliffen. Anschließend wurden die Proben mit dem Photospektrometer Thermo Scientific™ Evolution™ 600 (Thermo Fischer Scientific, Waltham, USA) ausgewertet und  $L^*a^*b^*$ -Werte gemessen. Im weiteren Verlauf wurden hieraus  $C^*$ ,  $h^\circ$  und  $\Delta E$  berechnet. Diese Variablen wurden mithilfe einer nichtparametrischen einfaktoriellen Anova (Kruskal-Wallis-Test) und paarweisem Vergleich nach Dwass-Steel-Critchlow-Fligner statistisch ausgewertet.

### 6.2 Ergebnisse

Alle Werte  $L^*a^*b^*C^*$  und  $h^\circ$  weisen zwischen allen Keramiken Vita MK® II, Vita Suprinity® T und Vita Suprinity® HT im Kruskal-Wallis-Test signifikante Unterschiede auf ( $p < 0,001$ ) mit Effektstärken von  $\epsilon^2 = 0,302 - 0,923$ . Im paarweisen Vergleich nach Dwass-Steel-Critchlow-Fligner zeigen alle Variablen bis auf vereinzelte Ausnahmen im Bunttonwinkel  $h^\circ$  Signifikanzen aufzeigen ( $p < 0,001$ ).

Die Farbabstände  $\Delta E$  reichen zwischen den Keramiken je Höhe von  $\Delta E 1,9 - 7,4$ . Zwischen den Keramiken Vita Suprinity® T und Vita Suprinity® HT, welche sich lediglich in den

Transluzenzstufen unterscheiden, sind die Farbabstände wesentlich geringer ( $\Delta E$  1,9 - 2,2) als zwischen Vita Suprinity® HT/T und Vita MK® II ( $\Delta E$  5,3 - 7,4). Der größte Farbabstand ergibt sich zwischen Vita MK® II und Vita Suprinity® T bei 2mm Keramikhöhe ( $\Delta E$  7,4).

Zwischen den Höhen der Keramiken 1mm, 1,5mm und 2mm innerhalb der Keramiken ergibt der Kruskal-Wallis-Test bei allen Werten  $L^*a^*b^*$   $C^*$  und  $h^\circ$  signifikante Unterschiede ( $p < 0,001$ ) mit Effektstärken von  $\varepsilon^2=0,244-0,890$ . Die paarweisen Vergleiche nach Dwass-Steel-Critchlow-Fligner zeigen bei allen Variablen außer vereinzelt  $h^\circ$ -Werte signifikante Unterschiede ( $p < 0,001$ ).

Die Farbabstände  $\Delta E$  reichen zwischen den Keramiken je Abstand von  $\Delta E$  1,9 - 2,2. Zwischen den Höhen 1mm und 2mm sind die Farbabstände zwischen  $\Delta E$  3,0 und 3,5. Die größten Farbabstände hat die Keramik Vita Suprinity® T zwischen 1mm und 1,5mm.

Der Farbabstand zwischen Vita MK® II und Vita Suprinity® HT/T weist klinisch inakzeptable Farbabstände auf ( $\Delta E > 4,2$ ). Vita Suprinity® HT und T weisen Farbabstände unterhalb der 50:50%-Akzeptabilitätsschwelle (AT) auf ( $\Delta E$  2,7), jedoch oberhalb der 50:50%-Wahrnehmungsschwelle (PT) ( $\Delta E$  1,2) Somit wird dieser Farbunterschied von mehr als 50% von den Probanden wahrgenommen, jedoch von mehr als 50% von den Probanden wurde er akzeptabel eingestuft.

Bei den Höhendifferenzen zwischen den Keramiken sieht es ähnlich aus. Bei Abständen von 0,5mm liegen alle Farbabstände unterhalb der AT und oberhalb der PT, werden somit von den meisten Probanden wahrgenommen, jedoch im noch akzeptierten Bereich. Bei einer Höhendifferenz von 1mm sind diese Farbunterschiede jedoch oberhalb der AT ( $\Delta E$  3,0 - 3,5) und somit von weniger als 50% der Probanden akzeptiert.

Alle gemessenen Keramiken aus dem Farbraum A2 weisen Farbabstände auf, welche bis weit über die Akzeptabilitätsschwelle (AT) hinausreichen.

### 6.3 Klinische Konsequenz

Da die gemessenen Farbwerte der Keramiken innerhalb der Firma Vita im Farbraum A2 nicht einheitlich sind, ergibt sich die klinische Schwierigkeit, die richtige Keramikfarbe für eine Restauration mit nur einem Farbwahlsystem auszuwählen. Es muss davon ausgegangen werden, dass die Farben der unterschiedlichen Keramiken im gleichen Maße vom Farbwahlsystem abweichen wie untereinander. Hier bedarf es noch genauerer Untersuchung.

Eine Möglichkeit, dieses Problem zu beheben, wäre ein individuelles Farbwahlsystem für jeden Keramiktyp, welches für hochästhetische Restaurationen zusätzlich zur Auswahl benutzt werden kann. Hier kann im Praxisalltag auch eine individuell gefertigte Probe der jeweiligen Keramik verwendet werden. Hier könnte auch eine umfangreichere Klassifizierung der Keramikfarbe hilfreich sein. Das Farbwahlsystem Vita toothguide 3D MASTER® dient ebenfalls als Grundlage mithilfe derer die Keramikblöcke klassifiziert werden können.

Um einen umfangreichen Überblick über die Farbabweichungen und eine Einordnung der Keramiken im Farbspektrum vornehmen zu können, bedarf es noch weiterer Untersuchungen von unterschiedlichen CAD-CAM-Keramiken in allen Farbräumen. Zudem ist der genaue Einfluss von Politur und Glasur auf die Farbe noch ungeklärt, was durch weitere Studien untersucht werden sollte.

## 7 Literaturverzeichnis

1. Harten U. Physik für Mediziner: Springer; 2020. 312-29 p.
2. Lübbe E. Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung : Eine Formel für die Farbsättigung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2013. 1-48 p.
3. Kim IJ, Lee YK, Lim BS, Kim CW. Effect of surface topography on the color of dental porcelain. *J Mater Sci Mater Med.* 2003;14(5):405-9.
4. Uo M, Okamoto M, Watari F, Tani K, Morita M, Shintani A. Rare earth oxide-containing fluorescent glass filler for composite resin. *Dent Mater J.* 2005;24(1):49-52.
5. Monsénégo G, Burdairon G, Clerjaud B. Fluorescence of dental porcelain. *J Prosthet Dent.* 1993;69(1):106-13.
6. Lohbauer U, Belli R, Wendler M. Lichtphänomene: Opaleszenz und Fluoreszenz. In: Rosentritt M, Ilie N, Lohbauer U, editors. *Werkstoffkunde in der Zahnmedizin.* 1. Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2018. p. 239-300.
7. Lee YK, Lu H, Powers JM. Measurement of opalescence of resin composites. *Dent Mater.* 2005;21(11):1068-74.
8. Shiraishi T, Wood DJ, Shinozaki N, van Noort R. Optical properties of base dentin ceramics for all-ceramic restorations. *Dent Mater.* 2011;27(2):165-72.
9. Schmidseeder J, Munz T. Metamerie. In: Schmidseeder J, Munz T, editors. *Farbatlanten der Zahnmedizin - Ästhetische Zahnmedizin.* 2. Auflage ed: Georg Thieme Verlag KG; 2008. p. 30-1.
10. Curd FM, Jasinevicius TR, Graves A, Cox V, Sadan A. Comparison of the shade matching ability of dental students using two light sources. *J Prosthet Dent.* 2006;96(6):391-6.
11. Kröger E, Matz S, Dekiff M, Tran BL, Figgenger L, Dirksen D. In vitro comparison of instrumental and visual tooth shade determination under different illuminants. *J Prosthet Dent.* 2015;114(6):848-55.
12. Harten U. Optik. In: Harten U, editor. *Physik für Mediziner.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2023. p. 293-370.
13. Richter M. Einführung in die Farbmeterik: De Gruyter; 1981. 21-32 p.
14. l'Eclairage Cld. CIE Technical Report 015: 2018:\* Colorimetry: Commission Internationale de L'Eclairage; 2018.
15. M. Has TN. Color Management: Current Practice and the Adoption of a New Standard 2017 acc. 03.2023 [
16. M. Stokes MDF, R.S. Berns: . Colorimetric quantified visual tolerances for pictorial images, Comparison of Color Images Presented in Different Media. M Pearson ed, Tech Assoc Graphic Arts and Inter-Soc Col. 1992;Proc. Vol. 2,;pp. 757-77
17. Douglas RD, Steinhauer TJ, Wee AG. Intraoral determination of the tolerance of dentists for perceptibility and acceptability of shade mismatch. *J Prosthet Dent.* 2007;97(4):200-8.
18. Paravina RD, Ghinea R, Herrera LJ, Bona AD, Igiel C, Linninger M, et al. Color difference thresholds in dentistry. *J Esthet Restor Dent.* 2015;27 Suppl 1:S1-9.
19. Alghazali N, Burnside G, Moallem M, Smith P, Preston A, Jarad FD. Assessment of perceptibility and acceptability of color difference of denture teeth. *J Dent.* 2012;40 Suppl 1:e10-7.
20. Khashayar G, Bain PA, Salari S, Dozic A, Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Perceptibility and acceptability thresholds for colour differences in dentistry. *J Dent.* 2014;42(6):637-44.
21. [https://www.marabu-inks.com/fileadmin/\\_migrated/news\\_uploads/SIP\\_01\\_11\\_Farbmeterik.pdf](https://www.marabu-inks.com/fileadmin/_migrated/news_uploads/SIP_01_11_Farbmeterik.pdf) 2011 acc 02.2024 [
22. Delta E [https://de.wikipedia.org/wiki/Delta\\_E](https://de.wikipedia.org/wiki/Delta_E) 2023 acc. 02.2023 [
23. Allen E, et al., T. JSa. *Ästhetische Zahnmedizin.*: Thieme Verlag KG.; 2009. 26-34 p.

24. Hohmann A, and Werner Hielscher. . Lehrbuch der Zahntechnik : Gesamtausgabe: Anatomie, Kieferorthopädie | Prothetik | Werkstofftechnik, : Quintessenz Verlag; 2019. 2606-32 p.
25. Allen EeaJSaTM. Ästhetische Zahnmedizin: Stuttgart, Georg Thieme Verlag KG. ; 2009. 25-34 p.
26. Kappert HF. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung : 2. Werkstoffe unter klinischen Aspekten. 6., vollst. überarb. u. erw. Aufl. ed. Stuttgart u.a.2008. p. 269 pp.
27. Hohmann A, and Werner Hielscher. . Lehrbuch der Zahntechnik : Gesamtausgabe: Anatomie, Kieferorthopädie | Prothetik | Werkstofftechnik, : Quintessenz Verlag, 2019. ProQuest Ebook Central; 2019. 2606-32 p.
28. Gürel G. The science and art of porcelain laminate veneers. . London, Chicago: Quintessence Publishing Co. Ltd. ; 2003. 10-85 p.
29. Paravina RD ONP, Swift EJ, Nathanson D, Goodacre CJ. Teaching of color in predoctoral and postdoctoral dental education in 2009. J Dent 2010;38:34–40
30. Zahnfabrik DERV. VITA Zahnfarbbestimmung <https://www.vita-zahnfabrik.com/de/VITA-Toothguide-3D-MASTER-26229.html>2024 acc. 02.2024 [
31. Hassel PDA. [https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/update-zur-klinischen-zahnfarbbestimmung\\_\\_6071.html](https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/update-zur-klinischen-zahnfarbbestimmung__6071.html) 2018 acc. 12.2023 [
32. Öngül D, Şermet B, Balkaya MC. Visual and instrumental evaluation of color match ability of 2 shade guides on a ceramic system. J Prosthet Dent. 2012;108(1):9-14.
33. Vafae F, Rakhshan V, Vafaei M, Khoshhal M. Accuracy of shade matching performed by colour blind and normal dental students using 3D Master and Vita Lumin shade guides. Eur J Prosthodont Restor Dent. 2012;20(1):23-5.
34. Paravina RD. Performance assessment of dental shade guides. J Dent. 2009;37 Suppl 1:e15-20.
35. Faber F-J. Die Bestimmung der Zahnfarbe. Stellungnahme der DGZMK V10, Stand 09/2006 DZZ 57 (08) 2002. 2006.
36. Nakhaei M, Ghanbarzadeh J, Keyvanloo S, Alavi S, Jafarzadeh H. Shade matching performance of dental students with three various lighting conditions. J Contemp Dent Pract. 2013;14(1):100-3.
37. Gokce HS, Piskin B, Ceyhan D, Gokce SM, Arisan V. Shade matching performance of normal and color vision-deficient dental professionals with standard daylight and tungsten illuminants. J Prosthet Dent. 2010;103(3):139-47.
38. S B. Visuelle Zahnfarbbestimmung trotz Farbsehschwäche? Ergebnisse eigener Untersuchungen. . Thiery J, Beck-Sickingler AG, Arendt T 2013: 220
39. Samra APB MM, Mazur RF, Vieira S, De Souza EM, Freire A, Rached RN. Performance of dental students in shade matching: impact of training. J Esthet Restor Dent 2017:E24–E32.
40. Faber FJ SG. Visuelle und messtechnische Zuordnung der Zahnfarbe. Dtsch Zahnärztl Z. 1995:661.
41. Hannak WB JH, Klinke T, Böning K, Pirek P, Beuer F. Reproducibility and accuracy of measuring results of VITA Easyshade Advance. . J Dent Res 2016;95.
42. Da Silva JD PS, Weber HP, Ishikawa-Nagai S. Clinical performance of a newly developed spectrophotometric system on tooth color reproduction. J Prosthet Dent 2008;99:361–8.
43. Igiel C LK, Ghinea R, Weyhrauch M, Hangx Y, Scheller H, Paravina RD. . Reliability of visual and instrumental color matching. J Esthet Restor Dent. 2017;29:303-8.
44. Yoon HI BJ, Park JM, Chun YS, Kim MA, Kim M. A Study on Possibility of Clinical Application for Color Measurements of Shade Guides Using an Intraoral Digital Scanner. J Prosthodont. 2018:670-5.
45. Rutkūnas V DJ, Bilius V. Accuracy of an intraoral digital scanner in tooth color determination. . J Prosthet Dent. 2020.

46. Reyes J AP, Ventura D. Repeatability of the human eye compared to an intraoral scanner in dental shade matching. *Heliyon*. 2019.
47. Liberato WF BI, Costa PP, de Almeida CC, Pimentel W, Tiozzi R. A comparison between visual, intraoral scanner, and spectrophotometer shade matching: A clinical study. *J Prosthet Dent*. 2019;121:271-5.
48. Igiel C, Lehmann KM, Ghinea R, Weyhrauch M, Hangx Y, Scheller H, et al. Reliability of visual and instrumental color matching. *J Esthet Restor Dent*. 2017;29(5):303-8.
49. Liberato WF, Barreto IC, Costa PP, de Almeida CC, Pimentel W, Tiozzi R. A comparison between visual, intraoral scanner, and spectrophotometer shade matching: A clinical study. *J Prosthet Dent*. 2019;121(2):271-5.
50. Schmidseeder J MT. Farbatlanten der Zahnmedizin - Ästhetische Zahnmedizin.: Hrsg. 2. Auflage. Stuttgart: Thieme; ; 2008. 26-34 p.
51. Kern M, et al. Curriculum Prothetik: Quintessenz Verlag; 2022. p. 50-140; 261-87 p.
52. Marxkors R, Meiners H, Geis-Gerstorfer J. Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde: Vom Defekt zur Restauration. 6 ed. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag; 2016.
53. [https://www.ag-keramik.de/fileadmin/images/ag-keramik/symposien/Vorbericht\\_Pospiech\\_Kern\\_10\\_illustriert\\_\\_\\_27.06.2016\\_\\_\\_\\_.pdf](https://www.ag-keramik.de/fileadmin/images/ag-keramik/symposien/Vorbericht_Pospiech_Kern_10_illustriert___27.06.2016____.pdf) 2016 acc.12.2023 [updated 11 24.
54. Kern M, Wolfart S, Heydecke G, Witkowski S, Türp JC, Strub JR. Curriculum Prothetik : Band 2. Berlin, GERMANY: Quintessenz Verlag; 2022. p. 50-140; 261-87 p.
55. <https://dzw.de/verblendung-oder-monolithe-wer-gibt-kuenftig-den-ton> 2017 acc 11.2023 [updated 3 2.
56. Chaiyabutr Y, Kois JC, Lebeau D, Nunokawa G. Effect of abutment tooth color, cement color, and ceramic thickness on the resulting optical color of a CAD/CAM glass-ceramic lithium disilicate-reinforced crown. *J Prosthet Dent*. 2011;105(2):83-90.
57. Igiel C, Weyhrauch M, Mayer B, Scheller H, Lehmann KM. Effects of ceramic layer thickness, cement color, and abutment tooth color on color reproduction of feldspathic veneers. *Int J Esthet Dent*. 2018;13(1):110-9.
58. Khosravani SR, Kahn moui MA, Kimyai S, Navimipour EJ, Mahounak FS, Azar FP. Final Colour of Ultratranslucent Multilayered Zirconia Veneers, Effect of Thickness, and Resin Cement Shade. *Biomed Res Int*. 2022;2022:2555797.
59. Yildirim B, Recen D, Tekeli Simsek A. Effect of cement color and tooth-shaded background on the final color of lithium disilicate and zirconia-reinforced lithium silicate ceramics: An in vitro study. *J Esthet Restor Dent*. 2021;33(2):380-6.
60. Rekow ED, Silva NR, Coelho PG, Zhang Y, Guess P, Thompson VP. Performance of dental ceramics: challenges for improvements. *J Dent Res*. 2011;90(8):937-52.
61. Pjetursson BE, Brägger U, Lang NP, Zwahlen M. Comparison of survival and complication rates of tooth-supported fixed dental prostheses (FDPs) and implant-supported FDPs and single crowns (SCs). *Clin Oral Implants Res*. 2007;18 Suppl 3:97-113.
62. Guess PC, Zavanelli RA, Silva NR, Bonfante EA, Coelho PG, Thompson VP. Monolithic CAD/CAM lithium disilicate versus veneered Y-TZP crowns: comparison of failure modes and reliability after fatigue. *Int J Prosthodont*. 2010;23(5):434-42.
63. Sulaiman TA, Delgado AJ, Donovan TE. Survival rate of lithium disilicate restorations at 4 years: A retrospective study. *J Prosthet Dent*. 2015;114(3):364-6.
64. M S. Bruxismus und festsitzender Zahnersatz. *Quintessenz* 2017. 68: 23–33 p.
65. Spies BC, Pieralli S, Vach K, Kohal RJ. CAD/CAM-fabricated ceramic implant-supported single crowns made from lithium disilicate: Final results of a 5-year prospective cohort study. *Clin Implant Dent Relat Res*. 2017;19(5):876-83.
66. Spies BC, Patzelt SB, Vach K, Kohal RJ. Monolithic lithium-disilicate single crowns supported by zirconia oral implants: three-year results of a prospective cohort study. *Clin Oral Implants Res*. 2016;27(9):1160-8.

67. Spitznagel FA, Balmer M, Wiedemeier DB, Jung RE, Gierthmuehlen PC. Clinical outcomes of all-ceramic single crowns and fixed dental prostheses supported by ceramic implants: A systematic review and meta-analyses. *Clin Oral Implants Res.* 2022;33(1):1-20.
68. Höland W, Rheinberger V, Apel E, van't Hoen C. Principles and phenomena of bioengineering with glass-ceramics for dental restoration. *Journal of the European Ceramic Society.* 2007;27(2):1521-6.
69. [https://www.ivoclar.com/de\\_de/products/digital-processes/ips-e.max-cad](https://www.ivoclar.com/de_de/products/digital-processes/ips-e.max-cad): Ivoclar; 2022 acc. 01.2024
70. Höland W, Schweiger M, Frank M, Rheinberger V. A comparison of the microstructure and properties of the IPS Empress 2 and the IPS Empress glass-ceramics. *J Biomed Mater Res.* 2000;53(4):297-303.
71. Schultheis S, Strub JR, Gerds TA, Guess PC. Monolithic and bi-layer CAD/CAM lithium-disilicate versus metal-ceramic fixed dental prostheses: comparison of fracture loads and failure modes after fatigue. *Clin Oral Investig.* 2013;17(5):1407-13.
72. VITA SUPRINITY, Technisch-Wissenschaftliche Dokumentation. . VITA Zahnfabrik 2014.
73. Sampaio CS BJ, Avila A, Cordero C, Freitte M, Ferrari V, Atria PJ, Jorquera G. Effect of different fabrication steps on color and translucency of a CAD-CAM feldspathic ceramic. *J Esthet Restor Dent* 2021.
74. Tabatabaian F ME, Sahabi M, Torabzadeh H, Namdari M. Effect of thickness of monolithic zirconia ceramic on final color. *J Prosthet Dent.* 2018.
75. Kim HK KS, Lee JB, Han JS, Yeo IS, Ha SR. . Effect of the amount of thickness reduction on color and translucency of dental monolithic zirconia ceramics.: *J Adv Prosthodont.* ; 2016.
76. S B. Visuelle Zahnfarbbestimmung trotz Farbsehschwäche? Ergebnisse eigener Untersuchungen. In: Thiery J, Beck-Sickinger AG, Arendt T (Hrsg.): . 12th Leipzig Research Festival for Life Sciences 2013, Abstract Book. 2013:220.
77. Pérez MM, Della Bona A, Carrillo-Pérez F, Dudea D, Pecho OE, Herrera LJ. Does background color influence visual thresholds? *J Dent.* 2020;102:103475.
78. Saláta J, Szabó F, Csuti P, Antal M, Márton P, Hermann P, et al. Effect of thickness, translucency, and substrates on the masking ability of a polymer-infiltrated ceramic-network material. *J Esthet Restor Dent.* 2023;35(6):886-95.
79. Coşkun Akar G, Pekkan G, Çal E, Eskitaşçıoğlu G, Özcan M. Effects of surface-finishing protocols on the roughness, color change, and translucency of different ceramic systems. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 2014;112(2):314-21.
80. Özarlan MM, Büyükkaplan U, Barutçigil Ç, Arslan M, Türker N, Barutçigil K. Effects of different surface finishing procedures on the change in surface roughness and color of a polymer infiltrated ceramic network material. *J Adv Prosthodont.* 2016;8(1):16-20.
81. Bayindir F, Koseoglu M. The effect of restoration thickness and resin cement shade on the color and translucency of a high-translucency monolithic zirconia. *J Prosthet Dent.* 2020;123(1):149-54.
82. Li S, Zhang L, Liang S, Liu Y, Xing W. Effect of ceramic type and thickness on the masking ability of chairside machinable all-ceramic crowns. *Hua Xi Kou Qiang Yi Xue Za Zhi.* 2024;42(1):56-61.
83. Shadman N, Ebrahimi SF, Shoul MA, Kandi SG, Rostami S. The minimum thickness of a multilayer ceramic restoration required for masking dark background. *Dent Res J (Isfahan).* 2022;19:31.
84. Valizadeh S, Mahmoudi Nahavandi A, Daryadar M, Özcan M, Hashemikamangar SS. The effect of ceramic thickness on opalescence. *Clin Exp Dent Res.* 2020;6(6):693-9.
85. Chongkavinit P, Anunmana C. Optical effect of resin cement, abutment material, and ceramic thickness on the final shade of CAD-CAM ceramic restorations. *J Prosthet Dent.* 2021;125(3):517.e1-.e8.

86. Fachinetto E, Chiapinotto GF, Barreto VSM, Pecho O, Pereira GKR, Bacchi A. Masking ability of CAD/CAM monolithic ceramics: effect of ceramic type and thickness, and try-in paste shade. *Quintessence Int.* 2023;54(6):442-50.
87. Della Bona A, Pecho OE, Ghinea R, Cardona JC, Pérez MM. Colour parameters and shade correspondence of CAD-CAM ceramic systems. *J Dent.* 2015;43(6):726-34.
88. Pop-Ciutrla IS, Dudea D, Eugenia Badea M, Moldovan M, Cîmpean SI, Ghinea R. Shade Correspondence, Color, and Translucency Differences between Human Dentine and a CAD/CAM Hybrid Ceramic System. *J Esthet Restor Dent.* 2016;28 Suppl 1:S46-55.
89. Pop-Ciutrla IS, Ghinea R, Colosi HA, Ruiz-López J, Perez MM, Paravina RD, et al. Color compatibility between dental structures and three different types of ceramic systems. *BMC Oral Health.* 2021;21(1):75.
90. Browning WD, Contreras-Bulnes R, Brackett MG, Brackett WW. Color differences: polymerized composite and corresponding Vitapan Classical shade tab. *J Dent.* 2009;37 Suppl 1:e34-9.
91. <https://www.vita-zahnfabrik.com/de/VITABLOCS-Mark-II-25029.html> 2022 acc. 01.2024
92. Gödiker. Interne Untersuchung, VITA F&E, . 2012 acc. 12.2023.
93. <https://www.vita-zahnfabrik.com/de/VITA-SUPRINITY-PC-44048.html> 2022 acc. 01.2024
94. <https://www.dentsplysirona.com/de-de/kategorien-entdecken/lab/inlab-cad-cam-loesungen-fuer-das-dental-labor/inlab-mc-x5/inlab-mc-x5.html>. DentsplySirona; 2023 acc. 12.2023.
95. Gebrauchsanweisung Vita MK II Nr. 1769 VITABLOCS (Version 012) 2024 [
96. Gebrauchsanweisung Vita Suprinity VITA\_1951\_1951D\_SUPRINITY\_PC\_GA\_DE\_V10\_screen\_de.pdf 2024 [
97. Tabatabaian F BE, Alirezaei P, Épakchi S. . Visual and digital tooth shade selection ^ methods, related effective factors and conditions, and their accuracy and precision: A literature review. *J Esthet Restor Dent.* 2021.
98. <https://www.jamovi.org>. TjpvCSRf. <https://www.jamovi.org>. 2023 [
99. [https://www.researchgate.net/profile/Hussein-Chible/publication/353919181\\_Proposed\\_Guide\\_for\\_Questionnaire\\_Analysis\\_Part\\_2\\_-\\_Numerical\\_Scale\\_Categorical\\_Nominal\\_Categorical\\_Binary\\_and\\_Categorical\\_Ordinal/links/61a2435807be5f31b7bb2dfb/Proposed-Guide-for-Questionnaire-Analysis-Part-2-Numerical-Scale-Categorical-Nominal-Categorical-Binary-and-Categorical-Ordinal.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hussein-Chible/publication/353919181_Proposed_Guide_for_Questionnaire_Analysis_Part_2_-_Numerical_Scale_Categorical_Nominal_Categorical_Binary_and_Categorical_Ordinal/links/61a2435807be5f31b7bb2dfb/Proposed-Guide-for-Questionnaire-Analysis-Part-2-Numerical-Scale-Categorical-Nominal-Categorical-Binary-and-Categorical-Ordinal.pdf) 2021 acc 01.2024 [
100. Lübke E. *Farbempfindung, Farbbeschreibung und Farbmessung : Eine Formel für die Farbsättigung.* Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden; 2013.
101. Kern M, Wolfart S, Heydecke G, Witkowski S, Türp JC, Strub JR. *Curriculum Prothetik : Band 2.* Berlin, GERMANY: Quintessenz Verlag; 2022. 225 p.
102. Ghinea R, Ugarte-Alvan L, Yebra A, Pecho OE, Paravina RD, Perez Mdel M. Influence of surface roughness on the color of dental-resin composites. *J Zhejiang Univ Sci B.* 2011;12(7):552-62.
103. Dozić A, Kleverlaan CJ, Meegdes M, van der Zel J, Feilzer AJ. The influence of porcelain layer thickness on the final shade of ceramic restorations. *The Journal of Prosthetic Dentistry.* 2003;90(6):563-70.
104. Kürklü D, Azer SS, Yilmaz B, Johnston WM. Porcelain thickness and cement shade effects on the colour and translucency of porcelain veneering materials. *Journal of dentistry.* 2013;41(11):1043-50.
105. Turgut S, Bagis B, Ayaz EA. Achieving the desired colour in discoloured teeth, using leucite-based CAD-CAM laminate systems. *Journal of dentistry.* 2014;42(1):68-74.
106. Nogueira AD, Della Bona A. The effect of a coupling medium on color and translucency of CAD–CAM ceramics. *Journal of dentistry.* 2013;41:e18-e23.

107. Kim HK, Kim SH. Optical properties of pre-colored dental monolithic zirconia ceramics. *J Dent.* 2016;55:75-81.
108. Tabatabaian F, Karimi M, Namdari M. Color match of high translucency monolithic zirconia restorations with different thicknesses and backgrounds. *J Esthet Restor Dent.* 2020;32(6):615-21.
109. Ongun S, Önoral Ö, Günal-Abduljalil B. Evaluation of shade correspondence between current monolithic CAD/CAM blocks and target shade tab by considering the influence of cement shade and restorative material thickness. *Odontology.* 2021;109(2):393-402.