

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Komm. Direktor: Prof. Dr. A. Hugger

Oberflächenbeschaffenheit und Farbstabilität
neuer Hochleistungskunststoffe für die CAD/CAM-Technik

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
Der medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von

Bilal Khawaja

2015

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Univ.-Prof. Dr. med. Joachim Windolf

Referent: Prof. Dr. Alfons Hugger

Korreferent: Univ.-Prof. Dr. Dr. Thomas Beikler

Für meinen Vater in memoriam.

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Poster Präsentation: 63. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Prothetische Zahnmedizin und Biomaterialien, Aachen.

Diedrichs G, Khawaja B, Hugger A (2014): Oberflächenbeschaffenheit und Farbstabilität neuer Hochleistungskunststoffe für die CAD/CAM-Technik. Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Vortrag: 14. Nordrheinischer Hochschultag – Gemeinschaftstagung der Nordrheinischen Universitätskliniken für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde mit dem Karl-Häupl-Institut, Bonn

Diedrichs G, Khawaja B, Hugger A (2014): Materialeigenschaften neuer Hochleistungskunststoffe für die CAD/CAM-Technik: Oberflächenbeschaffenheit und Farbstabilität. Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

Abkürzungen

CAD	<i>computer-aided design</i>
CAM	<i>computer-aided manufacturing</i>
Rt	Gesamthöhe des Rauheitsprofils
Rz	gemittelte Rautiefe
Ra	arithmetischer Mittenrauwert
REM	Rasterelektronenmikroskop
MPa	Megapascal (1 MPa = 1 Million Pa = 1 N/mm ²)
GPa	Gigapascal (1 GPa = 1 Milliarde Pa)
E-Modul	Elastizitätsmodul
PEEK	Polyetheretherketon
PMMA	Polymethylmethacrylat
L*- Wert	Luminanz- oder Helligkeitskomponente einer Farbe (s. Kap. 1.2.4)
a*- Wert	Farbkomponente (von Grün bis Rot) (s. Kap. 1.2.4)
b*- Wert	Farbkomponente (von Blau bis Gelb) (s. Kap. 1.2.4)
ΔE	Die Farbdifferenz zwischen zwei Farben L*a*b* 1 und L*a*b* 2
BL	<i>Baseline</i>
Wk	Woche
M	Monat
M	Mittelwerte
SD	Standardabweichung

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Allgemeine Einleitung	1
1.1.1. Anforderungen an Werkstoffe für zahnärztliche Restaurationen	2
1.2. Spezielle Einleitung	3
1.2.1. Dentale Keramiken	3
1.2.1.1. Aufbau und Einteilung	5
1.2.2. Kunststoffe / Komposite	7
1.2.2.1. Definition und Einsatzbereiche von Kunststoffe in der Zahnmedizin	7
1.2.2.2. Komposite	8
1.2.3. Dentale Hochleistungspolymere	11
1.2.3.1. Polyetheretherketon (PEEK)	11
1.2.3.2. Neue Hochleistungskunststoffe für die CAD/CAM-Technik	12
1.2.4. Farbmeterik und CIE–Lab–System	13
2. Ziele der Arbeit	14
3. Material und Methode	15
3.1. Vorbereitung der Prüfkörper	15
3.1.1. Vorbereitung der Hochleistungskunststoff – Plättchen	15
3.1.2. Vorbereitung der Keramik-Plättchen	16
3.2. Versuche zur Farbstabilität der verschiedenen Materialien in fünf unterschiedlichen Lösungen/Substanzen	17
3.3. Messung der Oberflächenrauigkeit (Profilometrie)	19
3.4. Rasterelektronenmikroskopische Analyse	20
3.5. Statistische Datenaufbereitung	21
3.5.1. Datenaufbereitung für den Versuch Farbveränderung	21
3.5.2. Datenaufbereitung für den Versuch Oberflächenrauigkeit	21

4. Ergebnisse	24
4.1. Analyse der Farbveränderungen	24
4.1.1. Fotodokumentation	30
4.2. Analyse der Rautiefenmessungen	35
4.3. REM - Analysen der verschiedenen Produktoberflächen	39
5. Diskussion	43
5.1. Diskussion der Werkstoffauswahl	43
5.2. Diskussion der Prüfkörper- Bearbeitung	44
5.3. Diskussion der Messmethoden	45
5.3.1. Messmethoden Oberflächenrauigkeit	45
5.3.2. Messmethoden zur Farbstabilität	47
5.4. Diskussion der Ergebnisse	48
5.4.1. Ergebnisse der Oberflächenrauigkeits-Untersuchungen	48
5.4.2. Ergebnisse der Farbstabilitäts-Untersuchungen	49
6. Zusammenfassung	50
7. Literatur- und Quellenverzeichnis	51

1. Einleitung

1.1. Allgemeine Einleitung

Im 21. Jahrhundert zeichnen sich zwei große Trends für die moderne Gesellschaft ab - zwei Trends, die aus ganz unterschiedlichen Bereichen stammen, nämlich die fortschreitende Digitalisierung und eine weltweite Schönheitswelle. Der aktuelle Ästhetik-Trend ist US-amerikanischen Ursprungs und hat von Hollywood aus viele Länder der Erde erreicht. Die Augen, der Mund und das Lächeln sind wichtige Signale des Menschen. So ist es nicht verwunderlich, dass makellose und gesunde Zähne für den Einzelnen einen sehr hohen Stellenwert besitzen. Mögliche Defizite, die durch angeborene oder erworbene Zahnschäden, Zahnfehlstellungen oder durch Zahnverluste entstanden sind, sollen nicht mehr nur funktionell rekonstruiert werden, sondern auch ästhetisch einem Idealbild entsprechen. Aus funktionellen Gründen können die heutigen Vollkeramikronen und Vollkeramikbrücken aber nicht jede Indikation erfüllen (Hämmerle, 2008).

Die Digitalisierung macht auch vor Zahnmedizin und Zahntechnik keinen Halt. Während intraorale Scansysteme noch eher sporadisch in der zahnärztlichen Praxis genutzt werden, gehört das rechnerunterstützte Konstruieren und die rechnerunterstützte Fertigung, kurz CAD/CAM (*computer-aided design/ computer-aided manufacturing*), bereits in den Praxisalltag (Hoffmann, 2013). Auf diese Art hergestellte Kronen sollen schneller, besser und wirtschaftlicher sein als die konventionell hergestellten Kronen in der analogen Zahntechnik.

Beim CAD/CAM werden prinzipiell drei Arbeitsstufen durchlaufen: Informationen sammeln (optisch, mechanisch), Rekonstruktion entwerfen (CAD) und Rekonstruktion herstellen (CAM). Die Anschaffungskosten dieser Geräte sind sehr hoch, weshalb sich zentrale Fräszentren entwickelt haben, so dass viele Dentallabore lediglich den Scanner kaufen und die Daten den Fräszentren online übermitteln (Hämmerle, 2008). Neben der gewerblichen Fertigung gibt es auch kleine Fräsmaschinen, mit denen kleine Einheiten wie Inlays, Teilkronen,

Einzelkronen und kleine Brücken direkt in der zahnärztlichen Praxis angefertigt werden können (*Chairside*-Anfertigung).

Die CAD/CAM- Technologie hat durch die Verfügbarkeit von stabileren Oxidkeramiken (s.u.) heute stark an Bedeutung gewonnen. Durch die Möglichkeit, Zirkonoxid im vorgesinterten Zustand (Grünbearbeitung) zu bearbeiten, konnte der Indikationsbereich für Vollkeramik auch auf Brücken erweitert werden. Mittels CAD/CAM können praktisch alle Keramiken und diverse andere Materialien, wie Metalle und Kunststoffe, bearbeitet werden. Bei den Systemen, welche Zirkonoxid im sog. Grünzustand bearbeiten, muss anschließend ein Sintern des Werkstücks im Sinterofen folgen.

1.1.1. Anforderungen an Werkstoffe für zahnärztliche Restaurationen

Werkstoffe für zahnärztliche Restaurationen sollten biokompatibel, korrosionsbeständig, hypoallergen, mundbeständig und weder lokal- noch systemisch-toxisch sein (Diedrichs und Rosenhain, 1995). Die verwendeten Materialien sollten idealerweise gleich hart oder nicht viel härter als Zahnschmelz sein, um eventuelle Antagonisten zu schonen. Gleichzeitig sollte eine gute Abrasionsfestigkeit und Resistenz gegen Abnutzung gegeben sein.

Um eine geringe Plaqueanlagerung zu erreichen, sollte die Oberfläche von Restaurationen möglichst glatt sein. Hierdurch wird das Parodontium geschont und zusätzlich kann das Entstehen einer sog. Sekundärkaries indirekt verhindert werden. Denn durch eine persistierende Plaque an der Restauration kann sich der benachbarte Zahnfleischsaum zurückziehen und sich am Kronenrand eine Sekundärkaries bilden. Der Werkstoff sollte ermöglichen, die Farbe der Nachbarzähne zu imitieren und zudem sollte der Werkstoff farbstabil sein, denn nur so kann eine dauerhaft zufriedenstellende Ästhetik erzielt werden. Die Verarbeitbarkeit im zahntechnischen Labor und Erzielung einer guten Passgenauigkeit sind weitere grundsätzliche Anforderungen (Diedrichs und Rosenhain, 1995).

1.2. Spezielle Einleitung

1.2.1. Dentale Keramiken

Für die CAD/CAM-Technik gut eingeführte und bewährte Restaurationsmaterialien sind keramische Werkstoffe. An diesen müssen sich neue Materialien für die CAD/CAM-Technik, wie die polymeren Werkstoffe, messen. „Vollkeramik ist die Bezeichnung für ausschließlich aus Keramik bestehende Restaurationen ohne Metallunterstützung“ (Kern et al., 2012). Vollkeramikrestaurationen zeichnen sich durch eine hohe Abrasionsfestigkeit, lichtleitende und lichtbrechende Eigenschaften ähnlich der natürlichen Zahnhartsubstanz und einer guten Farbbeständigkeit aus. Der Übergang von der Restauration in die unpräparierte Zahnschicht kann so gestaltet werden, dass er kaum sichtbar ist. Keramiken sind unter den Bedingungen, welche in der Mundhöhle vorliegen, chemisch inert zu anderen evtl. vorhandenen Restaurationsmaterialien. Sie gehen nicht in Lösung, weshalb sie sehr biokompatibel sind. Sie wirken außerdem thermisch isolierend, weshalb die Überkappung von vitalem Dentin weitgehend problemlos möglich ist (Kern et al., 2012).

Vollkeramik-Restaurationen haben gegenüber metallkeramischen Restaurationen verschiedene Vorteile. Durch den Verzicht auf ein metallisches Gerüst kann es nicht zu freiliegenden Metallrändern kommen. Durch freiliegende Metallränder können ästhetische und perioprothetische Probleme entstehen. Weitere Vorteile sind die bessere Lichtleitung im Gegensatz zur metallischen Lichtundurchlässigkeit und, dass es nicht zu Korrosionserscheinungen kommen kann (Gehre und Kappert, 2008).

Die Nachteile der Keramiken sind ihre Sprödigkeit, Bruchzähigkeit und die geringere Biegefestigkeit im Vergleich zu Metalllegierungen. Sie sind auf Druck hoch belastbar, jedoch reagieren sie empfindlicher auf Zugspannungen. Außerdem erfordern sie mehr Aufwand für die Präparation der Zähne. Es ist ein hoher Abtrag von der Zahnhartsubstanz notwendig, um eine Vollkeramikkrone

aufnehmen zu können. Auch die Eingliederung der Keramik-Restaurationen in der zahnärztlichen Behandlung ist aufwändiger, denn diese werden meist adhäsiv an dem präparierten Zahnstumpf befestigt.

Für den Einsatz vollkeramischer Restaurationen muss die richtige Indikationsstellung beachtet und die anatomischen Voraussetzungen müssen erfüllt werden, um einen Langzeiterfolg zu erzielen (Kern et al., 2012). Als Kontraindikationen für vollkeramische Restaurationen gelten unzureichende Mundhygiene des Patienten wegen fehlendem Effekt der Oligodynamie, Gebissfehlentwicklungen der Deckbiss-, bzw. Tiefbissgruppe, Bruxismus, Parafunktionen, Kiefergelenksbeschwerden, Zahnlockerungen, ungünstige Platzverhältnisse und/oder weite Pulpencaven (Gehre und Kappert, 2008).

In der zahntechnischen Fertigung erweisen sich die keramischen Werkstoffe als techniksensibler als Kunststoffe, vor allem was das Beschleifen der Keramikgerüste anbelangt. Hierbei kann es zu einer unbemerkten Rissfortschreitung innerhalb der Keramik kommen (Tinschert, 1996). Für die Fertigung und die spätere Eingliederung im Munde des Patienten stehen unterschiedliche Produktionswege und Befestigungsmaterialien je nach Art der Keramik zur Verfügung. So muss die geringere Bruchfestigkeit einzelner Keramiksysteme klinisch häufig durch eine adhäsive Befestigung am Zahn kompensiert werden (Kern et al., 2012).

Wegen der hohen Ansprüche an die Belastungsfähigkeit der Restaurationswerkstoffe, werden heute überwiegend industriell vorgefertigte Keramiken eingesetzt, die in der Presstechnik oder im CAD / CAM-Verfahren verarbeitet werden. Monolithische Restaurationen aus industriell vorgefertigten Keramiken können nur oberflächlich individualisiert und charakterisiert werden. Daher werden häufig lediglich Gerüste aus Keramik hergestellt, die dann manuell mit Verblendkeramik geschichtet werden. Der Vorteil der monolithischen Keramikrestaurationen soll in der verbesserten Materialqualität und Bruchfestigkeit liegen (Kern et al., 2012).

1.2.1.1. Aufbau und Einteilung

„Dentalkeramiken bestehen aus einer amorphen, transparenten Glasphase, in die kristalline Partikel dispers verteilt eingelagert sind“ (Kern et al., 2012). Zu den Eigenschaften der Kristalle zählen die Lichtstreuung und Trübung der transparenten Glasphase wodurch eine farbliche Anpassung an die Zahnhartsubstanz ermöglicht wird, die Standfestigkeit beim Brennen (Sintern), die Steuerung des Wärmeausdehnungskoeffizienten (WAK) und die Endfestigkeit unter funktioneller Belastung im Mund (Hämmerle, 2008). Durch den Kristallgehalt in der Zusammensetzung der Keramik können die Stabilität und die ästhetische Wirkung der Keramik gesteuert werden. Die Stabilität wird nicht nur durch einen hohen Kristallgehalt, sondern auch durch die dichte und homogene Partikelverteilung bestimmt. Der Verbund zwischen Kristallen und Glasmatrix spielt hierbei auch eine wichtige Rolle (Kern et al., 2012). Die Zunahme an Festigkeit führt jedoch zu einem Verlust an Transluzenz, wodurch ästhetische Einbußen in Kauf genommen werden (Kern et al., 2012). Aufgrund der dadurch erhöhten Opazität werden Keramiken mit einem höheren Kristallanteil eher als Gerüstmaterial verwendet, welches wie ein Metallgerüst mit einer transluzenten Keramik verblendet wird (Hämmerle, 2008). Das Spröbruchverhalten (auch Trennbruchverhalten) ist ein schlagartig auftretendes Materialversagen das charakteristisch für die keramischen Werkstoffe ist. Eine weitere Differenzierung vollkeramischer Werkstoffe ist somit notwendig. Kern (2012) vergleicht die dentalen Keramiken mit auch im täglichen Leben verwendeten Keramiken. „Vollkeramik ist nicht gleich Vollkeramik, so wie auch im täglichen Leben der Blumentopf aus Keramik nicht mit den Hochleistungskeramiken in der Automobil- und Raumfahrttechnik vergleichbar ist“ (Kern et al., 2012)

Abb. 1 zeigt die Einteilung von Keramiken nach Pospiech (2004). Hier werden Keramiken nach ihrer chemischen Zusammensetzung unterschieden. Dabei werden zwei übergeordnete Gruppen differenziert: Die mehrphasigen Silikatkeramiken mit hohem und die einphasigen Oxidkeramiken mit nur sehr geringem oder keinem Glasanteil.

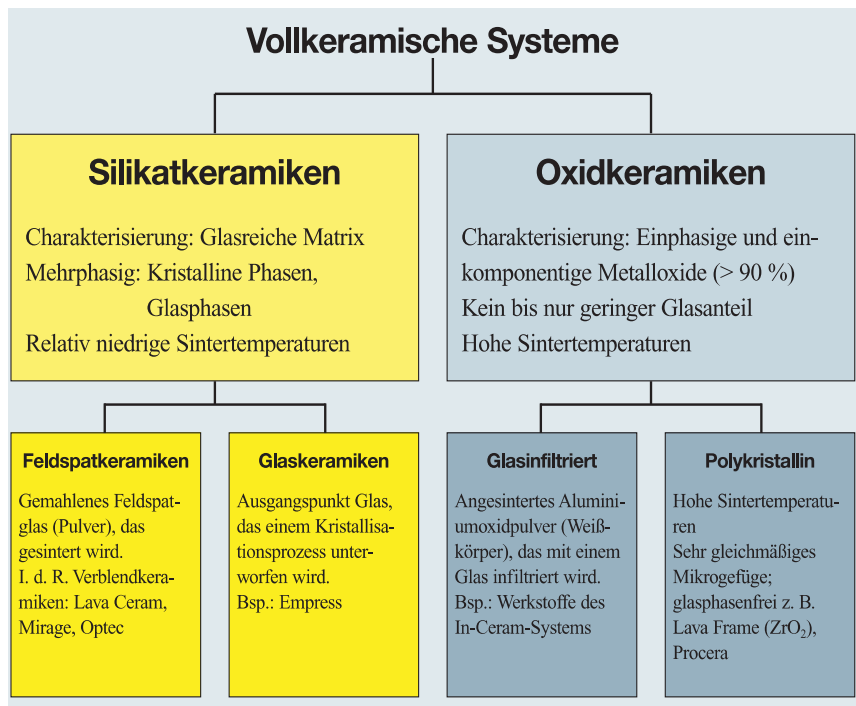


Abb. 1: Dentale vollkeramische Systeme (Pospiech et al., 2004)

Nach Pospiech (2004) gehören die Feldspatkeramiken, die aus dem Geschirrporzellan weiterentwickelt wurden, in die erste Gruppe der Silikatkeramiken (SiO₄). Hierzu zählen die gebräuchlichen Verblendkeramiken und das Testprodukt Vita Mark II (Fa. VITA Zahnfabrik, D-79704 Bad Säckingen) (Gehre und Kappert, 2008). Die Glaskeramiken sind Silikatkeramiken neuerer Generation. Hierbei wird die zunächst amorphe Struktur teilweise auskristallisiert, wodurch der Anteil der Glasphase zu Gunsten von kristallinen Anteilen reduziert wird. Je höher der Kristallanteil (Leuzit, Lithiumdisilikat), desto stabiler ist die Keramik (Pospiech et al., 2004). Eine Erklärung hierfür sieht Pospiech (2004) in der Verlängerung der mittleren Weglänge entstehender Risse und in der damit verbundenen Erzeugung größerer Oberflächen. Das Testprodukt e.max CAD (Fa. Ivoclar, Schaan 9494, Liechtenstein) ist eine Lithiumdisilikat-Keramik (Kappert et al., 2006). Silikatkeramiken können wie folgt verarbeitet werden: Sintern im Brennofen, Pressen (Formgebung im plastischen Zustand) sowie durch computergesteuertes Ausschleifen aus industriell vorgefertigten Keramikblocks.

Bei den Lithiumdisilikat-Keramiken folgt nach dem computergesteuerten Ausschleifen eine 20-minütige Wärmebehandlung bei ca. 850°C, wobei die

Lithiummetasilikat-Kristalle aufgelöst und Lithiumdisilikat-Kristalle von 1-2 µm Länge gebildet werden. Hierdurch entsteht eine hohe Endfestigkeit, die durch unmittelbare Bearbeitung durch etablierte CAD/CAM-Systeme nicht ermöglicht würde (Gehre und Kappert, 2008).

Die Oxidkeramiken stehen in der zweiten Gruppe. Sie sind entweder glasinfiltriert oder polykristalliner Natur (Pospiech et al., 2004). Die glasinfiltrierten Keramiken haben ein poröses Gerüst, welches meist aus Aluminiumoxid-Kristallen (Al_2O_3) besteht. Nach der Vorbereitung durch Schlickertechnik oder CAD/CAM-Technologie erfolgt zur Verfestigung die Infiltration des Gerüsts mit Lanthanglas. Eine Individualisierung durch eine aufbrennkeramische Verblendung ist möglich. Die polykristallinen Oxidkeramiken sind hochfest. Sie bestehen aus einem rein kristallinen Gerüst aus Aluminiumoxid (Al_2O_3) oder Zirkoniumdioxid (ZrO_2). Die zahntechnische Verarbeitung erfolgt durch CAD/CAM-Technik aus industriell hergestellten dichtgesinterten oder vorgesinterten Blocks. Letztere schrumpfen bei der Endsinterung um ca. 20%, was bei der CAD/CAM-Fertigung zuvor berücksichtigt wird (Pospiech et al., 2004).

1.2.2. Kunststoffe / Komposite

1.2.2.1. Definition und Einsatzbereiche von Kunststoffen in der Zahnmedizin

„Unter Kunststoffen versteht man hochmolekulare Verbindungen, die durch chemische Umwandlung von Naturstoffen oder durch Synthese aus niedermolekularen Substanzen hergestellt werden“ (Janda, 1996). In der Zahnmedizin nehmen dentale Kunststoffe aufgrund ihres breiten Anwendungsspektrums in der prothetischen, konservierenden und in der orthodontischen Zahnheilkunde eine bedeutende Stellung ein. Eingesetzt werden sie als Basismaterial für Prothesen oder kieferorthopädische Apparaturen, Prothesenzähne, Verblendmaterialien, provisorische Kronen und

Brücken, Füllungswerkstoffe, Versiegelungs- und Befestigungsmaterialien (Janda, 1996).

1.2.2.2. Komposite

„Als Komposit wird traditionell eine Mischung von Werkstoffen mit mindestens zwei Phasen stark unterschiedlicher Eigenschaften bezeichnet“ (Kunzelmann, 2008). Dentale Komposite bestehen aus einer organischen Matrix und Füllkörpern, welche mit ihr über eine Verbundschicht verbunden sind. Zusätzlich enthalten sie Initiatoren für die Polymerisation, Inhibitoren für die Lagerfähigkeit sowie Pigmente und Farbstoffe.

Bereits Ende der 60er Jahre ersetzen erste Komposite die Silikatzemente in der zahnärztlichen Füllungstherapie (Kunzelmann, 2008). Heute sind Komposite die gebräuchlichsten Füllungsmaterialien in der Bundesrepublik Deutschland. In der zahnärztlichen Prothetik finden Komposite z.B. als Verblendmaterialien für zahnärztliche Kronen, Brücken und Außenteleskope wie auch für die Herstellung von Prothesenzähnen oder provisorischen Kronen eine vielfältige Anwendung. Die dentalen Komposite wurden aus den Prothesenkunststoffen auf Methacrylatbasis entwickelt. Wie bei den Polymethylmethacrylaten (PMMA) wurde bei den Kompositen durch Substitution (Volumensubstitution) bereits auspolymerisierter und gemahlener Anteile desselben Gemischs (Präpolymerisate) die bekannte hohe Polymerisationsschrumpfung vermindert (Kunzelmann, 2008). Nach Marxkors (2008) gelang die entscheidende Verbesserung der Kunststoff-Füllungswerkstoffe jedoch erst mit der Möglichkeit, die anorganischen Partikel durch direkte chemische Bindungen in die organische Matrix einzubeziehen (Silanisieren der Füllkörper). Mit der Verwendung von Dimethacrylaten (DMA) wurde eine Vernetzung der Kunststoffmatrix und damit eine zusätzliche mechanische Verbesserung erreicht. Abhängig von dem an die Acrylgruppen des Moleküls verbundenen organischen Rest ergibt sich eine Einteilung in aromatische, aliphatische und alicyclische Dimethacrylate. Es werden auch Dimethacrylate (DMA) verwendet, deren Bindeglied Urethangruppen enthält, um die Hydrophobie zu erhöhen und die Quellfähigkeit des polymerisierten

Materials zu reduzieren. Dabei werden z.B. beim Bisphenolglycidylmethacrylat (Bis-GMA), dem Prototyp der aromatischen DMA, die beiden OH-Gruppen mit Kohlensäuremonamid ($H_2N-CO-OH$) verestert. Die Mehrzahl der Komposit-Fabrikate sind Copolymerisate der genannten Monomertypen, wobei die Monomermischung insbesondere auf eine geeignete Fließfähigkeit des Monomers zielt (Marxkors et al., 2008). Neuerungen im Bereich der Monomersysteme lassen eine differenzierte Einteilung der Kompositwerkstoffe (Tabelle 1) auf der Grundlage des Monomersystems sinnvoll erscheinen.

Tabelle 1: Einteilung der Komposite auf der Grundlage der für die Aushärtereaktion wesentlichen funktionellen Gruppe (modifiziert nach Kunzelmann (2008))

<p>Reine Methacrylate: Klassische Dentalmatrix z.B. Bisphenolglycidylmethacrylat (Bis-GMA), Urethandimethacrylat (UDMA), Triethylenglycoldimethacrylat (TEGDMA), Hydroxyethylmethacrylat (HEMA),</p>
- Polarität der Matrix je nach Zusammensetzung variierend
- hohe Festigkeit
<p>Säuremodifizierte Methacrylate: Klassische Ormocere</p>
- hydrophob
- geringe Monomerauslösung (auch Ormocere mit Carboxylfunktionen)
- hydrophiler als reine Methacrylatmatrix
<p>Ringöffnende Epoxide: Oxirane</p>
- schrumpfarm
- hohe Festigkeit
- hydrophob (Silorane)

Als Füllkörper werden in den gegenwärtig gebräuchlichen Kompositen Siliciumdioxid, Quarz, kompakte Gläser, poröse Gläser, Mischoxide, ionenfreisetzende Füllkörper, sphärische gesinterte Fasern, Präpolymerisate, multimodale, nach dem Sol – Gel – Verfahren hergestellte sphärische Füllkörper, Nanofüller (Primärpartikel) oder calcinierte Nanofüller (Agglomerate) eingesetzt. Die meisten Hersteller von Kompositen kombinieren verschiedene Füllkörper. Dabei sollte der Brechungsindex der Füllkörper dem der Matrix ähneln, da sonst das Komposit opak erscheint (Janda, 1996).

Das wichtigste Kriterium der Füllkörper ist die durchschnittliche Größe der einzelnen Partikel. Fortschritte in der Mahltechnologie ermöglichten die Herstellung immer feinerer Partikelgrößen (Tabelle 2).

Tabelle 2: Einteilung der Komposite nach der Größe des Hauptanteils der Füllkörper (modifiziert nach Kunzelmann (2008))

Komposite / Füllkörper	Größe der Füllkörper in Mikrometern (μ)
Megafüller	> 100 μ
Makrofüller	10-100 μ
Midifüller	1-10 μ
Minifüller	0,1-1 μ
Mikrofüller	0,01-0,1 μ
Nanofüller	0,005-0,01 μ

Durch die Zugabe der Füllkörper werden die mechanischen Eigenschaften des Komposites erheblich beeinflusst. Dazu gehören die Reduktion der Polymerisationsschrumpfung (durch Volumensubstitution), die Verbesserung der mechanischen Eigenschaften (z.B. Elastizitätsmodul, Härte, Druckfestigkeit etc.), die thermischen Eigenschaften (thermischer Expansionskoeffizient), die Röntgensichtbarkeit, die optischen Eigenschaften (Transparenz, Opazität, Opaleszenz) und kariespräventive Effekte (z.B. durch Fluoridfreisetzung) (Kunzelmann, 2008).

1.2.3. Dentale Hochleistungspolymere

Unter dentalen Hochleistungskunststoffen fassen Beuer und Schweiger (2013) zahnfarbene Werkstoffe mit einem Anteil aus organischen Makromolekülen, die industriell unter Druck- und Temperaturoptimierten Bedingungen auspolymerisiert wurden, subtraktiv mittels CAD/CAM-Technologie bearbeitet werden können und für den klinischen Einsatz im Mund geeignet sind, zusammen (Beuer und Schweiger, 2013).

1.2.3.1. Polyetheretherketon (PEEK)

Polyetheretherketon besitzt eine hohe Biokompatibilität, ein knochenähnliches Elastizitätsmodul und eine titanähnliche Röntgentransluzenz. Es wird seit ca. 15 Jahren in der Medizin als Implantatmaterial verwendet.

In der zahnmedizinischen Implantologie werden Einheilkappen und temporäre Abutments für Implantate aus PEEK industriell hergestellt und eingesetzt, da dieser Werkstoff eine weißliche Farbe und dazu eine gute Bearbeitbarkeit sowie eine hohe mechanische Stabilität aufweist.

PEEK erlaubt mittels CAD/CAM-Technik die Herstellung individuell gefräster Restaurationen und mittels Injektionsverfahren die Fertigung dünner Strukturen. In einer Studie untersuchten Siewert und Parra (2013) die Stabilität und Dauerhaftigkeit von Einzelkronen und kleinen Brücken. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass PEEK als Gerüstmaterial verwendet werden kann. Jedoch fehle der Spielraum für die naturgetreue Gestaltung der Zahnfarbe. Die Eigenschaften von PEEK lassen auch keine transparenten Varianten zu. Die klinische Anwendung ist somit als Langzeitprovisorien, jedoch nicht für den definitiven Zahnersatz gerechtfertigt (Pospiech, 2014).

1.2.3.2. Neue Hochleistungskunststoffe für die CAD/CAM-Technik

Die mit den Keramiken zu vergleichenden Kunststoffe Shofu Block HC (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan) und Lava Ultimate (Fa. 3 M Espe, D-41453, Neuss) sind Komposite mit einem hohen Anteil an Keramik-Komponenten und lassen sich in die Gruppe der Hochleistungskunststoffe einordnen. Diese laut Herstellerangaben für Einzelzahnrestaurationen indizierten neuen CAD/CAM-Kunststoffe werden wegen der festen Verbindung von keramischen Nanopartikeln mit einer Kunststoffmatrix, auch als Verbundkeramiken bezeichnet. Sie verfügen gleichzeitig über eine hohe Festigkeit (ca. 200 MPa) und eine dentinähnliche Elastizität von ca. 13 GPa. . Das Vollkeramik-Produkt e.max CAD hat dagegen ein Elastizitätsmodul (E-Modul) von ca. 95 GPa. Das E-Modul des Dentins liegt bei ca. 15-20 GPa. Laut Herstellerangabe wird die dentinähnliche Elastizität des Materials durch eine Clusterung nanokeramischer Partikel aus Siliziumoxid und/oder Zirkoniumdioxid und deren Verbindung in einer hochvernetzten Polymermatrix erreicht. Die Verbindung erfolgt in einem speziellen Herstellungsverfahren durch einen Temperprozess. Die Lava Ultimate - Blöcke bestehen ebenfalls zu ca. 80 % Prozent aus Nanokeramik-Komponenten (Zirkoniumoxid- und Siliziumoxid-Nanopartikel), in einer hoch vernetzten Kunststoffmatrix (3M-ESPE, 2013). Die Shofu HC Blöcke bestehen aus einer UDMA Polymer Matrix mit Präpolymerisaten und einem ebenfalls sehr hohen Anteil an Nanofüllern aus Siliziumoxid (Shofu Inc., 2013). Die entstandenen Materialrohlinge sollen laut 3M-ESPE eine sehr homogene Materialstruktur aufweisen und die oben genannten vorteilhaften Eigenschaften aufweisen. Als Indikationen werden dauerhafte, adhäsive Einzelzahnrestaurationen einschließlich Kronen, Implantat-Kronen, Inlays, Onlays und Veneers angegeben.

1.2.4. Farbmeterik und CIE–Lab–System

Die Abkürzung CIE steht für Commission internationale d'éclairage. Das CIE-Lab-Farbraumsystem wurde basierend auf dem Lab-Farbraumsystem entwickelt (Seher und Viohl, 1992). Besonders ist, dass sich das CIE-Lab-System an den physiologischen Eigenschaften der Wahrnehmung des menschlichen Auges und nicht an physikalischen Messgrößen orientiert. Da das menschliche Auge aufgrund seiner Anatomie und Physiologie nicht fähig ist, alle tatsächlich möglichen Farbtöne wahrzunehmen bzw. zu unterscheiden, kommt es zu einer parabelförmigen Farbtafel (Servos, 2010). Die L*-Achse dieses Systems gibt die Helligkeit einer Farbe, die a*- Achse den Rot-Grün-Anteil und die b*- Achse den Gelb-Blau-Anteil an. Die L*-Werte sind immer positiv, und liegen zwischen 0 (=Idealschwarz) bis 100 (=Idealweiß). Rote Farben haben positive a*- Werte und grüne Farbtöne negative a*- Werte. Positive b*- Werte zeigen gelbe und negative b*-Werte Blautöne. Der Farbabstand zweier Farben wird mit der Formel: $\Delta E_{ab} = \sqrt{(\Delta L^*2 + \Delta a^*2 + \Delta b^*2)}$ bestimmt.

Für die Einstufung der vom menschlichen Auge wahrnehmbaren Farbunterschiede gibt es aus der Literatur konkrete Angaben:

$\Delta E < 1$ = sehr klein (wird vom menschlichen Auge nicht wahrgenommen)

1 - 2 = klein (nur durch geschultes Auge sichtbar)

2 - 3,5 = mittel (auch von nicht geschultem Auge sichtbar)

3,5 - 5 = deutlich sichtbar

> 5 = sehr deutlich sichtbar

(Hickel et al., 2005, Kaminsky, 2003, Seher und Viohl, 1992)

2. Ziele der Arbeit

In der Zahnmedizin war CAD/CAM bis vor wenigen Jahren ausschließlich mit der Keramikverarbeitung verbunden. Durch Weiterentwicklungen der Hard- und Software können heutzutage sehr gute Passgenauigkeiten und klinische Ergebnisse erreicht werden. Dies führte dazu, dass auch Legierungen und neuartige Hochleistungspolymere mittels CAD/CAM-Technologie verarbeitet werden können (Kern et al., 2012). Die am Markt befindlichen vollkeramischen monolithischen Werkstoffe besitzen die charakteristischen Eigenschaften der Keramik wie z.B. Sprödigkeit, zu hohes Elastizitätsmodul, keine Reparaturfähigkeit im Munde und eine hohe Härte. Deshalb erscheint der Einsatz alternativer Materialien hoch interessant.

In der vorliegenden Arbeit sollten bewusst solche Werkstoffe eingesetzt werden, welche nach dem modernen Verfahren der CAD/CAM-Technologie zur Herstellung monolithischer Kronen und kleiner Brücken eingesetzt werden können und gleichzeitig eine *Chairside*-Anfertigung erlauben. Dabei handelt es sich um unter Punkt 1.2.3.2. vorgestellte Hochleistungskunststoffe. Es sind zahnfarbene, transluzente Materialien mit einer ausreichend hohen Biegefestigkeit und einem dem Dentin ähnlichen Elastizitätsmodul. Außerdem besitzen sie eine Härte, welche weniger Abrieb an der Zahnhartsubstanz des evtl. vorhandenen natürlichen Antagonisten verursachen. Sie lassen - falls erforderlich - eine Reparatur im Patientenmund zu. Für die Qualität und Ästhetik zahnfarbener Restaurationen ist eine glatte Oberflächenbeschaffenheit der Materialien erforderlich, um die Plaqueanlagerung und Anfälligkeit für Farbveränderungen auf ein Minimum zu reduzieren. Gerade die Farbstabilität ist von besonderer Bedeutung für eine erfolgreiche Langzeitanwendung der Restaurationen. Unerwünschte Farbveränderungen können sich negativ auf die Patientenzufriedenheit auswirken und zusätzliche Kosten für frühzeitige Erneuerungen notwendig werden. In der vorliegenden Studie sollten für den klinischen- und Langzeiterfolg von zahnärztlichen Restaurationen wichtige Parameter, nämlich die Farbstabilität und Oberflächenrauigkeit zweier Vertreter der Hochleistungskunststoffe im Vergleich zu zwei etablierten Keramikprodukten geprüft werden.

3. Material und Methode

In der vorliegenden Arbeit wurden folgende Produkte untersucht:

- Shofu Block HC (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan)
- Lava Ultimate (Fa. 3 M Espe, D-41453, Neuss)
- Vita Mark II (Fa. VITA Zahnfabrik, D-79704 Bad Säckingen)
- e.max CAD (Fa. Ivoclar, FL-9494 Schaan)

3.1. Vorbereitung der Prüfkörper

Zur Vorbereitung der Versuche wurden, ausgehend von Kunststoff- und Keramik-CAD/CAM-Blocks, ca. 12 x 14mm große Plättchen von ca. 2 mm Dicke durch computerunterstützte Fräsmaschinen gefertigt. Die Oberflächen der Plättchen wurden dann manuell endbearbeitet (s.u.) und für die Versuche (s.u.) vorbereitet. Es handelte sich um zwei verschiedene Hochleistungskunststoffe und zwei Keramik-Produkte. Jeweils zehn Plättchen wurden für die Versuche vorbereitet. Die Endbearbeitung erfolgte für die Keramiken und die Hochleistungskunststoffe nach Herstellerangabe auf unterschiedliche Art und Weise. Alle Oberflächenmodifikationen betrafen ausschließlich die zu untersuchende Oberfläche. Die Unterseite der Plättchen blieb unbehandelt. Alle Plättchen wurden für die Konturierung der Oberfläche zunächst mit Dura Green Stones (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan) in Bullet Form behandelt.

Diese Schleifkörper bestehen aus Siliziumkarbid (Korborundum) und wurden im empfohlenen maximalen Drehzahlbereich von 20.000 U x min⁻¹ in Längsrichtung angewendet.

3.1.1. Vorbereitung der Hochleistungskunststoff-Plättchen

Die Hochleistungskunststoff-Plättchen wurden mit CompoMaster Coarse-Bullets (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan) vorgepoliert und danach mit dem Polierinstrument CompoMaster (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan) glanzpoliert. Bei den Polierinstrumenten handelte es sich um Silikonpolierer mit integrierten Diamantpartikeln, welche im empfohlenen maximalen Drehzahlbereich

15.000 U x min⁻¹ und in Längsrichtung angewendet wurden. Die Hochglanzpolitur erfolgte mit Polierbürsten und einer Paste, welche zu 67 Gew.-% Industriediamanten enthält (Dura-Polish DIA (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan)). Als Polierbürsten kamen zuerst Ziegenhaarbürstchen und danach eine Hochglanzbürste (Baumwollschwabbel) zum Einsatz. Hier wurde im Drehzahlbereich 10.000 U x min⁻¹ gearbeitet.

3.1.2. Vorbereitung der Keramik-Plättchen

Die Keramik-Plättchen wurden zunächst mit CeraMaster Coarse-Bullets (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan) vorpoliert, dann mit dem Polierer CeraMaster (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan) poliert. Auch hier handelte es sich um Silikonpolierer mit integrierten Diamantpartikeln.

Zur Reinigung wurden alle Plättchen für 5 Minuten in ein Ultraschall-Bad gelegt. Anschließend wurden sie mit einem Dampfstrahlgerät nochmals gesäubert.

Bei den Keramik-Plättchen folgte noch ein abschließender Glanzbrand. Die Vita Mark II wurden mit der Glasurmasse (Vita Akzent Glaze) beschichtet (Pulver und Lösung) und mit folgender Brennsequenz gebrannt (Tabelle 3). Dies erfolgte zwei Mal.

Tabelle 3: Brennsequenz für Vita Akzent Glaze

Vorwärmtemp. (°C)	Halten (min.)	Anstieg (°C/min.)	ca. Temp. (°C)	Halten (min.)
500	4.00	80	950	1.00

Die IPS e.max CAD-Blocs wurden mit einer Glasurmasse (IPS e.max Ceram Glaze) beschichtet. Dies ist eine gebrauchsfertige Glasur-Paste. Auch hier wurde der Schicht- und Brennvorgang (Tabelle 4) zwei Mal durchgeführt.

Tabelle 4: Brennsequenz für IPS e.max Ceram Glaze

Vorwärmtemp. (°C)	Halten (min.)	Anstieg (°C/min.)	ca. Temp. (°C)	Halten (min.)	V1 (°C)	V2 (°C)
403	6.00	60	770	1.00	450	769

3.2. Versuche zur Farbstabilität der verschiedenen Materialien in fünf unterschiedlichen Lösungen/Substanzen

Für die Versuche zur Farbstabilität wurden folgende Lösungen verwendet:

1. Kaffee: Handelsüblicher Nespresso - Kaffee (Vivalto Lungo), (Fa. Nestle, Schweiz)
2. Tee: Schwarzer Tee (Teekanne nero) (Fa. Teekanne, Deutschland)
3. Cola: Coca Cola (Fa. The Coca Cola Company, USA)
4. Destilliertes Wasser
5. Curcuma – Lösung (s.u.), da diese die Kunststoffe in anderen Studien am stärksten verfärbte (s. Kapitel: Diskussion).

Herstellung der Curcuma-Lösung:

Es wurden 30 ml Isopropanol mit 3 Teelöffeln Curcuma Pulver (Fa. Fuchs, Deutschland) in einem Messbecher vermischt. Als sich das Pulver am Boden des Gefäßes nach 24 Stunden abgesetzt hatte, wurde die gewünschte Menge mit einer Spritze an der Oberfläche abgeschöpft und mit destilliertem Wasser zu einer 0,1%igen Lösung verdünnt.

Alle Lösungen wurden nach Zubereitung in Kunststoffgefäße gefüllt (60 ml), und mittels Schraubverschlüssen verschlossen. In einem Brutschrank (Vivadent Cultura, Fa. Ivoclar, Liechtenstein) wurden die Lösungen auf eine konstante Temperatur von 37°C gebracht und unter Ausschluss von Licht gelagert.

Zur Erfassung der Farbveränderung wurden die L*a*b*- Werte mittels computergesteuerter Farbanalyse mit einem Dental Chroma Meter ShadeEye NCC (Fa. Shofu Inc., Kyoto 605-0983, Japan) bestimmt. Das hierfür benutzte ShadeEye NCC System besteht aus einer Basisstation mit integriertem Drucker

und einer kabellosen Messeinheit. Diese Messeinheit analysiert digital die Zahnfarbe und überträgt anschließend die Informationen mittels Infrarot-Schnittstelle auf die Basisstation, welche die Daten auf einen PC überträgt. Dies geschieht mit Hilfe der zugehörigen Software „ShadeEye Viewer“.

Die Ergebnisse wurden mit Hilfe der Software in Form einer Tabelle und von Diagrammen veranschaulicht.

Die Unterseite aller Plättchen wurde mit einem Tesafilm (Fa. Tesa, D-20253 Hamburg) abgeklebt. Dies verhinderte eine Infiltration der Lösungsfarbpigmente in die unbehandelte Unterseite der Plättchen. Alle Plättchen wurden zuerst für 24 Stunden in destilliertem Wasser gelagert. Dann erfolgte eine Ausgangsmessung der L^* , a^* , und b^* - Werte mittels ShadeEye NCC, bevor sie in die verschiedenen o. a. Testlösungen (jeweils zwei Plättchen pro Sorte) gegeben wurden. Der L^* -Wert beschreibt die Helligkeit (Luminanz) einer Farbe mit Werten von 0 -100, wobei Schwarz $L^*=0$ und Weiß $L=100$ sind. Der a^* - Wert gibt den Rot- oder Grünanteil einer Farbe an. Positive Werte stehen für Rot und negative Werte für Grün. Der b^* - Wert gibt den Gelb- oder Blauanteil einer Farbe an: Positive Werte stehen für Gelb und negative Werte für Blau (Seher und Viohl, 1992).

Nach der Ausgangsmessung wurden die L^* , a^* , b^* - Werte nach einer Woche und nach vier Wochen Lagerung in den Testlösungen nochmals gemessen. Vor jeder Messung wurden die Prüfkörper mit einer Multifunktionsspritze abgesprüht. Hierbei wurde mit dem Wasser- Luft- Gemisch drei Sekunden lang die Oberfläche des Prüfkörpers besprüht und getrocknet. Die Messung der L^* , a^* , b^* - Werte erfolgte an jedem Prüfkörper jeweils neun Mal. Dabei wurde darauf geachtet, dass nur die vorbehandelte Oberfläche und neun verschiedene Messpunkte gewählt wurden. Die randständigen Messpunkte hatten einen Abstand zu dem Randbereich des Plättchens von 1,5 mm. Auch wurde darauf geachtet, dass die Messpunkte einen Abstand von 1,5 mm voneinander hatten. Um ein eventuelles Durchschimmern und eine daraus resultierende Verfälschung der Messergebnisse zu unterbinden, wurde stets auf derselben Unterlage gemessen.

3.3. Messung der Oberflächenrauigkeit (Profilometrie)

Die Messung der Oberflächenrauigkeit wurde mit dem Hommel Tester T8000 R20-300 (Fa. Jenoptik, D-40880 Ratingen) (Abb. 2) durchgeführt.

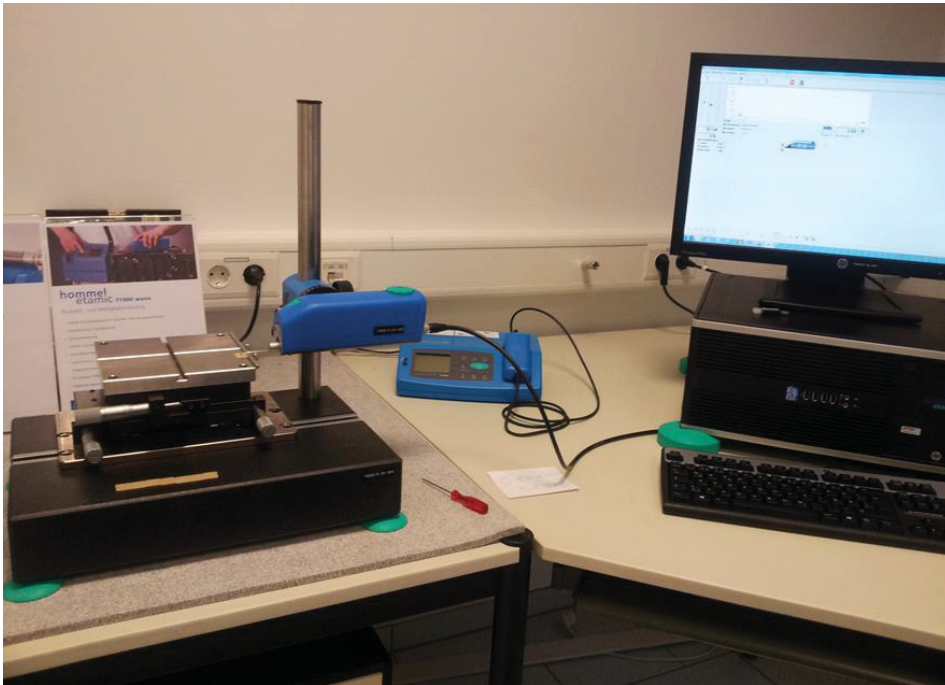


Abb.

2: Versuchsaufbau zur Rauigkeitsmessung mit dem Hommel Tester T8000 R20-300

Insgesamt wurden 40 Plättchen (4 Produkte x 10 Plättchen) untersucht. Jedes Plättchen wurde vier Mal an verschiedenen Strecken der zu untersuchenden Oberfläche mit dem Taster des Geräts abgetastet. Zwei mal in Längs- und zwei Mal in Querrichtung. Die Messstrecke (L_t) betrug jeweils 4,8 mm. Gemessen wurden:

1. R_t : Gesamthöhe des Rauheitsprofils: R_t ist der Abstand zwischen der höchsten Spitze und des tiefsten Tals des Profils der Gesamtmessstrecke
2. R_z : gemittelte Rautiefe: Mittelwert der fünf R_z -Werte aus den fünf Einzelmessstrecken
3. R_a : arithmetischer Mittenrauwert: R_a ist der arithmetische Mittenrauwert aus den Beträgen aller Profilwerte.

Hierbei handelte es sich um eine physikalisch-technische Untersuchung, bei der die Prüfkörper in die Apparatur eingespannt werden, um mittels Tastschnittverfahren die Oberflächenrauigkeit zu messen. Der Taster bestand aus

einer Tastspitze, einem Wandler und einer Gleitkufe. Dieser wurde quer über die Prüfkörperoberfläche bewegt, wobei ein senkrechter Hub des Tasters in ein elektrisches Signal umgesetzt wurde. Nach Signalverstärkung erfolgte die Digitalisierung der Daten mit anschließender EDV- gestützter Rechenanalyse.

3.4. Rasterelektronenmikroskopische Analyse

Für die optische Beurteilung der Oberflächenqualität wurde jeder Prüfkörper mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskopes (Hitachi S-3000N) (Fa. Hitachi, Ltd, Tokyo, 100-8280, Japan) (Abb. 3) betrachtet.



Abb. 3: Das verwendete Rasterelektronenmikroskop Hitachi S-3000N im Aufbau mit EDX- Filter links und Computer, rechts

Das Hitachi S-3000N (Abb. 2) ist ein komplett computer- gesteuertes modernes Filter-REM. Es hat ein EDX- Filter mit Omega- Software (V. 5.11, EDAX, Ametek). Bei diesem Gerät erfolgt die Dokumentation digital, wobei der Datentransfer per USB-Stick oder CD erfolgt.

Da die Oberflächen der Prüfkörper eine elektrisch nichtleitende Schicht darstellen, wurden sie mit einer im Nanometer- Bereich liegenden Goldschicht unter Vakuum bedampft. Dies geschah mit dem Cressington Sputter Coater (Modell 108 auto) (Fa. Cressington, Watford WD19 4BX, England (UK)). Nach dem Sputtern wurden die Prüfkörper bei 500-facher und 1000-facher Vergrößerung analysiert.

3.5. Statistische Datenaufbereitung

Die in einem EXCEL-Format vorliegenden Rohdaten zur Farbveränderung und Oberflächenrauigkeit wurden in eine Systemdatei des Statistik-Programmsystems IBM SPSS 21 eingelesen. Bei den statistischen Berechnungen wurde die Signifikanz für einen p-Wert $\leq 0,05$ festgelegt.

3.5.1. Datenaufbereitung für den Versuch Farbveränderung

Ein breites Spektrum verschiedener Lösungen/Substanzen (Kaffee, Tee, Cola, Curcuma-Lösung, Aqua destillata) wurde eingesetzt, um Farbveränderungen an zehn Testplättchen pro Produkt (Vita Mark II, Shofu Block HC, Lava Ultimate, IPS e.max CAD) im $L^*a^*b^*$ -Farbraum reproduzierbar abzubilden. Als Indizes für Farbänderungen wurden Differenzwerte zwischen den Messzeitpunkten *Baseline*, eine Woche und ein Monat auf Grundlage der Parameter L^* , a^* , und b^* gebildet.

Auf Basis dieser Datenmatrix wurde zunächst eine zweifaktorielle multivariate Varianzanalyse mit den unabhängigen Variablen „Produkt“ und „Lösung“ und den abhängigen Variablen $\Delta E_{Baseline-1Woche}$, $\Delta E_{Baseline-1Monat}$ und $\Delta E_{1Woche-1Monat}$ gerechnet. Außerdem wurden auf die verwendeten Färbelösungen ausgerichtete Varianzanalysen durchgeführt. Für jede der fünf Lösungen wurden drei einfaktorische univariate Varianzanalysen mit dem Faktor „Produkt“ und jeweils einer der drei Zielgrößen ausgeführt.

3.5.2. Datenaufbereitung für den Versuch Oberflächenrauigkeit

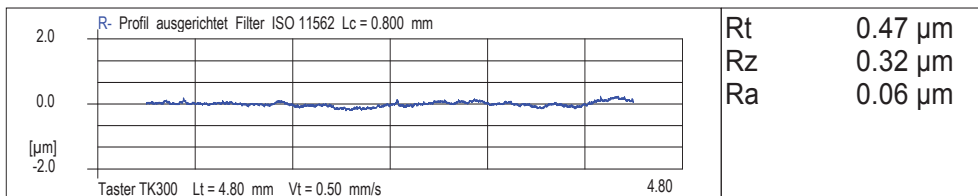
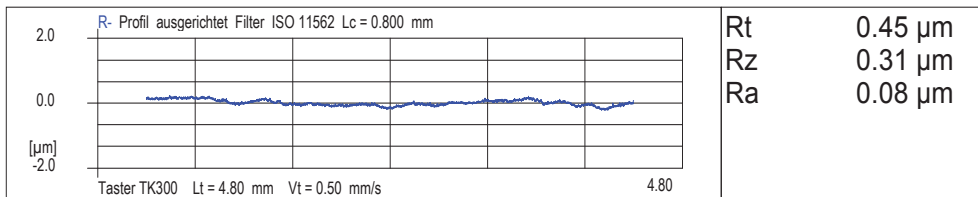
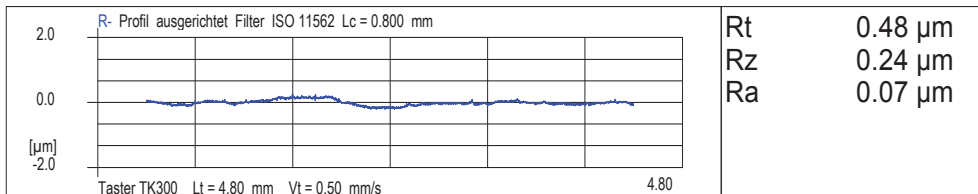
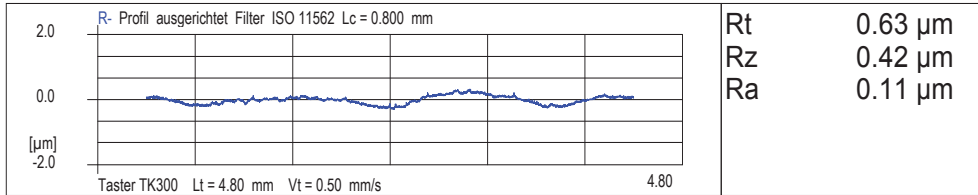
Bei jedem einzelnen von insgesamt 10 Testplättchen wurden pro Produkt (Vita Mark II, Shofu Block HC, Lava Ultimate, IPS e.max CAD) vier Messungen der Oberflächenrauigkeit bei einer Messstrecke von 4,8 mm anhand der Parameter R_t (Gesamthöhe des Rauheitsprofils), R_z (gemittelte Rautiefe) und R_a (arithmetischer Mittenrauwert) durchgeführt und dadurch eine genaue und typische Abbildung der produktspezifischen Rautiefensituation sichergestellt (Abb.4).

Firma: Uniklinik Düsseldorf
 Prüfer: Bilal Khawaja
 Abteilung: Feinmessraum
 Bezeichnung: Shofu Block
 Bezeichnung: 21

Statistik n = 4

Nr.	Kenngößen	Xq	Range	S	Xmax	Xmin
1	Rt	0.51	0.18	0.07	0.63	0.45
2	Rz	0.32	0.18	0.06	0.42	0.24
3	Ra	0.08	0.05	0.02	0.11	0.06

HOMMEL-ETAMIC
 TURBO WAVE V7.55
 Messbedingungen
 Taststrecke (Lt) : 4.80 mm
 Filter P-R-W-Profil : ISO 11562
 Lc (Cut Off) : 0.800 mm



Rt = Gesamthöhe des Rauheitsprofils; Rz = gemittelte Rautiefe; Ra = arithmetischer Mittenrauwert;
 Lt = Messstrecke/Taststrecke

Abb. 4: Beispiel eines Messprotokolls, das anhand der vier Messungen eines Shofu Block HC-Plättchens erstellt wurde.

Die 4 Messwerte wurden jeweils zu einem arithmetischen Mittelwert aggregiert, so dass für die produktvergleichende statistische Analytik 10 Rauheitsschätzwerte je Produkt und je Ziel-Parameter bereitgestellt wurden. Auf Basis dieser Datenmatrix wurde eine einfaktorielle multivariate Varianzanalyse mit dem Faktor ‚Produkt‘ und den abhängigen Variablen R_t , R_z und R_a gerechnet. Multiple Einzelvergleiche (t-Test mit Bonferroni Korrektur) wurden berechnet, um zu klären, zwischen welchen spezifischen Produkten signifikante Differenzen bei der Oberflächenrauheit existieren.

4. Ergebnisse

4.1. Analyse der Farbveränderungen

Die zweifaktorielle multivariate Varianzanalyse mit den unabhängigen Variablen „Produkt“ und „Lösung“ und den abhängigen Variablen $\Delta E_{Baseline-1Woche}$, $\Delta E_{Baseline-1Monat}$ und $\Delta E_{1Woche-1Monat}$ zeigte eine hochsignifikante Interaktion ($p \leq 0,001$) der beiden Faktoren, die darauf hinweist, dass der Einfluss der Produkte auf die Farbänderung substantiell davon abhängt, welche Lösung jeweils zur Anwendung kommt. Der gleiche hochsignifikante Interaktionseffekt wurde auch bei den drei univariaten Varianzanalysen mit den einzelnen ΔE - Zielvariablen nachgewiesen (jeweils $p \leq 0,001$). Die Testergebnisse der drei einfaktoriellen univariaten Varianzanalysen für jede der fünf Lösungen mit dem Faktor „Produkt“ und jeweils einer der drei Ziel-Größen ($\Delta E_{Baseline-1Woche}$, $\Delta E_{Baseline-1Monat}$ und $\Delta E_{1Woche-1Monat}$) sind in Tabelle 5 dargestellt.

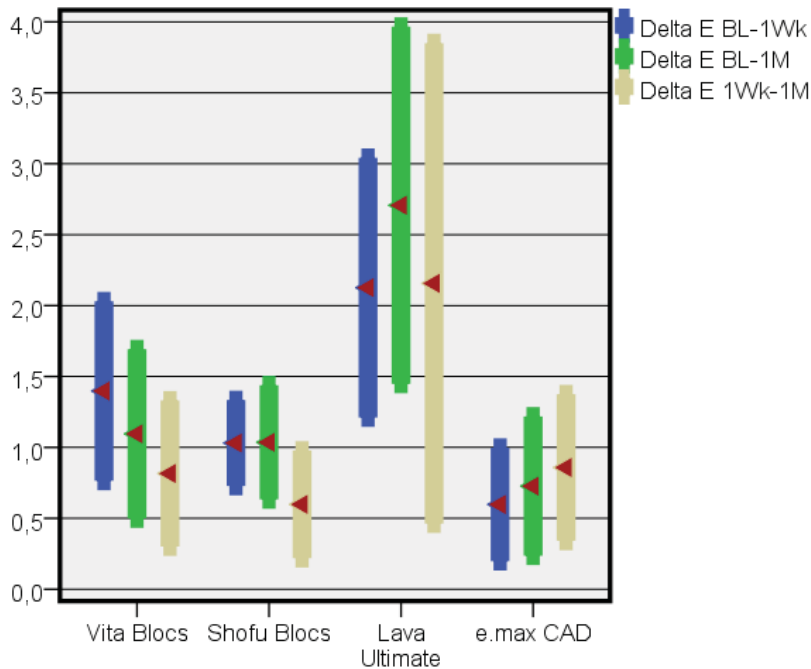
Tabelle 5: Einfluss der verwendeten Lösungen auf die Farbveränderung (ΔE)

Lösung	Parameter	Mittlere quadratische Abweichung	F	df	p-Wert
Kaffee	ΔE_{BL-1Wk}	10,06	27,01	3	$p \leq 0,001$
	ΔE_{BL-1M}	19,09	32,60	3	$p \leq 0,001$
	ΔE_{1Wk-1M}	12,05	13,60	3	$p \leq 0,001$
Tee	ΔE_{BL-1Wk}	5,69	14,46	3	$p \leq 0,001$
	ΔE_{BL-1M}	0,76	2,51	3	0,063 ns
	ΔE_{1Wk-1M}	0,92	3,59	3	0,017
Cola	ΔE_{BL-1Wk}	4,01	19,16	3	$p \leq 0,001$
	ΔE_{BL-1M}	1,69	8,77	3	$p \leq 0,001$
	ΔE_{1Wk-1M}	1,26	6,82	3	$p \leq 0,001$
Curcuma	ΔE_{BL-1Wk}	411,37	633,82	3	$p \leq 0,001$
	ΔE_{BL-1M}	82,86	253,70	3	$p \leq 0,001$
	ΔE_{1Wk-1M}	91,44	170,82	3	$p \leq 0,001$
Aqua dest.	ΔE_{BL-1Wk}	2,52	7,76	3	$p \leq 0,001$
	ΔE_{BL-1M}	0,78	2,86	3	0,041
	ΔE_{1Wk-1M}	2,46	6,70	3	$p \leq 0,001$

BL : *Baseline*; Wk : *Woche*; M : *Monat*; $p \leq 0,05$: signifikant; $p \leq 0,001$: hochsignifikant; ns : nicht signifikant

Wie man Tabelle 5 entnehmen kann, erbringen 12 der 15 Varianzanalysen ein hoch signifikantes Resultat; lediglich eine einzige Analyse fällt insignifikant aus. Bis auf die Testlösung Aqua dest. führten alle Testlösungen zu signifikanten Farbveränderungen gegenüber dem jeweiligen Ausgangswert.

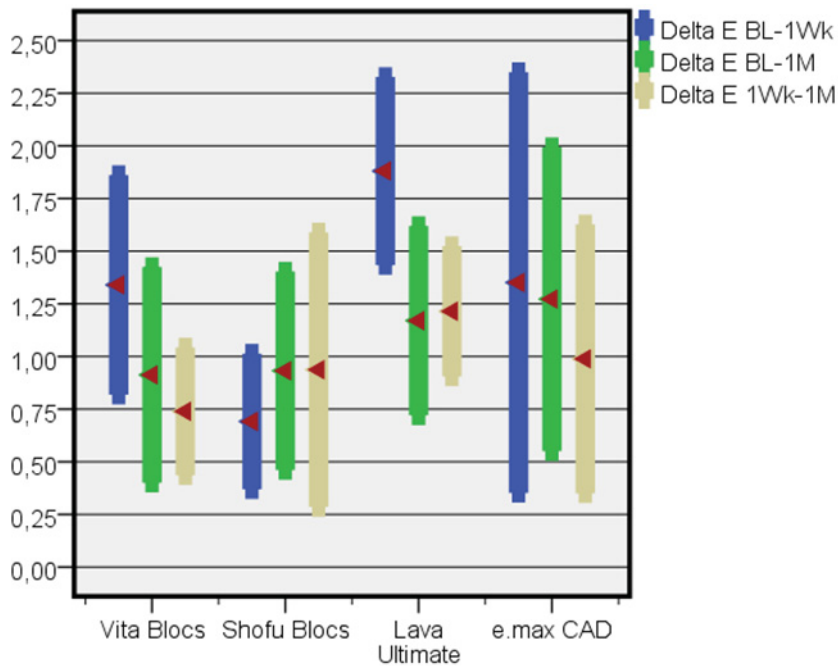
Die Abbildungen 5 bis 9 stellen die arithmetischen Mittelwerte und Streuungen (Standardabweichungen) von ΔE bezogen auf die unterschiedlichen Testlösungen und Testprodukte dar.



X-Achse= Produkt; Y-Achse= Mittelwerte und Standardabweichung von ΔE (Farbveränderung)
 Roter Pfeil= Mittelwert;
 BL: Baseline; Wk: Woche; M: Monat

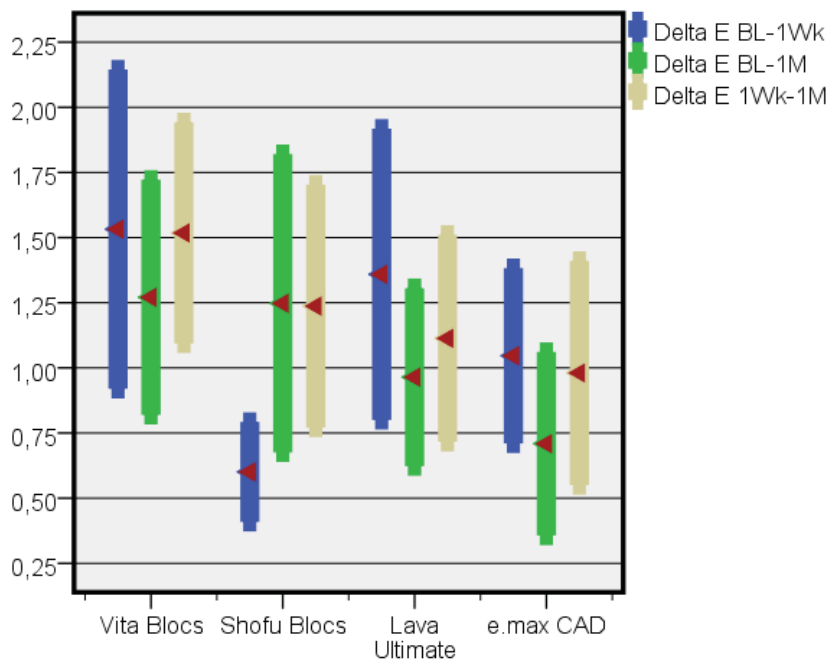
Abb. 5: Kaffee-Lösung: Mittelwerte und Standardabweichung der ΔE -Werte

Abb. 5 zeigt niedrige ΔE - Mittelwerte (rote Pfeile) der Produkte nach der Einlage in der Kaffee-Lösung. Lediglich die Mittelwerte des Produktes Lava Ultimate bewegen sich in dem ΔE -Bereich zwischen ca. 2.1 und 2.7 (Baseline-Messung bis zur Messung nach einem Monat).



X-Achse= Produkt; Y-Achse= Mittelwerte und Standardabweichung von ΔE (Farbveränderung)
 Roter Pfeil= Mittelwert; BL: Baseline; Wk: Woche; M: Monat

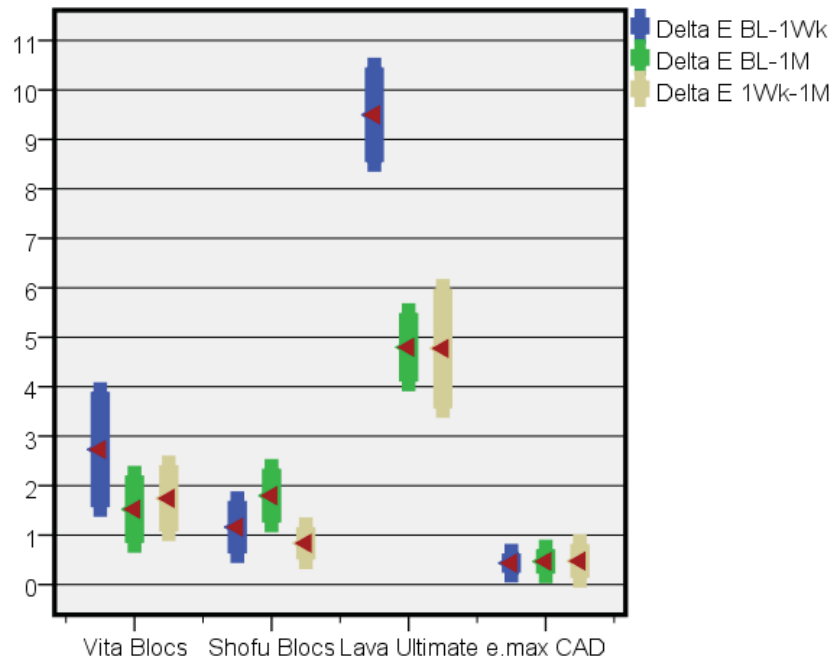
Abb. 6: Tee-Lösung: Mittelwerte und Standardabweichung der ΔE -Werte



X-Achse= Produkt; Y-Achse= Mittelwerte und Standardabweichung von ΔE (Farbveränderung)
 Roter Pfeil= Mittelwert; BL: Baseline; Wk: Woche; M: Monat

Abb. 7: Cola-Lösung: Mittelwerte und Standardabweichung der ΔE -Werte

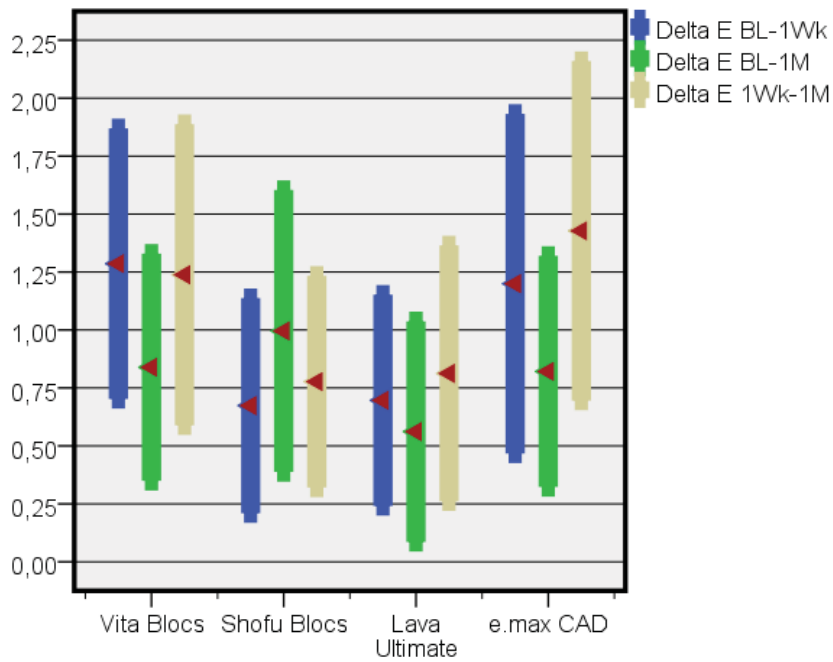
Abb. 6 und 7 zeigen ebenfalls sehr niedrige ΔE - Mittelwerte (rote Pfeile) der Produkte nach der Einlage in der Tee-Lösung (Abb.6) bzw. Cola-Lösung (Abb.7). Bis auf einen ΔE - Mittelwert für das Produkt Lava Ultimate bei Abb. 6 (Baseline-Messung bis Messung nach einer Woche), liegen alle ΔE - Mittelwerte unter 1,6.



X-Achse= Produkt; Y-Achse= Mittelwerte und Standardabweichung von ΔE (Farbveränderung)
 Roter Pfeil= Mittelwert; BL: Baseline; Wk: Woche; M: Monat

Abb. 8: Curcuma-Lösung: Mittelwerte und Standardabweichung der ΔE -Werte

Abb. 8 zeigt hohe ΔE - Mittelwerte bei dem Produkt Lava Ultimate (vor allem der ΔE - Mittelwert Ausgangsmessung bis Messung nach einem Monat (ca. 9,5)).



X-Achse= Produkt; Y-Achse= Mittelwerte und Standardabweichung von ΔE (Farbveränderung)
 Roter Pfeil= Mittelwert; BL: Baseline; Wk: Woche; M: Monat

Abb. 9: Aqua dest.-Lösung: Mittelwerte und Standardabweichung der ΔE -Werte

Abb. 9 zeigt die Messeergebnisse nach Einlage in der Aqua dest.-Lösung mit sehr kleinen ΔE - Mittelwerten.

Tabelle 6: Übersicht über die ermittelten ΔE -Werte bei unterschiedlichen Lösungen und Produkten

Lösung	Parameter Statistik		Produkt			
			Vita Mark II	Shofu Block	Lava Ultimate	e.max CAD
Kaffee (N = 96)	ΔE_{BL-1Wk}	M	1,40	1,03	2,13	0,60
		SD	0,63	0,30	0,92	0,40
	ΔE_{BL-1Mo}	M	1,10	1,04	2,71	0,73
		SD	0,60	0,40	1,26	0,49
	$\Delta E_{1Wk-1Mo}$	M	0,82	0,60	2,16	0,86
		SD	0,51	0,38	1,69	,52
Tee (N = 96)	ΔE_{BL-1Wk}	M	1,34	0,69	1,88	1,35
		SD	0,52	0,32	0,45	1,00
	ΔE_{BL-1Mo}	M	0,91	0,93	1,17	1,27
		SD	0,51	0,47	0,45	0,72
	$\Delta E_{1Wk-1Mo}$	M	0,74	0,94	1,21	0,99
		SD	0,30	0,65	0,31	0,64
Cola (N = 96)	ΔE_{BL-1Wk}	M	1,53	0,60	1,36	1,05
		SD	0,61	0,19	0,56	0,34
	ΔE_{BL-1Mo}	M	1,27	1,25	0,96	0,71
		SD	0,45	0,57	0,34	0,35
	$\Delta E_{1Wk-1Mo}$	M	1,52	1,24	1,11	0,98
		SD	0,42	0,47	0,40	0,43
Curcuma (N = 96)	ΔE_{BL-1Wk}	M	2,73	1,16	9,50	0,43
		SD	1,17	0,53	0,96	0,20
	ΔE_{BL-1Mo}	M	1,52	1,80	4,80	0,47
		SD	0,68	0,55	0,69	0,25
	$\Delta E_{1Wk-1Mo}$	M	1,74	0,84	4,77	0,48
		SD	0,67	0,33	1,21	0,34
Aqua dest. (N = 96)	ΔE_{BL-1Wk}	M	1,29	0,67	0,70	1,20
		SD	0,58	0,46	0,46	0,73
	ΔE_{BL-1Mo}	M	0,84	1,00	0,56	0,82
		SD	0,49	0,61	0,48	0,50
	$\Delta E_{1Wk-1Mo}$	M	1,24	0,78	0,81	1,43
		SD	0,65	0,46	0,55	0,73

Grau: Signifikante Differenz zwischen Shofu Block HC und markiertem Produkt ($p \leq 0,05$, t-Test)
 Grün : Hochsignifikante Differenz zwischen Shofu Block HC und markiertem Produkt ($p \leq 0,001$, t-Test)

BL: *Baseline*; Wk: Woche; Mo: Monat; M= Mittelwerte; SD= Standardabweichung

Tabelle 6 stellt die arithmetischen Mittelwerte und Streuungen (Standardabweichungen) und die Ergebnisse der Testung möglicher Unterschiede zwischen einzelnen Produkten dar.

Bei 17 von 21 signifikanten Einzelvergleichen zwischen den Produkten weist das Produkt Shofu Block HC niedrigere ΔE -Werte und somit niedrigere Farbabstände auf (Tab. 6). Dies gilt insbesondere gegenüber Lava Ultimate und Vita Mark II. In 3 Fällen ist IPS e.max CAD auf der ΔE -Skala im Vergleich mit den Shofu Block HC Testplättchen niedriger positioniert.

4.1.1. Fotodokumentation

Um die optisch erkennbare Verfärbung zu dokumentieren, wurden Fotos jeweils vor (Abb. 10, Abb. 12, Abb. 14, Abb. 16) und nach einwöchiger Einlage der Prüfkörper, in den jeweiligen Substanzen gemacht.

Für jedes Produkt wurden zwei Prüfkörper in jede der fünf Lösungen eingelegt. Auf den Fotos, die die Prüfkörper nach einwöchiger Einlage in den Lösungen zeigen, sieht man die Prüfkörper jeweils übereinander, welche in derselben Lösung eingelegt waren. Die Lösung, in der diese eingelegt waren, ist oberhalb der Prüfkörper (Abb. 11, Abb. 13, Abb. 15, Abb. 17) verzeichnet.



Abb. 10: Shofu Block HC vor Einlage in Testlösungen

Lösung:

Aqua dest.

Kaffee

Curcuma

Tee

Cola



Abb. 11: Shofu Block HC nach einwöchiger Einlage in der jeweils oberhalb notierten Lösung

In Abb. 11 ist keine bis eine nur sehr leichte Farbveränderung der Testplättchen visuell erkennbar. Die Plättchen, welche in der Kaffee- und Curcuma- Lösung gelagert waren, zeigen diese Farbveränderung am deutlichsten.



Abb. 12: Lava Ultimate vor Einlage in Testlösungen

Lösung:

Aqua dest.

Kaffee

Curcuma

Tee

Cola



Abb. 13: Lava Ultimate nach einwöchiger Einlage in der jeweils oberhalb notierten Lösung

Abb. 13 zeigt deutliche und für Curcuma- Lösung mit dem bloßen Auge leicht zu erkennende Farbveränderungen der Lava Ultimate Testplättchen. Die in der Tee- und Cola- Lösung gelagerten Testplättchen zeigen auch hier geringere Farbveränderungen als die in der Kaffee- und Curcuma- Lösung gelagerten Plättchen.



Abb. 14: IPS e.max CAD Blocs vor Einlage in Testlösungen

Lösung:

Aqua dest.

Kaffee

Curcuma

Tee

Cola

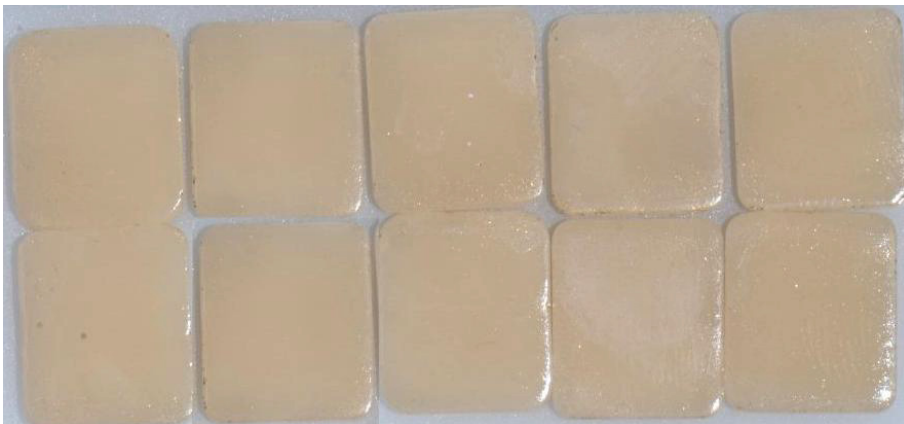


Abb. 15: IPS e.max CAD nach einwöchiger Einlage in der jeweils oberhalb notierten Lösung

Abb. 15 zeigt die keramischen Prüfkörper (IPS e.max CAD), bei denen wie erwartet nur leichte Farbveränderungen hervorgerufen wurden. Dies erinnert im Ausmaß der Farbveränderung an die Prüfkörper von Shofu.

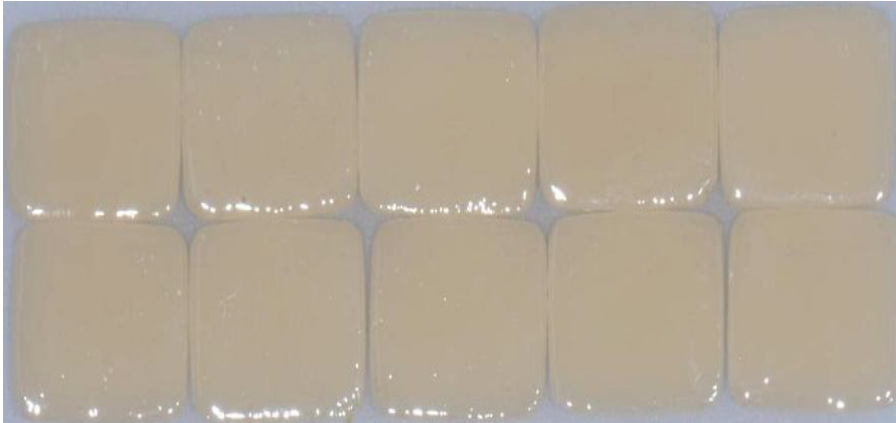


Abb. 16: Vita Mark II vor Einlage in Testlösungen

Lösung:

Aqua dest.

Kaffee

Curcuma

Tee

Cola



Abb. 17: Vita Mark II nach einwöchiger Einlage in der jeweils oberhalb notierten Lösung

Abb. 17 zeigt die keramischen Prüfkörper (Vita Mark II). Bei den beiden Prüfkörpern, die in der Curcuma – Lösung gelagert waren, ist eine sichtbare und stärkere Farbveränderung zu erkennen als bei dem anderen keramischen Produkt (IPS e.max CAD) aus Abbildung 15.

4.2. Analyse der Rautiefenmessungen

Der multivariate Test erbrachte ein hochsignifikantes Resultat ($p \leq 0,001$), so dass davon auszugehen ist, dass die vier Produkte bezüglich der Gesamtheit aller drei Parameter (Gesamthöhe des Rauheitsprofils (Rt), gemittelte Rautiefe (Rz) und arithmetischer Mittenrauwert (Ra)) substantielle Unterschiede aufweisen. In der univariaten Varianzanalyse zeigt der Einflussfaktor ‚Produkt‘ ebenfalls einen hochsignifikanten Effekt bei jedem einzelnen der drei Parameter. Tabelle 7 enthält hierzu die Testergebnisse.

Tabelle 7: Ergebnis der univariaten Varianzanalyse: Test des Produktfaktors mit Rt, Rz, Ra

Parameter	Mittlere quadratische Abweichung	F	df	p-Wert
Rt (μm)	35,88	10,85	3	$p \leq 0,001$
Rz (μm)	5,04	24,61	3	$p \leq 0,001$
Ra (μm)	0,22	29,50	3	$p \leq 0,001$

$p \leq 0,001$: hochsignifikant

Rt = Gesamthöhe des Rauheitsprofils; Rz = gemittelte Rautiefe

Ra = arithmetischer Mittenrauwert

Tabelle 8 und Abbildung 18 (a-c) stellen die arithmetischen Mittelwerte und Streuungen (Standardabweichungen) dar.

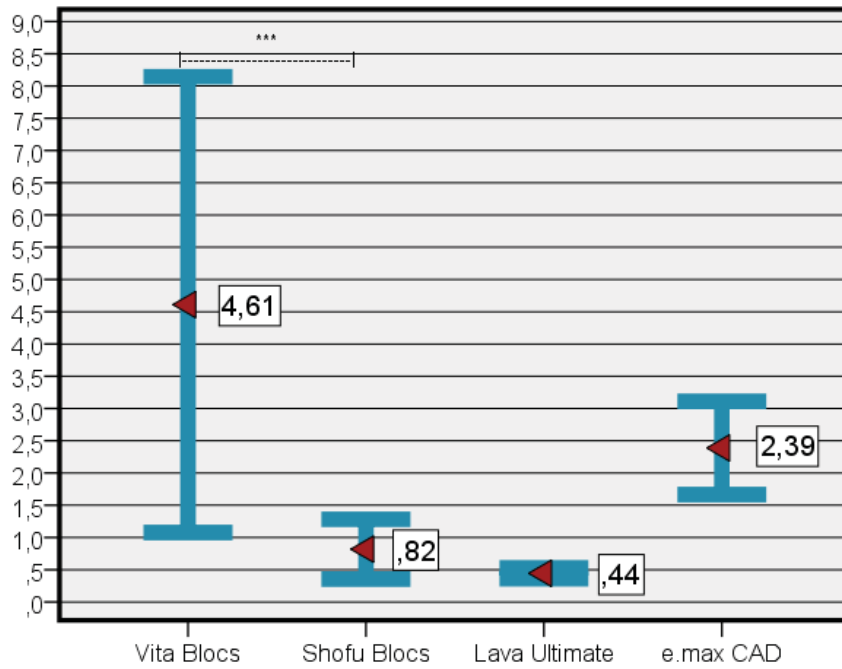
Tabelle 8: Deskriptive Statistik der Rauigkeits-Parameter

Parameter Statistik		Produkt			
		Vita Mark II	Shofu Block	Lava Ultimate	e.max CAD
Rt (μm)	M	4,61	0,82	0,44	2,39
	SD	3,53	0,46	0,08	0,72
	N	10	10	10	10
Rz (μm)	M	1,83	0,40	0,28	1,01
	SD	0,87	0,11	0,04	0,21
	N	10	10	10	10
Ra (μm)	M	0,39	0,11	0,07	0,16
	SD	0,16	0,06	0,01	0,02
	N	10	10	10	10

M = Mittelwerte; SD = Standardabweichung; N = Inspiziert

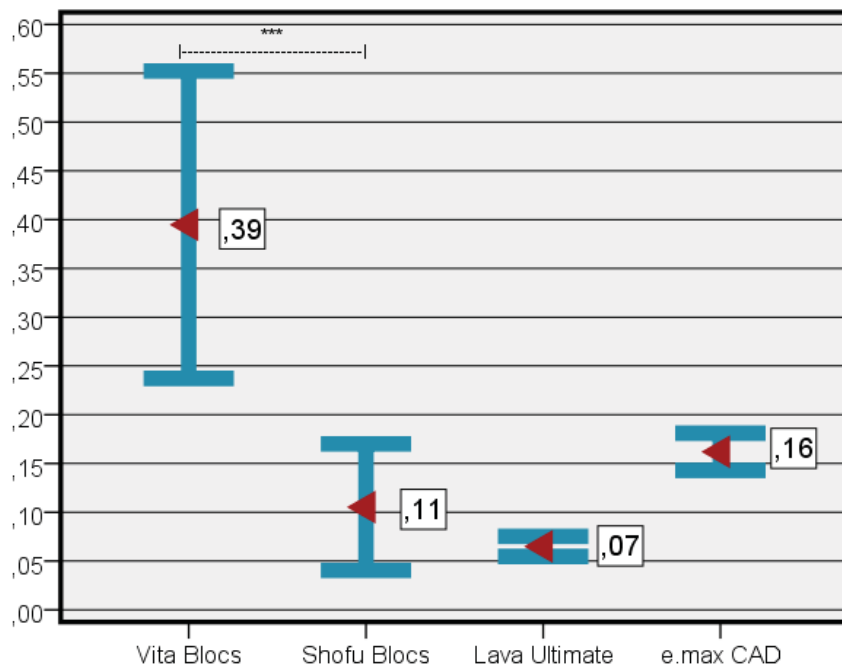
Rt = Gesamthöhe des Rauheitsprofils; Rz = gemittelte Rautiefe

Ra = arithmetischer Mittenrauwert



X-Achse= Mittelwerte und Standardabweichung von Rt (μm), Y-Achse= Produkt
 *** : signifikante Differenz ($p \leq 0,001$, t-Test)

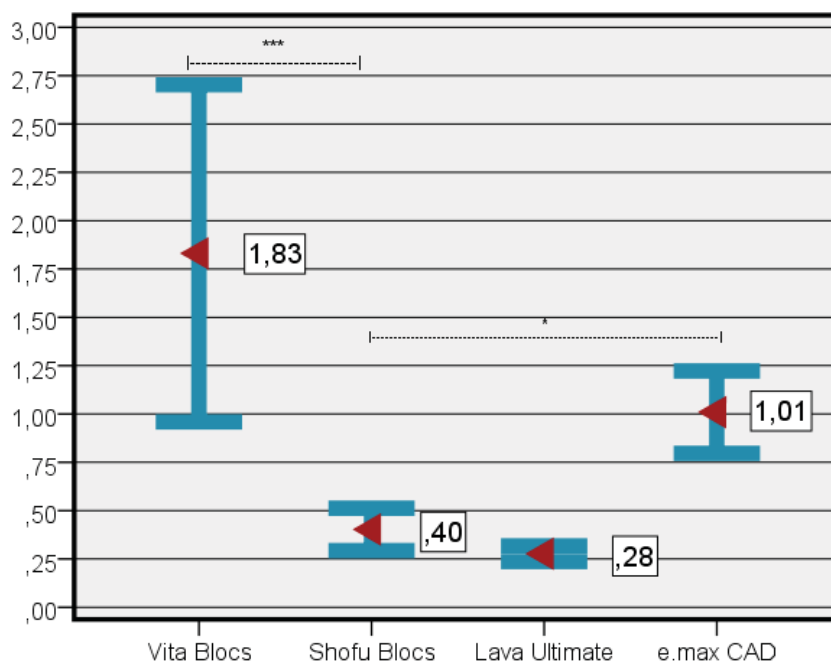
Abb. 18a: Rauigkeits-Parameter Rt: Mittelwerte und Standardabweichung



X-Achse= Mittelwerte und Standardabweichung von Ra (μm), Y-Achse= Produkt
 *** : signifikante Differenz ($p \leq 0,001$, t-Test)

Abb. 18b: Rauigkeits-Parameter Ra: Mittelwerte und Standardabweichung

Die in Tabelle 8 und den Abbildungen 18a und 18b dargestellten Ergebnisse zeigen, dass sich das Produkt Shofu Block HC bezüglich der Rautiefe R_t und des arithmetischen Mittenrauwerts R_a signifikant ausschließlich von dem Produkt Vita Mark II ($p \leq 0,001$), welches jeweils einen sehr markant höheren Rauheitsmittelwert (in μm) aufweist, unterscheidet. Signifikante Differenzen gegenüber den weiteren Produkten bestehen nicht, d.h. hier ist von einer Gleichheit des Shofu-Produktes mit Lava Ultimate und IPS e.max CAD auszugehen.



X-Achse= Mittelwerte und Standardabweichung von R_z (μm), Y-Achse= Produkt
 *** : signifikante Differenz ($p \leq 0,001$, t-Test)

Abb. 18c: Rauigkeits-Parameter R_z : Mittelwerte und Standardabweichung

Auf der μm -Skala der gemittelten Rautiefe R_z ist das Produkt Shofu Block HC nicht nur signifikant niedriger lokalisiert als das Produkt Vita Mark II, ($p \leq 0,001$) sondern auch als IPS e.max CAD ($p = 0,029^*$) (Tab. 8, Abb. 18c). Mit Lava Ultimate liegen Shofu Block HC hingegen gleichauf.

Resümierend ist der Oberflächenrauheits-Mittelwert des Produktes Shofu Block HC – unabhängig von der Wahl des Ziel-Parameters – stets gleich mit dem Mittelwert des Produktes Lava Ultimate positioniert und stets niedriger ausgeprägt als die Mittelwerte von Vita Mark II und IPS e.max CAD. Auf statistischer Ebene ergeben sich hochsignifikante Differenzen gegenüber Vita Mark II bei allen drei Ziel-Parametern sowie eine signifikante Differenz gegenüber IPS e.max CAD bei der gemittelten Rautiefe Rz.

4.3. REM – Analysen der verschiedenen Produktoberflächen

1. REM - Analyse des Produkts Vita Mark II

Abbildung 19 und 20 zeigen das Produkt Vita Mark II nach dem Glasurbrand. Optisch erscheint die Fläche glatt mit vereinzelt kleinen Unregelmäßigkeiten. Bei 1000-facher Vergrößerung (Abb. 20) ist eine flache Reliefbildung zu erkennen.

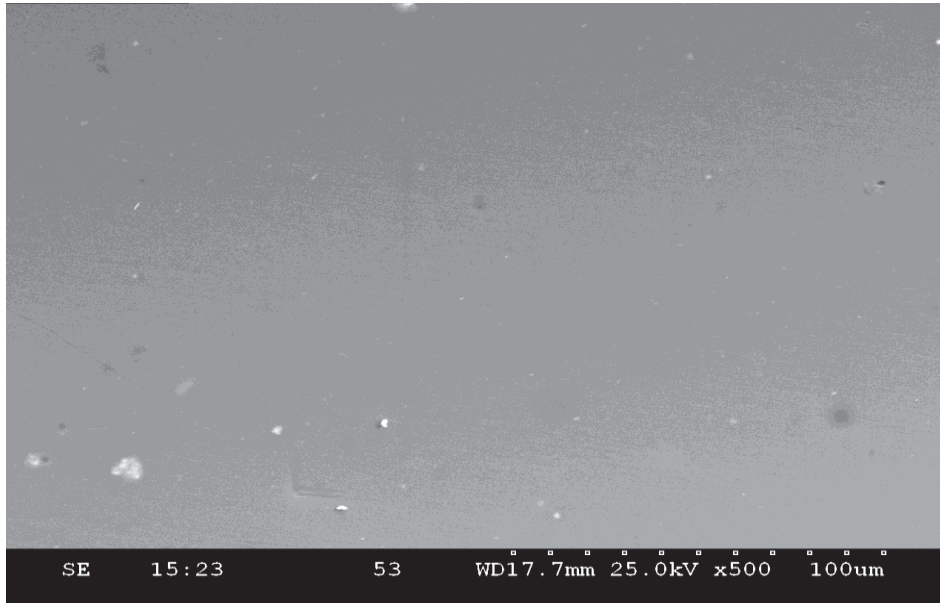


Abb. 19: REM-Aufnahme, Vita Mark II, Brand nach Herstellerangabe, Vergrößerung: 500x

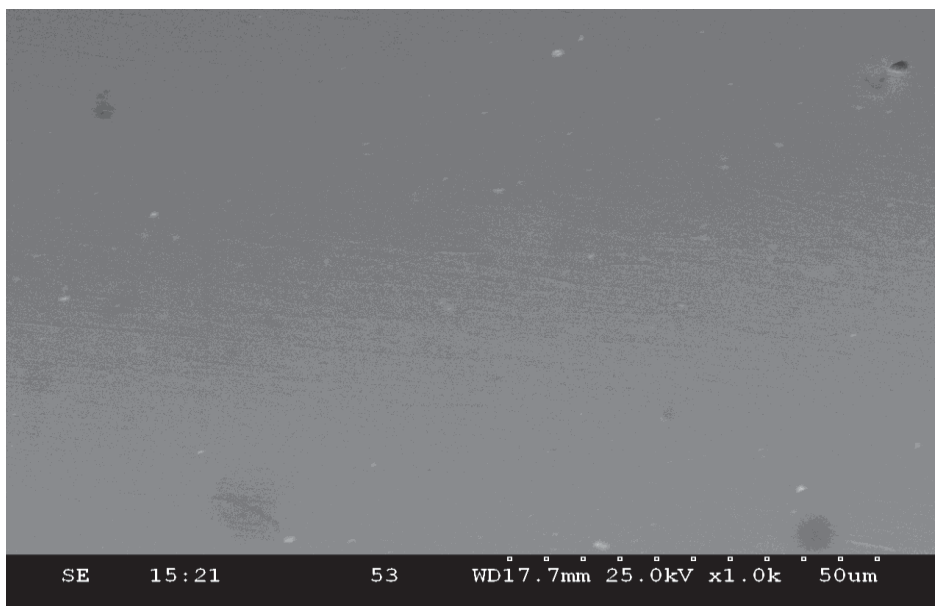


Abb. 20: REM-Aufnahme, Vita Mark II, Brand nach Herstellerangabe, Vergrößerung: 1000x

2. REM- Analyse des Produkts IPS e.max CAD

Abbildungen 21 und 22 zeigen die Oberfläche des Produkts IPS e.max CAD nach dem Glasurbrand. Zu sehen ist eine glatte Oberfläche mit vereinzelt sehr kleinen Unregelmäßigkeiten. Bei 1000-facher Vergrößerung (Abb. 22) ist eine flache Reliefbildung zu erkennen. Somit sind sich die beiden keramischen Produkte (Abb. 20 und Abb. 22) in dieser Hinsicht sehr ähnlich.

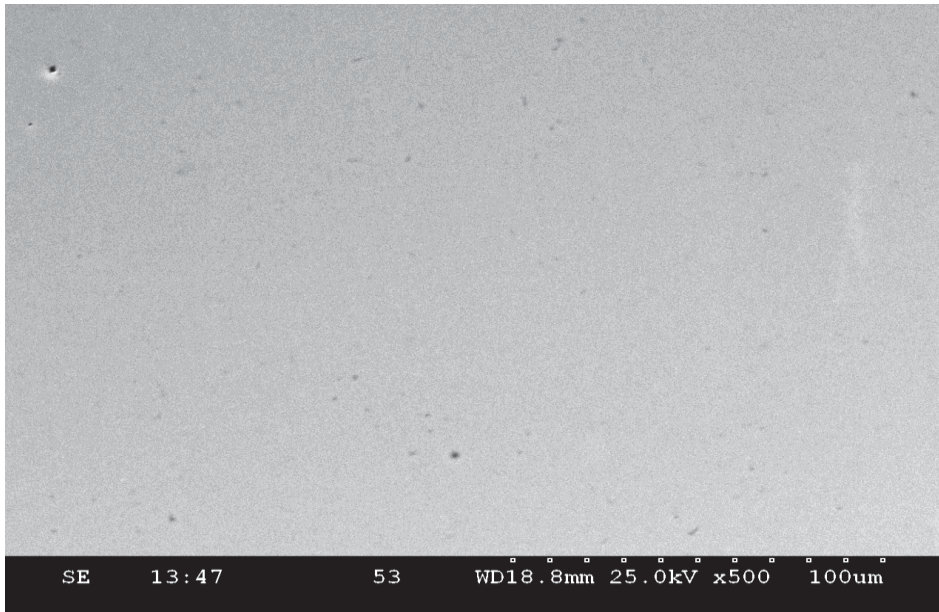


Abb. 21:REM-Aufnahme, IPS e.max CAD, Brand nach Herstellerangabe, Vergrößerung: 500x

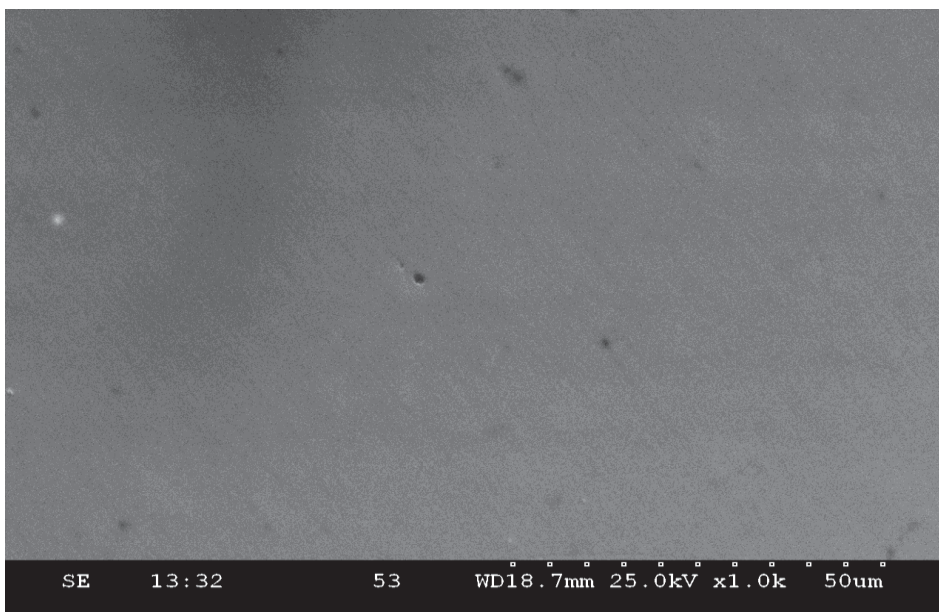


Abb. 22: REM-Aufnahme, IPS e.max CAD, Brand nach Herstellerangabe, Vergrößerung: 1000x

3. REM - Analyse des Produkts Shofu Block HC

Abbildungen 23 und 24 zeigen eine glatte Oberfläche des Produkts Shofu Block HC nach Politur. Es sind kaum Riefen zu erkennen bei 500-facher Vergrößerung. Erst bei 1000-facher Vergrößerung ist ein sehr flaches Relief zu erkennen.

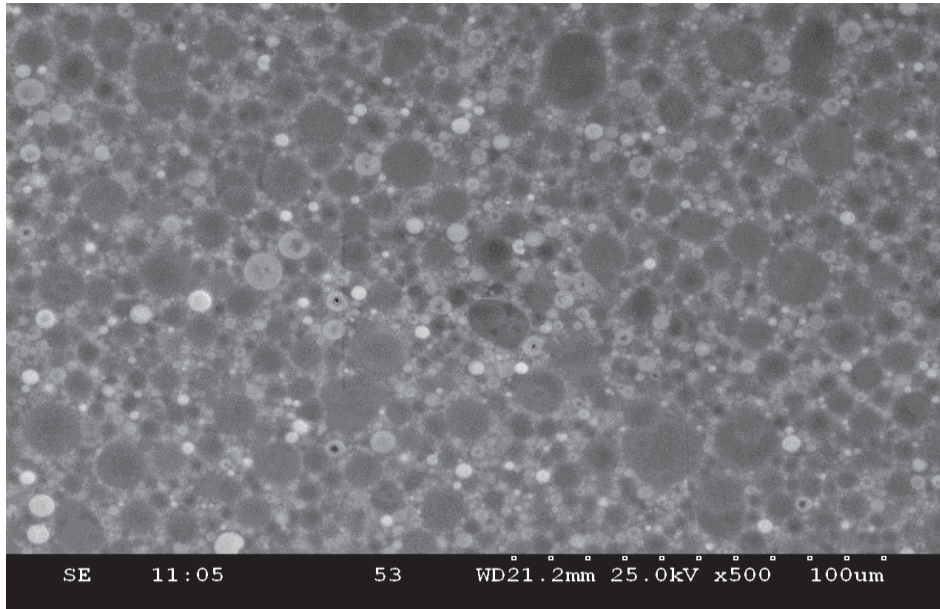


Abb. 23: REM-Aufnahme, Shofu Block HC, Politur nach Herstellerangabe, Vergrößerung: 500x

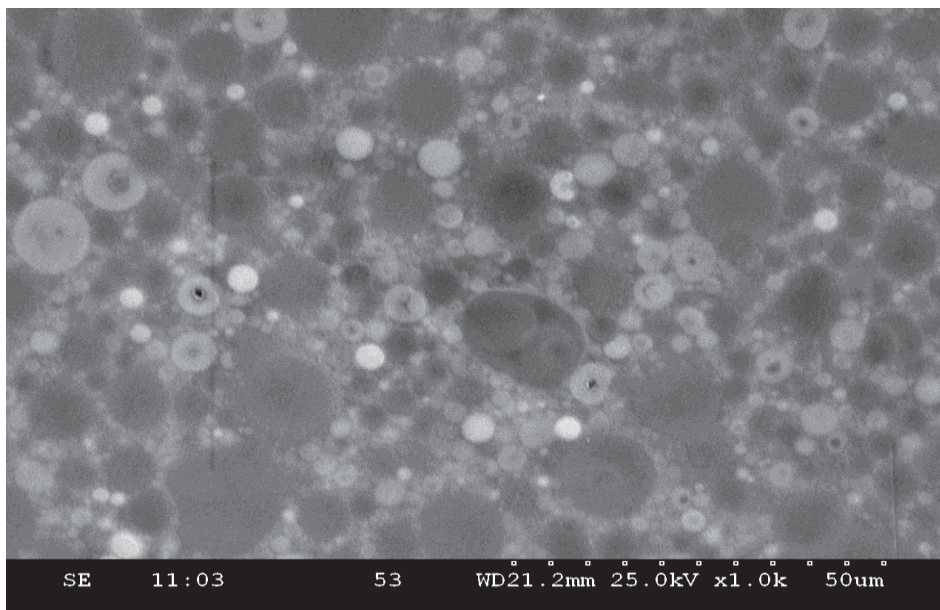


Abb. 24: REM-Aufnahme, Shofu Block HC, Politur nach Herstellerangabe, Vergrößerung: 1000x

4. REM - Analyse des Produkts Lava Ultimate

Abbildung 25 und 26 zeigen die polierte Oberfläche des Produkts Lava Ultimate. Auch hier ist eine glatte Oberfläche mit einem flachen Relief zu erkennen. Die Riefen sind bei diesem Produkt jedoch schon bei einer 500-fachen Vergrößerung deutlich.

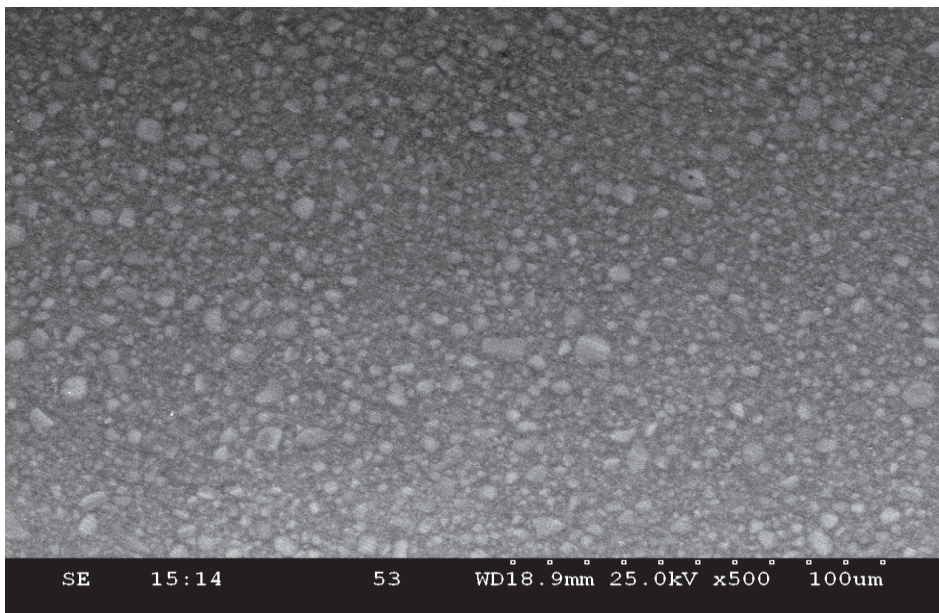


Abb. 25: REM-Aufnahme, Lava Ultimate, Politur nach Herstellerangabe, Vergrößerung: 500x

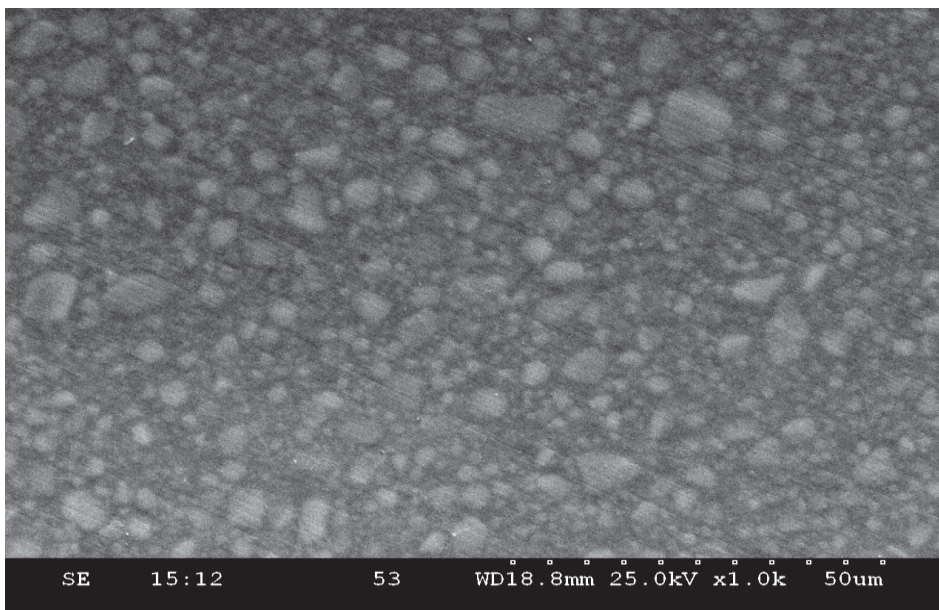


Abb. 26: REM-Aufnahme, Lava Ultimate, Politur nach Herstellerangabe, Vergrößerung: 1000x

5. Diskussion

5.1. Diskussion der Werkstoffauswahl

In dieser Studie wurden zwei Vertreter neuer Hochleistungskunststoffe für die CAD/CAM-Technik getestet, nämlich Lava Ultimate und Shofu Block HC. Lava Ultimate befindet sich bereits auf dem deutschen Markt. Wie in Kapitel 1.2.2.2. ausgeführt bestehen sie aus Nanokeramikfüllkörpern in einer Polymermatrix und werden, obwohl es sich um polymere Werkstoffe handelt, auch als Hybridkeramiken (Abb. 27) bezeichnet.

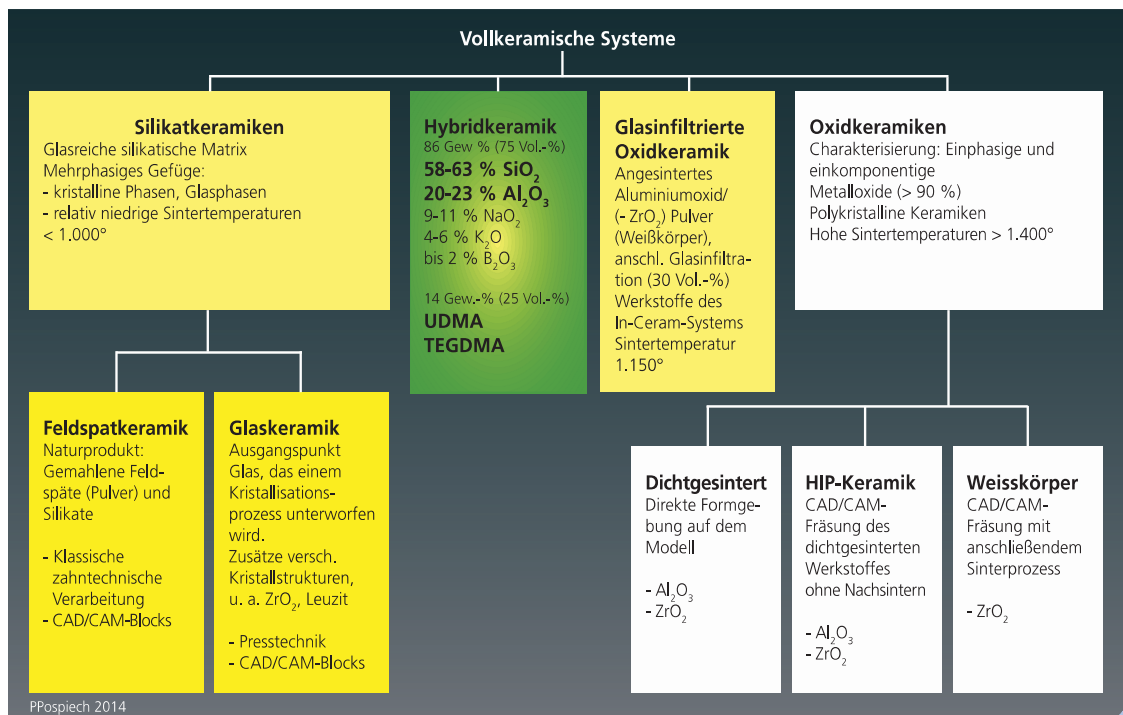


Abb. 27: Einteilung der Vollkeramischen Systeme nach Pospiech 2014

Anders als in CAD/CAM-Technik zu verarbeitende PMMA- oder PEEK-Polymere sollen die getesteten Produkte aufgrund der Erfüllung der Anforderungen an Werkstoffe für zahnärztliche Restaurationen (siehe Kapitel 1.1.1.) für die Herstellung von definitiven Restaurationen geeignet sein. Diese Kunststoffprodukte wurden mit zwei geläufigen für die CAD/CAM Verarbeitung

geeigneten Vollkeramik-Produkten verglichen. Bei den Vollkeramik-Produkten wurden zwei renommierte Vertreter aus der Gruppe der Silikatkeramiken ausgewählt. Silikatkeramiken weisen durch ihre Transluzenz und den sog. Mimikry-Effekt in der monolithischen Verarbeitung im Gegensatz zu den Oxidkeramiken deutlich bessere ästhetische Eigenschaften auf. Bei dem Vita Mark II-Produkt sowie bei der zugehörigen Glasurmasse (Vita Akzent) handelt es sich um Feldspatkeramiken. Bei dem IPS e.max CAD-Produkt sowie der hierfür verwendeten Glasurmasse (IPS e.max Ceram) handelt es sich um eine Lithiumdisilikat-Keramik (Abb. 27). Laut Pospiech (2004) liegt der hauptsächliche chemische Unterschied dieser Produkte im Kristallgehalt, welcher bei dem Lithiumdisilikat-Produkt höher ist.

5.2. Diskussion der Prüfkörper- Bearbeitung

Damit nur die zu testende Oberfläche eine eventuelle Verfärbung erfuhr, wurde die Unterseite der Testplättchen mit einem Tesafilm (Fa. Tesa, Deutschland) abgeklebt. Auch eine Krone würde auf der Innenseite, welche durch den verwendeten Befestigungs-Zement dicht abgedeckt sein sollte, keine Verfärbung annehmen. Eine zusätzliche Verfärbung der Unterseite der Testplättchen würde das Messergebnis beim Farbstabilitätsversuch verfälschen.

Die Testplättchen wurden mit den Polierern so lange behandelt, bis sie augenscheinlich glatt waren. Dabei wurden die Polierer immer in Längsrichtung und im empfohlenen Drehzahlbereich benutzt. Wie auch von anderen Autoren beschrieben, erfolgte die Politur manuell und in nach Körnungsgröße abgestuften Bearbeitungsschritten (von grob zu fein) (Schmid et al., 1991). Einzelne Autoren empfehlen, die Probekörper in eine mechanische Vorrichtung einzubauen, um individuelle Bearbeitungsdifferenzen zu vermeiden. Um standardisierte Arbeitsbedingungen zu schaffen, benutzten sie eine Apparatur, die Parameter wie Anpressdruck, Lagerung des Fräasers und Vorschubgeschwindigkeit definierte (Fischer et al., 1999, Seitner, 1995).

Zwar war mit der manuellen Politur keine vollständige Gleichwertigkeit der geglätteten Oberflächen zu verwirklichen, jedoch wurde für jedes Plättchen etwa derselbe zeitliche und manuelle Aufwand betrieben, was auch der Vorgehensweise im zahntechnischen Labor entspricht. Untersuchungen konnten zeigen, dass bestimmte Poliermethoden die ursprüngliche Glattheit der Oberfläche eines Glasurbrands nach Bearbeitung wiederherstellen oder darüber hinaus verbessern kann (Amberg, 1992, Wirz et al., 1993).

Die Keramik-Plättchen wurden abschließend noch mit einem Glasurbrand versehen. Je nach Methode zum Auftrag der keramischen Glasurmasse kann dies einen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit haben (Caesar, 1985, Yamamoto, 1986). Da der Auftrag der Glasurmasse manuell mit einem Pinsel erfolgte, ist die Gleichwertigkeit der Bearbeitung zur Oberflächenglattheit der Keramik-Plättchen zu diesem Zeitpunkt auch nur visuell beurteilbar. Technische Fehler können die Oberflächenrauigkeit vergrößern. Auch sollte darauf hingewiesen werden, dass durch die individuelle manuelle Verarbeitung und Bearbeitung von Werkstücken und Werkstoffen unterschiedliche Ergebnisse auftreten, da jeder Mensch anders manuell arbeitet (Urbainsky, 2007). Dies gilt nicht nur für die vorbereitende Verarbeitung der Testplättchen durch das Polieren, sondern auch für das Schichten der Glasurmasse bei den Keramik-Testplättchen. Somit sind zumindest in Bezug auf die Makro-Rauigkeit die Handhabung des schichtenden Technikers und die Beschaffenheit des Pinsels entscheidend. Eine unregelmäßige Verteilung des Keramikpulvers mit der Modellierflüssigkeit kann zu einer erhöhten Brennschwindung führen, was wiederum zu einer erhöhten Rauigkeit führt (Kuwata, 1990, Yamamoto, 1986).

5.3. Diskussion der Messmethoden

5.3.1. Messmethoden Oberflächenrauigkeit

Die Zielsetzung dieser Untersuchung war es, die Oberflächenrauigkeit der neuen Hochleistungskunststoffe (Shofu Block HC und Lava Ultimate) mit der der Keramik-Produkte (IPS e.max CAD und Vita Mark II) zu vergleichen. Es wurde untersucht, ob diese neuen Produkte eine ähnliche Glattheit nach der

Politur erreichen wie die Keramik-Produkte nach dem Glasurbrand. Es wurden verschiedene Methoden angewandt um die Oberflächen zu beurteilen:

1. qualitativ
 - a. visuell (durch das Auge)
 - b. optisch (Rasterelektronenmikroskop (REM))
2. quantitativ durch das Tastschnittverfahren (Hommel Tester).

Durch das Auflösungsvermögen des menschlichen Auges sind der rein visuellen Betrachtung natürliche Grenzen gesetzt. Unterschiedliche Rauigkeiten lassen sich nur sehr begrenzt beurteilen. Das REM eignet sich dagegen recht gut, um das Relief und evtl. Riefen optisch darzustellen.

Pantke et al. (1985) beschrieben das Phänomen, dass im Gegensatz zur profilometrischen Analyse die REM-Bilder keine Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit verschiedener Proben aufwiesen. In der vorliegenden Studie wurde deshalb zur Beurteilung der Oberflächenrauigkeiten messtechnische und optische Verfahren kombiniert. So taten es auch andere Autoren in vorausgegangenen Studien (Reppel, 1988), um eine genauere Beurteilung der Oberflächen zu erzielen.

In der vorliegenden Studie wurde für die Profilometrie als Methode zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit gewählt, da diese in der Zahnheilkunde häufig verwendet wird (Beißmann, 1997, Feher, 1995, Jung, 1998, Pantke, 1990, Seitner, 1995). Hiermit können Aussagen über die Morphologie einer zu untersuchenden Oberfläche getroffen werden, indem eine Diamant-Tastspitze die Oberfläche abtastet und damit die vertikalen Höhen- und Tiefenveränderungen bei konstanter horizontaler Verschiebung aufzeichnet. Somit kann die Oberflächenqualität quantifiziert werden, was sehr viel genauer ist als die rein visuelle Betrachtung. Auch ist die profilometrische Analyse genauer als die Analyse mit optischen Hilfsmitteln (Urbainsky, 2007). Diese Methode erlaubt auch eine Differenzierung von Welligkeit und Rauigkeit (Perthen-GmbH, 1993). Eine flächige Erfassung der Oberfläche ist mit dieser Methode allerdings nicht möglich. Es wurden mehrere parallele Abtastungen vorgenommen, jedoch waren diese immer linienartig.

5.3.2. Messmethoden zur Farbstabilität

Die Zielsetzung der Farbstabilitäts-Messungen war es zu untersuchen, ob die neuen Hochleistungskunststoffe (Shofu Block HC und Lava Ultimate) eine ähnlich gute Resistenz gegenüber Farbveränderungen durch die Einlage in den Lösungen (Kaffee, Schwarzer Tee, Cola, Curcuma-Lösung, destilliertes Wasser) zeigen wie die Vollkeramik-Produkte (IPS e.max CAD und Vita Mark II). Die Lösungen Kaffee, Schwarzer Tee, Cola wurden gewählt, weil es international geläufige Getränke sind und bereits eine Reihe von Autoren diese Lösungen als Testlösungen verwendeten (Al Kheraif et al., 2013, Omata et al., 2006, Stawarczyk et al., 2012, Ertas et al., 2006). Außerdem sind es Lösungen, die bekanntermaßen auch natürlichen Zahnschmelz verfärben und/oder Erosionen der Zahnoberfläche hervorrufen können. Die Curcuma-Lösung wurde ausgewählt, da sie dazu neigt, Zähne bzw. Werkstoffe sehr stark zu verfärben. Hierzu wurde wie auch von anderen Autoren eine 0,1%ige Curcuma (*turmeric*) -Lösung hergestellt und für diesen Versuch angewendet (Stober et al., 2001). Viele Autoren verwendeten auch eine Rotwein-Lösung (Stober et al., 2001, Omata et al., 2006, Stawarczyk et al., 2012), jedoch hatte diese einen ähnlichen Verfärbungsgrad hervorgerufen (Stober et al., 2001) wie die Curcuma-Lösung, weshalb in vorliegender Studie auf die Curcuma-Lösung zurückgegriffen wurde.

Die Temperatur im Brutschrank (Vivadent Cultura, Fa. Ivoclar, Liechtenstein) wurde konstant auf 37°C gehalten zum Zwecke der Nachahmung der durchschnittlichen Mundtemperatur (Falkensammer et al., 2013, Garoushi et al., 2013).

Die Messung der L*a*b*-Werte wurde in vielen Studien zur Erfassung der Farbe eingesetzt (Stawarczyk et al., 2012, Nasim et al., 2010, Dietschi et al., 1994). Gemessen wurde wie bereits in vorherigen Studien (Nasim et al., 2010), jeweils vor der Einlage, eine Woche und ein Monat nach Einlage in die jeweiligen Lösungen, um die Farbveränderung der Testplättchen zwischen einer Woche und einem Monat in den Lösungen zu ermitteln. Neben der computergesteuerten Farbanalyse wurden auch Fotos von den Testplättchen

jeweils vor der Einlage und nach einwöchiger Einlage in die Lösungen gemacht, um eine rein visuelle Beurteilung zu ermöglichen.

5.4. Diskussion der Ergebnisse

5.4.1. Ergebnisse der Oberflächenrauigkeits-Untersuchungen

Da der Parameter R_a der arithmetische Mittenrauwert aus den Beträgen aller Profilwerte ist und sich unsensibel gegenüber Spitzen und Riefen zeigt, ist die Aussagekraft dieses Wertes relativ gering. Der Parameter R_t zeigt die Gesamthöhe des Rauheitsprofils an, indem er den Abstand zwischen der höchsten Spitze und des tiefsten Tals des Profils der Gesamtmessstrecke angibt. Dieser Parameter zeigt das Makroprofil der jeweiligen Probe. Bei dem Vita Mark II-Produkt wird durch die Glasur mit dem Pinsel eine größere Welligkeit angezeigt, was zu einem höheren R_t -Wert führt. Wie von anderen Autoren beschrieben, wurde in diesem Versuch auch deshalb besonderer Wert auf den Parameter R_z gelegt (Urbainsky, 2007). Die gemittelte Rautiefe (R_z) gibt den Mittelwert der fünf R_z -Werte aus den fünf Einzelmessstrecken an (Abb. 17). Bei den Messungen zeigten die getesteten Hochleistungskunststoffe im Durchschnitt niedrigere R_z -Werte als die Vollkeramikprodukte. Dies bedeutet, dass diese Produkte nach einer fachgerechten Politur eine glattere Oberfläche aufweisen können als die Vollkeramik-Produkte. Also ist zumindest aus Gründen der Oberflächenrauigkeit nicht von einer höheren mechanischen Retention für die Plaque auszugehen. Die optische Beurteilung mit Hilfe des Rasterelektronenmikroskops bestätigt das profilometrische Ergebnis nur eingeschränkt, da REM-Aufnahmen zweidimensionale Abbildungen, im Sinne der Aufsicht darstellen, die Detailinformationen über das Höhen-Tiefen-Profil der Oberfläche nur bedingt übermitteln.

5.4.2. Ergebnisse der Farbstabilitäts-Untersuchungen

Die Verwendung der computergesteuerten Analyse zeigte im Durchschnitt niedrigere Werte der Farbveränderung und somit eine größere Farbstabilität der Vollkeramikprodukte. Einer der beiden Hochleistungskunststoffe (Shofu Block HC) zeigte allerdings vergleichbare Werte. Das Produkt Lava Ultimate zeigte jedoch in unserer Testreihe eine höhere Neigung zur Farbveränderung vor allem nach der Einlage in die Curcuma-Lösung.

Außerdem wurde ermittelt, welche der Lösungen die stärksten Farbveränderungen der Werkstoffe auslöste. Die größte Farbveränderung ging von der Curcuma-Lösung aus. Die Kaffee-Lösung, die Tee-Lösung und das destillierte Wasser verfärbten die Testprodukte in absteigender Reihenfolge weniger stark. Zu demselben Ergebnis kamen Ertas et al. 2006, die in ihrer Studie dieselben Lösungen zur Untersuchung von Farbveränderungen anwendeten. Dort wurde auch hinsichtlich der Ausprägung der Verfärbung dieselbe Reihenfolge der färbenden Lösungen beschrieben.

Die Fotodokumentation bestätigt das Ergebnis der spektralphotometrischen Analyse mit bereits visuell wahrnehmbaren Farbunterschieden. Die Fotodokumentation ist aufgrund der unterschiedlichen Belichtung nur bedingt aussagekräftig, zeigt jedoch deutliche Unterschiede zwischen den Ausgangsbildern (Abb. 9, Abb. 11, Abb. 13, Abb. 15) und den Bildern nach einwöchiger Einlage in den jeweiligen Testlösungen (Abb. 10, Abb. 12, Abb. 14, Abb. 16).

6. Zusammenfassung

Für die Qualität und Ästhetik zahnfarbener Restaurationen ist eine einwandfreie und glatte Oberflächenbeschaffenheit der Materialien erforderlich, um die Plaqueanlagerung und Anfälligkeit für Farbveränderungen auf ein Minimum zu reduzieren. Gerade die Farbstabilität ist von besonderer Bedeutung für eine erfolgreiche Langzeitanwendung der Restaurationen. Unerwünschte Farbveränderungen können sich negativ auf die Patientenzufriedenheit auswirken. Auch können zusätzliche Kosten für das regelmäßige Polieren oder Bleichen der Oberfläche entstehen oder sogar frühzeitige Erneuerungen notwendig werden. In der vorliegenden Studie wurden zwei Hochleistungspolymere zur Herstellung zahnärztlicher CAD/CAM-Restaurationen (Lava Ultimate, Shofu Block HC) hinsichtlich Oberflächenqualität und Farbstabilität vergleichend zu zwei Dentalkeramiken (Vita Mark II, IPS e.max CAD), die ebenfalls mit CAD/CAM-Techniken formgebend bearbeitet werden, untersucht. Bei jeweils 10 Testplättchen der verschiedenen Produkte wurden nach Endbearbeitung der Oberflächen nach Herstellerangabe mit dem Rauigkeitsmessgerät Hommel-Tester T8000 die Ra-, Rz- und Rt-Werte bestimmt. Die Farbstabilität wurde spektralphotometrisch mit dem Shade Eye NCC Gerät nach Einlegung der Testplättchen in verschiedene Medien bestimmt. Als Indizes für Farbänderungen wurden Differenzwerte zwischen den Messzeitpunkten *Baseline*, 1 Woche und 1 Monat auf Grundlage der L^{*}-, a^{*}- und b^{*}-Werte und der ΔE-Werte gebildet. Die statistische Analyse ergab, dass der Einfluss der Produkte auf die Farbänderung substantiell davon abhängt, welche Lösung jeweils zur Anwendung kommt. Die beste Farbstabilität wies e.max CAD auf, dicht gefolgt von Shofu Block HC, welche sich signifikant von Lava Ultimate unterschieden. Bezüglich aller Rauigkeits-Parameter (Rt, Ra und Rz) waren die beiden Kunststoffprodukte signifikant niedriger lokalisiert als das Produkt IPS e.max CAD und hochsignifikant niedriger als das Produkt Vita Mark II. Vor dem Hintergrund der Studienergebnisse lässt sich der klinische Einsatz von bestimmten Polymeren für definitive CAD/CAM Restaurationen befürworten.

7. Literatur- und Quellenverzeichnis

3M-ESPE 2013. Lava Ultimate. Technisches Produktprofil.

AL KHERAIF A A, QASIM S S, RAMAKRISHNAIAH R, IHTESHAM UR R:
Effect of different beverages on the color stability and degree of
conversion of nano and microhybrid composites. Dent Mater J 2013; 32:
326-331

AMBERG A: Die Polierbarkeit von nichtmetallischen Werkstoffen mit
verschiedenen Poliersystemen. Med Diss Basel 1992

BEISSMAN M: Bearbeitungseinflüsse auf die Oberflächenrauigkeit von
Keramik- und Kunststoffverblendmaterialien. Med Diss Mainz 1997

BEUER F, SCHWEIGER J: Gefräste Hochleistungspolymere als Schlüssel zum
Erfolg in komplexen Behandlungssituationen
17. Prothetik Symposium, Berlin 2013

CAESAR H-H: Keramische Schichttechniken. Neuer Merkur, München 1985,
70-75

DIEDRICHS G, ROSENHAIN P: Galvanoforming. Bio-Ästhetik in der
restaurativen Zahnheilkunde. Neuer Merkur, München 1995, 13-16

DIETSCHI D, CAMPANILE G, HOLZ J, MEYER J M: Comparison of the color
stability of ten new-generation composites: an in vitro study. Dent Mater
J 1994; 10: 353-362

ERTAS E, GULER A U, YUCEL A C, KOPRULU H, GULER E: Color stability of
resin composites after immersion in different drinks. Dent Mater J 2006;
25: 371-406

FALKENSAMMER F, ARNETZL G V, WILDBURGER A, FREUDENTHALER J:
Color stability of different composite resin materials. J Prosthet Dent
2013; 109: 378-383

FEHER A, MÖRMANN W H: Die Ausarbeitung von Keramikrestorationen mit
superfeinen Diamantinstrumenten. Schweiz Monatsschr Zahnmed 1995;
105: 474-479

FISCHER H, Weinzierl P, WEBER M, MARX R: Schädigung von
Dentalkeramik. Dtsch Zahnärztl Z 1999; 54: 484-488

GAROUSHI S, LASSILA L, HATEM M, SHEMBESH M, BAADY L, SALIM Z,
VALLITTU P: Influence of staining solutions and whitening procedures on
discoloration of hybrid composite resins. Acta Odontol Scand 2013; 71:
144-150

- GEHRE G, KAPPERT H F: Vollkeramische Systeme. In: Kappert H F; Eichner K (Hrsg.): Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung Bd.2. Thieme, Stuttgart 2008, 269-306
- HÄMMERLE C: Dentale Keramiken: aktuelle Schwerpunkte für die Klinik. Quintessenz, Berlin 2008, 1-10
- HICKEL R, ERNST HP, HALLER B, HUGO B, KUNZELMANN KH et al: Direkte Kompositrestaurationen im Seitenzahnbereich – Indikation und Lebensdauer. Dtsch Zahnärztl Z 2005; 60: 10
- HOFFMANN A: Der Block aus dem die Zähne gemacht werden. CAD CAM Kronen aus verschiedenen Materialien, Indikationen und Preis versus Technik und Ästhetik. 42. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft Dentale Technologie e.V. 2013. Kurzreferate Böblingen 2013, 105-114
- JANDA R: Chemie und Physik zahnärztlicher Kunststoffe, In: Eichner K; Kappert H F (Hrsg.): Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung Bd.1. Hüthig, Heidelberg 1996, 173-210
- JUNG M: Ausarbeitung und Politur von laborgefertigten Keramik- und Kompositinlays in-vitro und in-vivo. Med Habil Gießen 1998
- KAMINSKY M: Farbe und Farbstabilität von zahnärztlichen Füllungskunststoffen in Abhängigkeit von Polymerisationsmodus, Polymerisationsdauer und Lagerungsmedium. Med Diss Berlin 2003
- KAPPERT H F, SCHWEIGER M, RHEINBERGER V: Das IPS e.max-System, Werkstoffkundliche Vielfalt. Dent Labor 2006; 54: 613-624
- KERN M, KOHAL R J, MEHL A, POSPIECH P, FRANKENBERGER R, REISS B, WIEDHAHN K, KUNZELMANN K H: Vollkeramik auf einen Blick. Arbeitsgemeinschaft für Keramik in der Zahnheilkunde e.V. 2012
- KUNZELMANN K-H: Aufbau der Kompositfüllungswerkstoffe. In: Kappert H F; Eichner K (Hrsg.): Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung Bd.2. Thieme, Stuttgart 2008, 204-239
- KUWATA M: Metallkeramik Bd 2: Behandlungsplanung und Gerüstgestaltung. Phillip, Stuttgart 1990, 219-237
- MARXKORS R, MEINERS H, GEIS GERSTORFER J: Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde: Vom Defekt zur Restauration. Deutscher Zahnärzte Verlag, Köln 2008, 224-228
- NASIM I, NEELAKANTAN P, SUJEER R, SUBBARAO C V: Color stability of microfilled, microhybrid and nanocomposite resins - an in vitro study. J Dent 2010; 38 Suppl 2, 137-142
- OMATA Y, UNO S, NAKAOKI Y, TANAKA T, SANO H, YOSHIDA S, SIDHU S K: Staining of hybrid composites with coffee, oolong tea, or red wine. Dent Mater J 2006; 25: 125-131

- PANTKE A: Reproduzierbarkeit von Oberflächenrauigkeiten in vivo mittels Elastomer, Kunststoff und Replika. Dtsch Zahnärztl Z 1990; 45: 341-344
- PANTKE A, SCHÜTTLER D, HÜTTEMANN R W, PANTKE H: Vergleichende Untersuchungen verschiedener Methoden zur Beurteilung von Oberflächenstrukturen präparierter Zähne. Dtsch Zahnärztl Z 1985; 40: 368-391
- PERTHEN-GMBH, Bedienungsanleitung für Perthometer C5D. Göttingen 1993
- POSPIECH P, TINSCHERT J, RAIGRODSKI A: Keramik-Vollkeramik, Ein Kompendium für die keramikgerechte Anwendung vollkeramischer Systeme in der Zahnmedizin. 3M-Espe, Homburg / Saar 2004
- POSPIECH P: Materialien für die CAD/CAM-Technik: Die Qual der Wahl. ZMK 2014; 30: 250-256
- REPPEL P: Klebebrücken in der zahnärztlichen Prothetik. Klinische rasterelektronenmikroskopische und experimentelle Untersuchungen. Hanser, München 1988
- SCHMID O, KREJCI I, ZUTZ F: Ausarbeitung von adhäsiven zahnfarbenen Inlays aus Komposit und Keramik. Schweiz Monatsschr Zahnmed 1991; 101: 177-184
- SEHER J, VIOHL J: In vitro Verfärbungen von Kunststoffen durch Farbstoffe und UV Strahlung. Dtsch Zahnärztl Z 1992; 47: 634-636
- SEITNER Th: In-vitro Untersuchung über die Oberflächenstruktur keramischer Füllungswerkstoffe nach Bearbeitung mit unterschiedlichen Verfahren. Med Diss Marburg 1995
- SERVOS A: Der Einfluss unterschiedlicher Polymerisationsarten mit einem LED-Lichtgerät auf die Farbstabilität von Füllungskunststoffen. Med Diss Düsseldorf 2010
- SIEWERT B, PARRA M: Eine neue Werkstoffklasse in der Zahnmedizin. PEEK als Gerüstmaterial bei 12-gliedrigen implantatgetragenen Brücken. Z Zahnärztl Impl 2013; 29: 148-159
- STAWARCZYK B, SENER B, TROTTMANN A, ROOS M, OZCAN M, HAMMERLE C H: Discoloration of manually fabricated resins and industrially fabricated CAD/CAM blocks versus glass-ceramic: effect of storage media, duration, and subsequent polishing. Dent Mater J 2012; 31: 377-383
- STOBER T, GILDE H, LENZ P: Color stability of highly filled composite resin materials for facings. Dent Mater J 2001; 17: 87-94
- TINSCHERT J, DICKS CH, FÄRBER H, MARX R: Bruchwahrscheinlichkeit von verschiedenen Materialien für vollkeramische Restaurationen. Dtsch Zahnärztl Z 1996; 51: 406-409

- URBAINSKY C: Untersuchung der Oberflächenrauigkeit unterschiedlich bearbeiteter Metallkeramikronen. Med Diss Bochum 2007
- WIRZ J, Amberg A, SCHMIDLI F: Polierbarkeit nichtmetallischer Werkstoffe. Quintessenz 1993; 11: 1685-1695
- YAMAMOTO M: Metallkeramik. Prinzipien und Methoden von Mokoto Yamamoto. Quintessenz, Berlin 1986, 305-481

Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere an Eides statt, dass die Dissertation selbständig und ohne unzulässige fremde Hilfe erstellt worden ist und die hier vorgelegte Dissertation nicht von einer anderen medizinischen Fakultät abgelehnt worden ist.

Datum, Vor- und Nachname

Unterschrift

