

Aus der
Universitätsklinik für Zahn- Mund- und Kieferheilkunde Tübingen
Abteilung Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Propädeutik

**Der Einfluss zahnauhellender Zahnpasten auf die
Oberflächenbeschaffenheit zweier CAD/CAM-Werkstoffe:
Eine einjährige in-vitro-Putzsimulation mit einer elektrischen
Standardzahnbürste.**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde**

**der Medizinischen Fakultät
Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Gräfenkämper, Verena Lisa, geb. Wagner

2023

Dekan: Prof. Dr. Bernd Pichler

1. Berichterstatter: Prof. Dr. Fabian Hüttig
2. Berichterstatter: Prof. Dr. Christian Meller

Tag der Disputation: 06.12.2023

Inhalt

1	EINLEITUNG	1
1.1	DER GESCHÄDIGTE ZAHN UND DESSEN ÄSTHETISCHE VERSORGUNG INSBESONDERE IM FRONTZAHNBEREICH.....	1
1.2	RESTAURATIONSARTEN ZUM ERSATZ VON ZAHNHARTSUBSTANZ.....	3
1.3	DIE ENTWICKLUNG DER CAD/CAM TECHNOLOGIE.....	4
1.3.1	<i>Vorstellung der Materialien und die Möglichkeiten der Bearbeitung</i>	7
1.4	TÄGLICHE MUNDHYGIENE UND PLAQUEKONTROLLE	8
1.4.1	<i>Mechanische Plaquekontrolle</i>	9
1.4.2	<i>Chemische Plaquekontrolle mit Zahnpasten</i>	10
1.4.3	<i>Standardzahnpasten</i>	13
1.4.4	<i>Zahnpasten mit aufhellendem Effekt</i>	15
1.5	FORSCHUNGSFRAGEN DER VORLIEGENDEN ARBEIT UND HYPOTHESEN	17
1.6	ZIELE DER VORLIEGENDEN ARBEIT	18
2	MATERIALIEN & METHODEN	19
2.1	MATERIALIEN.....	19
2.1.1	<i>Zahnpasten</i>	19
2.1.2	<i>Restaurationsmaterialien</i>	21
2.1.3	<i>Untersuchungsübersicht</i>	22
2.2	HERSTELLUNG DER PRÜFKÖRPER GRUNDAUSFÜHRUNG.....	25
2.2.1	<i>Trennen der Keramik-Blanks, Herstellen der Proben</i>	25
2.2.2	<i>Herstellung der Prüfkörper (Einbetten)</i>	26
2.3	MODIFIZIEREN DER PROBEN OBERFLÄCHEN FÜR DIE PRÜFKÖRPER.....	29
2.3.1	<i>Politur Probenoberflächen im Prüfkörper</i>	29
2.3.2	<i>Glasur der Vita Enamic Proben im Prüfkörper</i>	30
2.3.3	<i>Glanzbrand der Celtra Duo Proben und Einbettung in Prüfkörper</i>	31
2.4	HERSTELLUNG DES SLURRYS	34
2.5	METHODEN DER OBERFLÄCHENQUANTIFIZIERUNG DER PROBEKÖRPER.....	35
2.5.1	<i>Qualitative Untersuchung mittels Raster-Elektronenmikroskop (REM)</i> . 35	
2.5.2	<i>Quantitative Untersuchung mittels Glossometer (Glanzmessgerät®)</i>	35
2.5.3	<i>Quantitative Untersuchung mittels Perthometer</i>	38
2.6	PUTZSIMULATION ALS INTERVENTION AN DEN OBERFLÄCHEN.....	39
2.7	STATISTISCHE METHODEN.....	43

2.7.1	<i>Konzept der Auswertung</i>	43
2.7.2	<i>Umgang mit Rohdaten der Rauigkeitsmessung</i>	43
2.7.3	<i>Umgang mit Rohdaten der Glossometermessung</i>	44
3	ERGEBNISSE	45
3.1	ERGEBNISSE DER RAUIGKEITSMESSUNG	45
3.1.1	<i>Übersicht der Ergebnisse der Rauigkeitsmessung</i>	45
3.1.2	<i>Darstellung der Vita Enamic Probenoberflächen (3D)</i>	48
3.1.3	<i>Analyse von Ra bei Vita Enamic vor Intervention</i>	51
3.1.4	<i>Analyse von Ra bei Vita Enamic nach Intervention</i>	53
3.1.5	<i>Vergleich von Ra bei Vita Enamic vor und nach Intervention</i>	54
3.1.6	<i>Vergleich von Rz bei Vita Enamic vor und nach Intervention</i>	56
3.1.7	<i>Analyse von Ra bei Celtra Duo vor Intervention</i>	57
3.1.8	<i>Analyse von Ra bei Celtra Duo nach Intervention</i>	59
3.1.9	<i>Vergleich von Ra bei Celtra Duo vor und nach Intervention</i>	62
3.1.10	<i>Vergleich von Rz bei Celtra Duo vor und nach Intervention</i>	64
3.1.11	<i>Vergleich von Ra vor und nach Putzintervention von Vita Enamic glasiert und poliert</i>	66
3.1.12	<i>Vergleich von Ra vor und nach Putzintervention von Celtra Duo poliert und glasiert</i>	67
3.2	VERGLEICH ZWISCHEN DEN MATERIALIEN UND INTERVENTIONEN	68
3.2.1	<i>Statistischer Vergleich der Rauigkeitsparameter der Materialien vor Intervention</i>	69
3.2.2	<i>Vergleich der Rauigkeitsparameter vor und nach Intervention in Abhängigkeit der Zahnpasta</i>	70
3.2.3	<i>statistische Untersuchung der Differenzen von Ra vor und nach der Intervention</i>	72
3.3	GLANZMESSUNG	77
3.3.1	<i>Glanzwerte in GU (gloss units) aller Proben</i>	77
3.3.2	<i>Glanzwerte im Ausgangszustand der Materialproben</i>	79
3.3.3	<i>Glanzwerte vor und nach Putzintervention von Vita Enamic poliert</i>	80
3.3.4	<i>Glanzwerte vor und nach Putzintervention von Vita Enamic glasiert</i>	82
3.3.5	<i>Glanzwerte vor und nach Putzintervention von Celtra Duo poliert</i>	84
3.3.6	<i>Glanzwerte vor und nach Putzintervention von Celtra Duo glasiert</i>	86
3.3.7	<i>Statistischer Vergleich der Glanz-Mittelwerte vor Intervention</i>	87
3.3.8	<i>Vergleich des Glanzes vor und nach Intervention</i>	88

3.4	QUALITATIVE BEWERTUNG DER RASTERELEKTRONEN-MIKROSKOPISCHEN AUFNAHMEN.....	89
3.5	REM-AUSWERTUNG DER GENUTZTEN ZAHNPASTEN.....	105
4	DISKUSSION	109
4.1	METHODENKRITIK	109
4.1.1	<i>Probekörperherstellung</i>	<i>109</i>
4.1.2	<i>Qualitative und Quantitative Oberflächentopographie</i>	<i>110</i>
4.1.3	<i>Rahmenbedingungen der Putzintervention.....</i>	<i>117</i>
4.1.4	<i>Abrasionsfestigkeit der Materialien</i>	<i>119</i>
4.1.5	<i>Einfluss des Zwischenmediums.....</i>	<i>121</i>
4.1.6	<i>Grenzen der vorliegenden Untersuchung</i>	<i>124</i>
4.2	INTERPRETATION DER ERGEBNISSE	127
4.2.1	<i>Zustände und Veränderung der Oberflächentopographie</i>	<i>127</i>
4.2.2	<i>Veränderung des Glanzes - Bewertung mittels Glossometer.....</i>	<i>140</i>
4.2.3	<i>Qualitative Veränderung der Oberflächen-Beurteilung mittels REM... ..</i>	<i>144</i>
4.3	STÄRKEN UND LIMITATIONEN DER UNTERSUCHUNG.....	148
4.4	KLINISCHE ÜBERTRAGBARKEIT UND IMPLIKATIONEN	153
5	ZUSAMMENFASSUNG.....	157
6	LITERATURVERZEICHNIS.....	161
7	ERKLÄRUNG ZUM EIGENANTEIL.....	174
8	DANKSAGUNG.....	175

Glossar und Abkürzungsverzeichnis

DMFT Index: international gebräuchlicher Index zur Feststellung der Karieserfahrung. Der Index gibt die Summe der kariösen (D=Decayed), fehlenden (M=Missing) und gefüllten (F=Filled) Zähne (T=Teeth) an. [84]

DMS: Deutsche Mundgesundheitsstudie [84]

EDX: energiedispersive Röntgenspektroskopie am Rasterelektronenmikroskop mittels Elektronenstrahl oder Röntgenstrahlung (Röntgenfluoreszenz), Bestimmung chemischer Elemente u. Materialzusammensetzung

Morbidität: Häufigkeit einer Krankheit in einer bestimmten Bevölkerungsgruppe

Prävalenz: Häufigkeit des Auftretens einer Erkrankung/ eines Symptoms/ eines Risikofaktors zu einem bestimmten Zeitpunkt.

P(M)ZR: professionelle Zahnreinigung durch entsprechend ausgebildetes Personal

REM: Rasterelektronenmikroskop (auch SEM: Scanning electron microscope)

Ra: Mittelrauwert entspricht dem arithmetischen Mittel der Absolutbeträge aller Abweichungen des Rauheitsprofils von der Mittellinie innerhalb der Messstrecke¹

Rt: Maximale Rautiefe entspricht dem senkrechten Abstand zwischen höchstem und tiefstem Punkt des Rauheitsprofils R innerhalb der Messstrecke ¹

Rz: Mittelrautiefe: Mittelwert der Rautiefe von 5 aufeinander folgenden Messstrecken ¹

Wt: Wellentiefe entspricht dem senkrechten Abstand zwischen höchstem und tiefstem Punkt des Welligkeitsprofils innerhalb der Gesamtmessstrecke²

Sa: arithmetischer Mittelwert der Rauigkeitstiefen in der Fläche, Erweiterung des Rauigkeitswertes Ra in die Fläche, Betrag des Wertes eines jeden Punktes im Vergleich zum arithmetischen Mittelwert ³

1 <https://www.technisches-zeichnen.net/technisches-zeichnen/diverses/rauheitswerte.php>
(letzter Zugriff 08.01.2020)

2 https://www.tf.uni-kiel.de/matwis/amat/semitech_en/kap_3/illustr/oberflaechenstrukture.pdf
(letzter Zugriff 08.04.2022)

3 <https://www.keyence.eu/dede/ss/products/microscope/roughness/surface/parameters.jsp>
(letzter Zugriff 04.03.2022)

Sz: maximale Höhe, Summe des höchsten Punkts zum tiefsten Punkt in einer definierten Messstrecke⁴

Sv: maximale Senkhöhe, Betrag der stärksten Vertiefung innerhalb des Definitionsbereichs⁵

Rp: Glättungstiefe entspricht dem Maximum der Profilsitzen innerhalb des Auswertungsbereiches¹.

XPS: Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie, Bestimmung der Elementzusammensetzung durch Bestimmung der elementcharakteristischen Bindungsenergie (3-10 nm)

XRD: Röntgendiffraktometrie, Strukturuntersuchung von kristallinen Materialien in Werkstoffen durch Beugung der Röntgenstrahlen am Kristallgitter.

4 https://www.keyence.eu/dede/ss/products/microscope/roughness/surface/tab01_b.jsp (letzter Zugriff 04.03.2022)

5 https://www.keyence.de/ss/products/microscope/roughness/surface/tab01_g.jsp (letzter Zugriff 08.04.2022)

1 Einleitung

1.1 Der geschädigte Zahn und dessen ästhetische Versorgung insbesondere im Frontzahnbereich

Im Laufe des Lebens kann durch Unfälle wie auch durch die Wirkung von Biofilmen oder physikalisch wie auch chemische Prozesse Zahnhartsubstanz (Zahnschmelz und Dentin) verloren gehen und in Form einer Restauration ersetzt werden.

Dentale Traumata kommen besonders im Kindesalter, speziell bei Jungen und im Frontzahnbereich vor [158]. Es können Zahnhartsubstanz im Sinne von Zahnfragmenten oder ganze Zähne herausgelöst sein. In manchen Ländern ist der Zahnverlust durch Frontzahntraumata im Kindes- und Jugendlichenalter höher als durch Karies [64]. Karies gehört laut der 5. Mundgesundheitsstudie zu den häufigsten chronischen Erkrankungen und belegt im Ranking der Kosten Platz vier [84].

Die Höhe des Verschleißes von Zahn- und Restaurationsoberflächen wird aber auch beeinflusst durch Essgewohnheiten, Gewicht, Muskulatur, Beruf und Habits [92]. Attrition ist definiert durch den Abrieb, der zwischen zwei Flächen entsteht. Durch die ca. 1.500-mal am Tag vorkommenden Zahnkontakte beim Schlucken, Kauen oder die Zahnbewegungen benachbarter Zähne entstehen klinisch plane und meist blanke Schliffacetten. Dieser Zahnhartsubstanzverlust, der durch physiologische Vorgänge hervorgerufen wird, ist gering. Allerdings können Parafunktionen wie Pressen (Bruxismus) und Knirschen, durch neuromuskuläre Störungen derartige Abnutzungserscheinungen verstärkt auftreten [12, 159].

Männer, die durchschnittlich eine größere Kaukraft haben, scheinen auch eine höhere Abnutzung als Frauen aufzuweisen [156].

Auch chemisch kann sauren und den pH-Wert der Mundflora senkenden Lebensmitteln (häufig und ohne Refraktärzeit zugeführte Säfte, Obst, Limonaden) die oberflächliche Zahnhartsubstanz durch Demineralisation

„aufgeweicht“ werden. Wird nach nicht ausreichender Remineralisationszeit mechanisch an den Zähnen manipuliert, z.B. durch die tägliche Mundhygiene, kann der erosive Defekt zusätzlich durch die im Folgenden beschriebene Abrasion verstärkt werden [63, 76]. Abrasion ist definiert durch den Abrieb, der zwischen zwei Flächen und einem Fremdkörper entsteht. Das kann verstärkt bei Berufen auftreten, die mit einer Staubexposition einhergehen, wie Bäcker oder Bergarbeiter, aber auch durch Nahrungsmittel (Demastikation) und die abrasiven Partikel in der verwendeten Zahnpasta.

Erstaunlich ist in Summe, dass der Substanzabtrag durch die tägliche Zahnhygiene der Hauptgrund für Abrasionen in Bereichen ist, in denen keine erhöhte mechanische Belastung auftritt [6]. Eine erhöhte Zahnhygiene (mehr als zweimaliges Zähneputzen pro Tag) steht in direktem Zusammenhang mit erhöhtem Zahnhartsubstanzaabrieb [70].

Die gestiegenen ästhetischen Ansprüche der Patienten hinsichtlich Versorgungen besonders im Frontzahnbereich, bei möglichst geringem Behandlungsaufwand, stellen Zahnärzte, Zahntechniker und die Medizinprodukteindustrie vor Herausforderungen. Die Patienten in Deutschland wünschen sich im sichtbaren Bereich Restaurationen, welche nicht als solche erkennbar sind. Restaurationen sollten sich nicht nur ästhetisch, sondern auch funktional unauffällig in die vorhandene Zahnreihe eingliedern und den natürlichen Zähnen bezüglich Ästhetik, Härte und Verschleiß entsprechen.

Neben den ästhetischen Eigenschaften spielen daher auch die mechanischen und chemischen Eigenschaften der Restaurationsmaterialien hinsichtlich Funktion und Langlebigkeit eine Rolle.

Das Einbringen von Restaurationen - ggf. unterschiedlicher Materialien - greift in das Abnutzungsverhalten aller Zähne, aber besonders der Antagonisten ein [92]. Laut Davidson und de Gee wirken Kaukräfte von 1-15 Newton auf die Zähne und die Materialien der Restaurationen [41]. Gleichzeitig spielt die Oberflächenvergütung der eingesetzten Materialien hinsichtlich Abnutzung und Hygienefähigkeit eine Rolle. Je größer und rauer die Restaurationsoberfläche, desto schneller abradiert das „unterlegene“ Material

[93]. Eine raue Oberfläche erhöht zudem das Ausmaß von Plaque-Ablagerungen und den Umfang von Verfärbungen [45, 74, 119]. Langfristig ist es für Patienten einfacher, eine glatte Restaurationsoberfläche sauber zu halten [175].

1.2 Restaurationsarten zum Ersatz von Zahnhartsubstanz

Zahnhartsubstanz kann direkt (durch Formung und Verfestigung im Munde) oder indirekt (durch Herstellung außerhalb des Mundes und späteres Einsetzen) restauriert werden.

Als direkte Versorgung bezeichnet man die Füllungstherapie aus Zementen, Kunststoffen (lichthärtend oder chemisch härtend), Kompositen sowie Amalgam möglich. Im Frontzahnbereich werden aus ästhetischen Gründen zahnfarbene Materialien - insbesondere Komposite – gewählt und stellt aktuell den Goldstandard in der Versorgung gesetzlich versicherter Patienten dar.⁶ Diese Komposite bestehen aus einer organischen Polymermatrix mit verstärkenden anorganischen Partikeln, welche auch Filler genannt werden. Ein Nachteil der Komposite ist die verminderte Haltbarkeit und Passung nach längerer Tragezeit aufgrund von Volumenveränderung des organischen Anteils und damit auftretende reduzierte Retention am Zahn oder auch sichtbare Verfärbungen.

Die techniksensitiveren Komposite waren Keramiken hinsichtlich mechanischer Eigenschaften wie Festigkeit, Farbstabilität, Randpassung und Abriebbeständigkeit eine Zeit lang unterlegen. Durch Verbesserung der chemischen Zusammensetzung und der Struktur der Füllkörper zeigen neue Komposite in klinischen Studien (bis 30 Jahre) deutlich verbesserte Überlebensraten. [75]

Die keramische Materialien sind definiert als nicht metallisches, anorganisches kristallines Material, welches aber metallische und nichtmetallische Elemente enthalten kann [36].

6 <https://www.kzbv.de/welche-zahnfuellungen-gibt-es.189.de.html> (letzter Zugriff 03.03.2022)

Die Zusammensetzung der Grundstoffe Feldspat, Quarz und Kaolin oder auch Zirkon- und Aluminiumoxid beeinflusst die Brenntemperaturen und den Sinterungsgrad. In geringer Menge werden Flussmittel sowie anorganische Farben im Sinne von Metalloxiden und Metallsalzen zugesetzt, um die Farbgebung der natürlichen Zähne möglichst genau zu imitieren. Die in der Zahnmedizin eingesetzte Keramik lässt sich grob einteilen in die Silikatkeramik (Feldspat- und Glaskeramik) und Oxidkeramik, sowie „neuere Entwicklungen“ wie Hybridkeramiken. Mit Rücksicht auf deren mechanische Eigenschaften der Dentalkeramiken unterscheiden sich die Verarbeitungswege.

Beim Brennverfahren der Feldspatkeramik wird die keramische Masse vom Techniker frei modelliert und im Keramikofen unter Vakuum gebrannt. Bei diesem Vorgang, der sich Sintern nennt, muss man mit einer Schwindung von bis zu 35% rechnen. Bei der Glaskeramik besteht die Matrix aus Glas, zur Verstärkung sind keramische Elemente beigefügt. Beispiele hierfür sind Lithiumdisilikat-Glaskeramik wie E.max Press / CAD, leuzitverstärkte Glaskeramik und Feldspat-verstärkte Glaskeramik [36, 72].

Die Glaskeramiken werden durch ein Pressverfahren unter Druck bei hoher Temperatur in eine Hohlform gepresst oder, wie die Oxidkeramiken und Hybridkeramiken, aus einem vorproduzierten Rohling herausgefräst (CAM-Verfahren). Die Verarbeitung von Keramiken hat sich durch die Entwicklung der CAD/CAM-Technologie verbessert.

1.3 Die Entwicklung der CAD/CAM Technologie

CAD (Computer-Aided-Design) steht für das Design der Versorgung am Computer und CAM (Computer-Aided-Manufacturing) für die computergestützte maschinelle Herstellung. Durch das seit den 80er Jahren (Beginn ca. 1987) bestehende CAD/CAM-Verfahren und die Weiterentwicklung der dafür erhältlichen Materialien, haben sich neue Möglichkeiten für schnelle und weniger aufwendige Restaurationen ergeben [5]. Begründer der CAD/CAM Technik sind neben Prof. Dr. Werner Moermann im Jahr 1980 mit der Cerec-Idee auch Dr. François Duret (SOPHA) und Dr. Matts Andersson (PROCERA). Der zu

versorgende Defekt kann nach der Präparation mittels Intraoralscanner direkt im Patientenmund digital erfasst werden.

Hiernach wird die Restauration am Computer entworfen, in der computer-gesteuerten Fräseinheit aus einem vorgefertigten Materialblock subtraktiv in absteigendem Instrumentendurchmesser und aufsteigender Körnung herausgeschliffen und kann idealerweise direkt in den Patientenmund eingegliedert werden. Daher kommt die Bezeichnung „Chairside“, da diese Versorgung durch den Zahnarzt direkt am Patientenstuhl durchgeführt werden können. Die Eingliederung einer Einzelzahnkrone kann bereits nach 15 Minuten Fertigungszeit erfolgen [98]. Das ist hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit von Labor und Praxis ein wichtiger Aspekt. Außerdem entfällt durch die Eingliederung der Restauration am gleichen Tag die Überbrückung mit einer provisorischen Versorgung [14].

Die industriell gefertigten CAD/CAM-Rohlinge werden in standardisierten Verfahren unabhängig von individuellen Verarbeitungsschritten hergestellt [144]. Durch den hohen Druck und die hohen Temperaturen bei der Produktion kann eine hohe und konstante Qualität erzielt werden, welche sich in der manuellen Herstellung nicht erreichen ließe [85, 124, 132].

Beim Verlust oder Verschleiß einer CAD/CAM-Restauration kann durch den gespeicherten Datensatz die Restauration mit geringen Kosten und kürzerem Zeitaufwand für die Patienten oder den Behandler erneut hergestellt werden [85].

„Aktuell“ verfügbare Materialien der CAD/CAM Blocks sind Oxidkeramiken, Silikatkeramiken, Composite, PMMA-basierte Kunststoffe und Hybridkeramiken. Bei den Keramiken gibt es zwei Materialzustände, in welchen die CAD/CAM Blocks bearbeitet werden können: Grünling und Weißling.

Ein Nachteil der hochfesten Keramiken ist die Materialhärte und die Sprödigkeit, weshalb nach unbestimmter Zeit intraoral Abplatzungen der Keramik, sogenanntes Chipping, entstehen kann.

Oxidkeramiken können ausschließlich im CAD/CAM Verfahren mit vorgesinterten Rohlingen verarbeitet werden [96].

Auch bei Kunststoffrestaurationen konnte die CAD/CAM-Technik eine Verbesserung erzielen. CAD/CAM-gefertigte Kunststoffrestaurationen können

bis zu einem Jahr intraoral bleiben [53], da sie hinsichtlich Farbstabilität, Abrasionsverhalten, Wasseraufnahme und Verschleißfestigkeit den konventionellen PMMA-Materialien überlegen sind [137].

Hybrid-Keramiken in der CAD/CAM

Derzeit kommen sog. „Hybridkeramiken“ an den Markt, die die Vorteile von Kompositen und Keramiken vereinen [10]. Keramische Anteile und Kompositanteile sind je nach Material oder Hersteller zu unterschiedlichen Mengen enthalten [57].

Durch die Vereinigung eines Polymernetzwerkes mit Keramik wird eine größere Stabilität, Flexibilität, Elastizität und eine dem Zahn ähnliche Härte erreicht [69, 192]. Hybridkeramiken stellen Doppelnetzwerkhybride dar. Sie bestehen aus einer durchgängigen Polymerphase und einer durchgängigen Keramikphase, welche ineinander verwoben sind [98]. Durch die vergrößerte Elastizität scheinen die Härte und das Frakturrisiko verringert.

Da in den Herstellerangaben vieler hochfester Keramiken Bruxismus unter Kontraindikationen aufgeführt wird [144], könnte die Verwendung einer Hybridkeramik eine gute Alternative sein.

„Aktuell auf dem Markt“ befindliche Beispiele sind Lava Ultimate der Firma 3M ESPE, bestehend aus einer Kunststoffmatrix mit keramischen Fillern oder Polymer-infiltrierte Keramiknetzwerke und Nano-Keramiken. Das in dieser Arbeit verwendete Material Vita Enamic besteht aus einem Feldspatkeramiknetzwerk [36, 56].

Weitere „aktuell“ auf dem Markt erhältliche CAD/CAM Materialien:

- Polymer-infiltrierte Keramik (Vita Enamic),
- Nano-ceramic resin (Lava Ultimate),
- Feldspat-Keramik (Vita Mark II),
- Lithiumdisilikat Keramik (IPS-e max. CAD)
- Leuzitkeramik (Empress - CAD)

Oberflächenvergütung

Durch die Art der Herstellung hat das Endprodukt, abhängig von der Körnung des letzten Schleifkörpers, eine raue Oberfläche und benötigt eine abschließende Oberflächenvergütung mit Glanzbrand, Glasurmasse oder Politur [57].

Durch Manipulation auf der Restaurationsoberfläche durch den Zahnarzt, beispielsweise dem Einschleifen der Approximalkontakte oder der Okklusion, kann die Oberflächenrauigkeit erhöht werden. Eine sich daran anschließende Oberflächenvergütung im Sinne einer Hochglanzpolitur, Glasur oder Glanzbrand ist zur Reduzierung der Oberflächenrauigkeit und dem Verhindern von Mikrorissen notwendig. Zudem wird durch eine glatte Oberfläche die Abnutzung der Restauration und der Antagonisten vermindert.

Um die Oberfläche der Restaurationen zu vergüten, gibt es meist zwei Möglichkeiten.

Mit einer Glasurmasse (lichthärtend oder als Brennvorgang im Keramikofen) können Poren oder Risse, die bei der Herstellung oder Bearbeitung der Restauration entstanden sind, verschlossen werden. Bei vielen Materialien wird dennoch vorab eine Politur der Restaurationsoberfläche empfohlen.

Durch eine Politur mit entsprechenden Gummipolierern wird die Oberfläche geglättet. Je feiner die in den Polierern eingelagerten Partikel, desto glatter wird die Oberfläche. Ist die Politur der Oberfläche ausreichend, kann auf die Vergütung durch eine Glasurmasse, sei es durch einen Brennvorgang oder Lichthärtung, verzichtet werden. Wenn die Restauration im Mund definitiv eingegliedert ist, kann eine Politur (chairside) durch den Zahnarzt oder die erneute Vergütung mit einer lichthärtenden Glasur (chairside), die oben genannten Folgen verhindern.

1.3.1 Vorstellung der Materialien und die Möglichkeiten der Bearbeitung

Vita Enamic

„Vita Enamic ist eine Hybridkeramik der Firma VITA Zahnfabrik aus Bad Säckingen, bestehend aus einer strukturgesinterten, anorganischen Feldspatkeramik Matrix (gesamt 86 Gew. %), welche mit 58-63 % SiO₂ und 20-

23% Al₂O₃ und weiteren Oxiden (Na₂O 0,9-11%, K₂O 0,4-6%, B₂O₃ 0,5-2%, ZrO₂ <1%, CaO <1%)“ infiltriert ist. Die Poren sind mit einem organischen Polymermaterial (gesamt 14 Gew.%) (UDMA und TEGDMA) aufgefüllt [97]. Die Bezeichnung für diese Art von Keramik lautet **Resin Infiltrated Ceramic (RIC)** oder **Polymer Infiltrated Ceramic Network (PICN)**.⁷

Bei der Herstellung wird ein Keramikgerüst mit der Monomermischung infiltriert und ausgehärtet. Die Biegefestigkeit liegt zwischen 150 – 160 MPa, das E-Modul bei 30 GPa [9, 189]. Eine weitere Beschreibung von Vita Enamic ist bei der Vorstellung der verwendeten Materialien enthalten (s. Kapitel 2.1.2 ab Seite 21).

Celtra Duo

Bei diesem Material der Firma Dentsply Sirona handelt es sich um eine zirkonverstärkte Lithiumsilikat-Keramik (ZLS für **Zirconia reinforced Lithium Silicate glass ceramic**) mit hochdisperssem Zirkonoxid, welche für die Chairside-Anwendung entwickelt wurde.

Es enthält lt. Hersteller 58% SiO₂, 18,5% Li₂O, 10,1% ZrO₂ und 13,4% Andere.⁸ Das nicht-auskristallisierte Zirkoniumdioxid (ZrO₂), liegt in der Glasphase der Keramik vor und erscheint somit nicht opak.⁹ Nach einem Glasurbrand ist die Biegefestigkeit von ZLS mit 370 MPa vergleichbar mit der Biegefestigkeit von Lithiumdisilikat (360±69MPa), [17, 151]. Mehr Informationen finden sich in Kapitel 2.1.2 ab Seite 21.

1.4 Tägliche Mundhygiene und Plaquekontrolle

Die tägliche Mundhygiene mit Zahnpasta und Zahnbürste bewirkt über die Jahre einen kontinuierlichen Abtrag der Zahnhartsubstanz und teils auch der intraoral

⁷[https://mam.vita-](https://mam.vita-zahnfabrik.com/portal/ecms_mdb_download.php?id=82333&sprache=de&fallback=&cls_session_id=&neuste_version=1)

[zahnfabrik.com/portal/ecms_mdb_download.php?id=82333&sprache=de&fallback=&cls_session_id=&neuste_version=1](https://mam.vita-zahnfabrik.com/portal/ecms_mdb_download.php?id=82333&sprache=de&fallback=&cls_session_id=&neuste_version=1) (letzter Zugriff 08.04.2022)

⁸<https://www.infinidentsolutions.com/assets/uploads/pdf/product/de/infinident-materialkarte-celtra-duo-de.pdf> (letzter Zugriff 08.04.2022)

⁹https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/pim/de_DE/Prosthetics/Fixed/High_strength_glass_ceramic/Celtra_Duo/RES-Celtra-Duo-FactFile-Web-Flyer-DE-K79101445.pdf (letzter Zugriff 08.04.2022)

befindlichen Materialien von Restaurationen. Es handelt sich hierbei um die im Kapitel 1.1 auf Seite 1 beschriebene Drei-Körper-Abrasion, bei welcher die Zahnbürste den Antagonisten und die Zahnpasta mit den enthaltenen Schleifkörpern das Medium darstellt.

Die Wahl der Zahnpasta spielt bei der Abrasion der intraoralen Oberflächen eine große Rolle [20].

Ist die Restaurationsoberfläche durch Manipulation oder die tägliche Mundhygiene aufgeraut, trägt dies zu einer schnelleren Abnutzung des entsprechenden Materials bei [57]. Die höchsten Rauigkeitswerte nach Abrasion zeigen temporäre Kunststoffe (PMMA) [120].

1.4.1 Mechanische Plaquekontrolle

Intraorale Plaque (Biofilm) auf Zahnflächen ist maßgeblicher Auslöser von Gingivitis, Parodontitis und Karies. Die tägliche, mechanische Entfernung des Biofilms ist daher die beste Präventionsmaßnahme [105] zur Verhinderung dieser Erkrankungen. Dazu gehört auch die Auswahl der richtigen Zahnbürste [70].

In der dritten Mundgesundheitsstudie konnte gezeigt werden, dass nur 20% der Erwachsenen und 27% der Jugendlichen zweimal täglich die Zähne für jeweils zwei Minuten putzen [116].

Zur Verbesserung der Mundhygiene wird von vielen Zahnärzten die Nutzung einer elektrischen Zahnbürste empfohlen. Bei der Verwendung der manuellen Zahnbürste kam man in einer Studie auf eine geringe Plaquereduzierung von 50% [60]. Hawkins et al. empfiehlt bei Verwendung einer manuellen Zahnbürste eine Putzdauer von 5,1 Minuten, um eine ausreichende Plaqueentfernung zu erreichen [68].

Elektrische Zahnbürsten

Laut einer Forsa Umfrage aus dem Jahr 2013 verwendeten zu dieser Zeit 58% der Zahnärzte und 43% der deutschen Bürger eine elektrische Zahnbürste. Die Marktanteile von OralB® lagen 2015 bei 60 %. In einem Vergleich konnten die Schallzahnbürste von Philips Sonicare und die oszillierende Zahnbürste der Marke Oral-B (hierbei besonders die Series 7000) ein vergleichbar gutes Ergebnis erzielen [146] [139].

Wissenschaftliche Studien belegen die bessere Reinigungsleistung einer elektrischen Zahnbürste im Gegensatz zur manuellen Zahnbürste [1, 13, 172, 174]. Kontrovers dazu gibt es aber auch Studien, die dieses Ergebnis nicht bestätigen [38, 112, 133, 173].

Häufig geht eine intensive Mundhygiene mit dem Risiko von gingivalen Rezessionen und Zahnalsdefekten einher [19, 65, 145].

Eine hohe Rezessionsrate ist unter anderem auf den zu hohen Anpressdruck beim Zähne putzen zurückzuführen. Bei den elektrischen Zahnbürsten sind daher häufig ab einem Anpressdruck von 2 N (200 g), optische und akustische Effekte als Warnfunktion integriert.

Die Wahl des Anpressdruckes in vorangegangenen Studien variiert. Eine Steigerung der Putzleistung über 1,5 N (150 g) ist laut McCracken nicht feststellbar [114]. Im Technical Report von 2007 wird ein Anpressdruck von 2 N für in-vitro-Versuche empfohlen. Dies ist bei elektrischen Zahnbürsten auch wegen der größeren Gefahr einer möglichen Schädigung bei gleichem Anpressdruck im Vergleich zur manuellen Zahnbürste zu empfehlen [183].

Die Putzdauer spielt für die Mundgesundheit eine große Rolle, wobei in vorhergegangenen Studien auch unterschiedliche ideale Putzzeiten besprochen werden. Auf diese unterschiedlichen Werte wird in der Diskussion auf Seite 117 im Kapitel Putzdauer weiter eingegangen.

Bei einer Beobachtungsstudie putzten die Teilnehmer durchschnittlich 101 Sekunden, davon 26,3 Sekunden oral und 74,7 Sekunden vestibulär. Die Vestibularflächen der Zähne sind bei der täglichen Mundhygiene der Abrasivität von Zahnpasta somit verstärkt ausgesetzt [67].

Diese „aktuelle“ Studie mit 101 Probanden hat gezeigt, dass die Probanden im Durchschnitt 32 Sekunden für alle hinteren Segmente im Zahnbogen aufwenden [67]. Die Vestibulärflächen der Zähne im oberen Frontzahnbereich putzten die Studienteilnehmer durchschnittlich für 8,15 Sekunden [67].

1.4.2 Chemische Plaquekontrolle mit Zahnpasten

Unter chemischer Plaquekontrolle können Kosmetika und Medizinprodukte subsumiert werden, die der Entfernung des Biofilms dienen - besonders im

Zusammenhang mit der mechanischen Plaquekontrolle. Dazu zählen Mundspüllösungen und vornehmlich Zahnpasten.

Zahnpasten enthalten zusammenfassend Abriebmittel (Aluminiumoxid, Kieselsäure, Polyethylen, Natron, Kalziumkarbonat, Natriumhydrogenkarbonat), Schaumbildner (z.B. Natriumlaurylsulfat, Kokosbetain), Feuchthaltemittel (z.B. Glycerin), Konservierungsstoffe (Parabene), Geschmacksstoffe (Limonene, Minzöl, Sorbitol, Saccharin, Xylitol, Anethol, Laurylsulfat), Verdickungsmittel (Xanthan, Knorpeltang) und therapeutischen Wirkstoffe (Natriumphosphat, Fluoride, Xylitol, Titanoxid, Anethol, Bisabolol) [117].

Fluorid

Fluorid ist mit etwa 300.000 klinischen Studien ein gut erforschter Zusatz in Speisesalz, Trinkwasser und Zahnpflegeprodukten, um Kariesentstehung vorzubeugen.

Seit der Trinkwasserfluoridierung, welche nur noch in wenigen Ländern vorhanden ist, ist die protektive Wirkung von systemisch und lokal angewendeten Fluoriden aus in weiteren ausgeführten Gründen bekannt [15]. Topisch angewandt, kann der Austausch von herausgelösten Hydroxylapatitionen der Zahnoberfläche mit Fluoridionen aus der Zahnpasta/ dem Speichel bewirken, dass das gegen Säure resistenter Fluorapatit entsteht [37, 55, 167].

Um eine ausreichende lokale Menge an Fluorid zu applizieren, wird pro Tag zweimaliges Zähneputzen empfohlen [171].

Da in den ersten Lebensjahren (während der Zahnhartsubstanzbildung zwischen 0 und 8 Jahren) die Gefahr einer dentalen Fluorose besteht, wird vor allem bei Kindern die Substitution von Fluorid durch nur eine Quelle empfohlen (Zahnpasta, Speisesalz, Trinkwasser oder Tabletten).

Einen statistisch nachgewiesenen Schutz bieten Zahnpasten mit einem Fluoridgehalt ab 1400 ppm. Da Kinder und Kleinkinder das Ausspucken der Zahnpasta noch nicht ausreichend beherrschen, wird gelegentlich die Verwendung einer Zahnpasta mit reduziertem Fluoridgehalt empfohlen [18], um Intoxikationen und Fluorosen zu verhindern.

Hydroxylapatit

Wegen des Risikos einer dentalen Fluorose und dem Widerwillen mancher Patienten, Fluorid aufgrund seiner potentiellen Toxizität zu nutzen, werden derzeit verstärkt Fluorid-Alternativen, z.B. Hydroxylapatit (HAp), in Zahnpasten geprüft und vermarktet. Es sind Zahnpasten mit Nano- und Mikro-Hydroxylapatit im freien Handel erhältlich, zu deren Wirksamkeit noch wenige wissenschaftliche Artikel verfügbar sind. Es konnte ein remineralisierender Effekt, insbesondere in Schmelzbereichen mit vorbestehenden Defekten bei in-vitro-Versuchen abgeleitet werden [143]. Dieser Effekt wurde durch eine andere in vivo Studie bestätigt [99].

Huang et. al konnte auf künstlichen Läsionen keine Remineralisation von Mikro-Hydroxylapatit im Vergleich zu Wasser feststellen [73]. Bei einem in vitro Test zur Remineralisation von Schmelzproben konnten nur die fluoridhaltigen Zahnpasten die Demineralisation verringern, die Hydroxylapatit-Zahnpasta Biorepair hatte keinen Effekt [51]. Bei einer Studie von Schlagenhaut et al. konnte beim Vergleich einer Hydroxylapatit-Zahnpasta (Karex) mit einer Aminfluorid/Zinnfluorid-Zahnpasta (Meridol) innerhalb der 168 Tagen kein signifikanter Unterschied bei der Entstehung von neuen Läsionen festgestellt werde [148]. Allerdings kann diese Wirkung auch auf den in Karex enthaltenen Stoff Usninsäure zurückzuführen sein, dessen Einsatz laut Francolini et al. gegen multiresistente Keime diskutiert wird [59].

Bei einer Vermischung von Nano-Hydroxylapatit mit Fluorid kann es zu einer teilweisen Auflösung von Hydroxylapatit kommen. Das enthaltene Fluorid bindet dann das freigesetzte Kalzium und beide Substanzen könnten so inaktiviert werden [160]. Bei einer „aktuellen“ Dissertation von Rodemer konnten die Hydroxylapatit-Partikel, welche sich beim in-vitro-Versuch auf Dentin- und Schmelzproben anlagerten mit einer einfachen Multifunktionsspritze wieder abgesprüht werden [140]. Zudem entstanden bei der kombinierten Anwendung von Fluorid und Hydroxylapatit Agglomerate in der Versuchsreihe, welche die Autorin Rodemer mit einer möglichen Verbindung erklärt. Die kombinierte Applikation von Fluorid mit Hydroxylapatit konnte nicht empfohlen werden [140].

Sind in einer Zahnpasta sowohl Fluorid als auch Hydroxylapatit enthalten, könnte ein Mechanismus zur Verhinderung der Verbindung notwendig sein. So wirbt die Zahnpasta ApaCare von Cumdente, welche sowohl 1450 ppm Fluorid als auch Hydroxylapatit enthält, mit einem Patent, welches die Verbindung der beiden Bestandteile in der Tube verhindert ¹⁰. Bei Black is White gibt es aktuell keine Informationen zu dieser Problematik ¹¹.

1.4.3 Standardzahnpasten

Es kann zwischen „handelsüblichen“ Standardzahnpasten und Zahnpasten mit aufhellendem Effekt unterschieden werden. In den letzten fünf Jahren sind die Übergänge im Angebot der großen Handelsketten dabei „fließender“ geworden. Der Wunsch nach „weißeren“ aber auch „gesünderen“ Zähnen wird bei vielen Patienten immer stärker, weshalb auch vermehrt Zahnpasten mit aufhellendem Effekt, sogenannte „Whitening-Zahnpasten“ auf dem freien Markt verfügbar sind [134, 168].

Zu den Standardzahnpasten werden die Zahnpasten ohne aufhellende Effekte und somit häufig mit mittlerer Abrasivität gerechnet.

Die „derzeit“ erhältlichen Zahnpasten sind meist nicht mehr nur reine Kariesprävention, sondern sollen neben der Plaqueentfernung auch „das Zahnfleisch schützen“ oder „Zahnfleischerkrankungen“ vorbeugen, „Mundgeruch verhindern“ und bei Bedarf auch die „Zähne sichtbar aufhellen“.

Seit 1990 steigt die Abrasivität von Zahnpasta tendenziell an. Dies spiegelt die gestiegenen ästhetischen Ansprüche der Verbraucher hinsichtlich weißer, glatter und auch gesunder Zähne wieder [107, 128].

Da für die Entfernung von Plaque die Verwendung von abrasiven Partikeln aktuell noch unumgänglich ist, soll die optimale Zahnpasta maximale Reinigung bei minimaler Abrasivität leisten [184]. Wenn die Abrasivität der Zahnpasta bei der täglichen Mundhygiene zu gering ist, können auf den Zähnen und Restaurationen über einen längeren Zeitraum Verfärbungen entstehen [141, 142].

¹⁰ <https://www.apacare.de/wirkprinzip/> (letzter Zugriff 02.04.2022)

¹¹ <https://curaprox.de/info/zahnpasta/black-is-white> (letzter Zugriff 02.04.2022)

Die Verwendung einer Zahnbürste ohne Zahnpasta führt nicht zu einer Abrasion von Zahnschmelz [50].

Bei der Wahl einer geeigneten Zahnpasta gibt es für die Patienten und Zahnärzte den RDA-Wert, um die Abrasivität einschätzen zu können (Radio-Dentin-Abrasion/ REA Radio-Enamel-Abrasion). Je höher dieser Wert ist, desto höher scheint die Abrasivität und die Putzleistung.

Zahnpasten mit einem RDA-Wert < 60 werden als niedrig abrasiv eingestuft. Eine Zahnpasta mit RDA Wert 60-100 gilt als mittel abrasiv. Beträgt der RDA-Wert >100 , so wird die Zahnpasta als hoch abrasiv eingestuft [107]. Der RDA Wert von frei verkäuflichen Zahnpasten liegt, abhängig von ihrer Indikation, zwischen 0-200. Die Korngröße der abrasiven Partikel liegt zwischen 1–150 μm . Diese sind in der Regel weicher als Schmelz, aber härter als Dentin [179]. So haben Zahnpasten, die einen Abtrag auf Dentin erzielen, häufig noch keinen signifikanten Effekt auf den fünffach härteren Schmelz [181].

Zu der Proportionalität des RDA-Wertes, der Abrasivität und der Putzleistung gibt es widersprüchliche Aussagen.

So kommt eine Studie zu dem Ergebnis, dass der RDA-Wert häufig mit der Putzleistung der jeweiligen Zahnpasta korreliert [77]. Eine andere Studie konnte hingegen keinen Zusammenhang zwischen RDA-Wert und Putzleistung feststellen [102].

Bei einer weiteren Studie konnte nach zehn Tagen Putzen kein signifikanter Unterschied zwischen einer Zahnpasta mit niedrigem RDA-Wert und der alleinigen Verwendung von Wasser beim Vergleich des Substanzabtrages von Dentin festgestellt werden [107].

Die Abrasivität einer Zahnpasta scheint nicht nur abhängig zu sein von der Quantität, sondern auch von der physikalischen Beschaffenheit der abrasiven Partikel (Härte, Form, Größe, Konzentration der Partikel) [79, 104]. Die Abrasivität ist umso höher, je größer die abrasiven Partikel sind [29]. Nachteilig an abrasiven Partikeln sind die dadurch häufig auftretenden Hypersensitivitäten, Schädigung an harten und weichen Geweben, Schädigung am Restaurationsmaterial, Zahnfleischrückgang und keilförmigen Defekte [46, 90].

Bei den Verbrauchern werden „aktuell“ noch vermehrt Standard-Zahnpasten im täglichen Gebrauch genutzt.

Im Testurteil der Stiftung Warentest vom 10.10.2020 liegt die Zahnpasta „Signal White now“ mit der Note 1,1 auf Platz 2 der Gesamtwertung. Elmex Kariesschutz wurde im Jahr 2013 als Universalzahnpasta mit der Note 1,5 bewertet.¹²

1.4.4 Zahnpasten mit aufhellendem Effekt

Zahaufhellende Zahnpasten können durch die enthaltenen Substanzen Verfärbungen entfernen. Extrinsische Verfärbungen lassen sich durch abrasive Partikel entfernen. Intrinsische Verfärbungen sind nur mit chemischen Inhaltsstoffen durch die Freisetzung von Peroxiden entfernbar.

In Whitening-Zahnpasten können zusätzlich zu einer überdurchschnittlichen Menge oder Größe an abrasiven Partikeln auch Enzyme, Peroxidasen oder optische Agenzien enthalten sein. Durch die intraorale Entfernung des Pellicles erhöhen diese Inhaltsstoffe das Risiko von Abrasionen und Erosionen [109]. Die Abrasivität von „Whitening-Zahnpasten“ mit aufhellendem Effekt im Vergleich zu Standard-Zahnpasten wird kontrovers beschrieben. Es gibt Studien, die keinen höheren Abtrag von Whitening-Zahnpasten im Vergleich zur Standard-Zahnpasta feststellen konnten [78, 80]. Bei einer Studie wiederum resultierte der höchste Abtrag durch eine Whitening-Zahnpasta [176].

Beim Vergleich der abrasiven Partikel Kieselsäure, Kalziumkarbonat (CaCO_3) oder Natriumhydrogencarbonat (NaHCO_3), scheinen Kieselsäure und Karbonat weniger abrasiv zu sein im Vergleich zu Bikarbonaten/ Hydrogenkarbonaten [102]. Auch die intraoralen Restaurationen werden durch die Wahl der Zahnpasta und deren Inhaltsstoffe beeinflusst [4]. Mehrere Studien, unter anderem auch von Amaral et al., konnten bei in-vitro-Versuchen nachweisen, dass die Verwendung von abrasiven Zahnpasten mit einer Zunahme der Rauigkeit einhergehen. [11, 39, 42, 71, 153, 164, 166]. Eine erhöhte Oberflächenrauigkeit von Restaurationen beeinflusst die Plaque- und Bakterienadhäsion, die Verfärbungstendenzen und

¹²<https://www.test.de/Zahnpasta-im-Test-4607097->

tabelle/suche/?filter=null&sort=gesamtErgebnis&seite=1 (letzter Zugriff 08.04.2022)

Ästhetik der Restaurationen auf Dauer [25, 119, 135, 138]. Zudem hat eine veränderte Oberflächenrauigkeit einen quantitativen und qualitativen Einfluss auf die subgingivale Plaque [130].

Da immer mehr Patienten eine CAD/CAM-gefertigte Restauration im Frontzahnbereich erhalten, ist die Auswahl der richtigen Zahnpasta auch hinsichtlich der Ästhetik und langfristigen Stabilität wichtig.

1.5 Forschungsfragen der vorliegenden Arbeit und Hypothesen

Die vorliegende Arbeit stellt sich folgenden Forschungsfragen:

- Sind die Oberflächengüten von „neuen“ Chairside-verwendeten Restaurationsmaterialien aus ZLS und RIC für die indirekten Einzelzahnversorgungen in ihrem Eingliederungszustand (Glanzbrand oder Kompositversiegelung) vergleichbar?
- Haben Zahnpasten mit aufhellendem Effekt bereits kurzfristig (binnen eines Jahres) eine Auswirkung auf die Eigenschaften der Oberflächen von „neuen“ Chairside-verwendeten Restaurationsmaterialien für indirekte Einzelzahnversorgungen?

Dazu werden folgende Hypothesen aufgestellt.

- Erste Nullhypothese: Die Art der Oberflächenvergütung (Glanzbrand, Politur, lichthärtende Glasurmasse) hat keinen Einfluss auf die topographischen Eigenschaften (Oberflächenrauigkeit) und optischen (Glanz) eines Restaurationsmaterials.
- Zweite Nullhypothese: Es bestehen keine Unterschiede bei den optischen und topographischen Eigenschaften der Oberflächen zwischen den Restaurationsmaterialien vor und nach simulierter Einwirkung einer elektrischen Standardzahnbürste über ein Jahr - unabhängig von den verwendeten Zahnpasten.

1.6 Ziele der vorliegenden Arbeit

Ziel dieser Studie ist es, Aussagen zur Beständigkeit „neuer“ keramischer CAD/CAM Werkstoffe hinsichtlich des Abrasionsverhaltens einer Standardzahnpaste und drei Zahnpasten mit zahnaufhellendem Effekt im täglichen Gebrauch über den kurzfristigen Verlauf eines Jahres zu bewerten.

Die Ergebnisse sollen helfen, beim klinischen Einsatz mögliche Langzeitveränderungen bereits abschätzen zu können und so die Zahnärzte bei der Materialentscheidung sowie bei der Aufklärung der Patienten zu potentiellen Veränderungen bei der Anwendung von zahnaufhellenden Zahnpasten auf indirekt restaurierte Zähne zu unterstützen.

2 Materialien & Methoden

Bei der Untersuchung werden zwei „aktuelle“ Restaurationsmaterialien mittels drei Zahnpasten mit zahnaufhellendem Effekt sowie einer Standardzahnpasta über eine simulierte Dauer von einem Jahr (im Frontzahnbereich) mithilfe einer elektrischen Bürste behandelt und die Oberflächenmerkmale vor sowie nach den Putzinterventionen quantitativ und qualitativ erhoben. Dabei werden zwei klinisch mögliche Ausgangszustände der Materialien berücksichtigt: poliert und glasiert.

2.1 Materialien

2.1.1 Zahnpasten

Für die Durchführung wurden drei Zahnpasten ausgewählt:

- a) eine handelsüblich erhältliche im mittleren Preissegment (Signal) zur täglichen Anwendung,
- b) eine hochpreisige im kosmetischen „Luxussegment“ (Black is White) zur täglichen Anwendung und
- c) eine Reinigungszahnpasta aus dem Segment „Apotheken-Bedarf“ (Depurdent) die nur zwei Mal wöchentlich anzuwenden ist

Ergänzend zur letztgenannten wurde daher

- d) eine handelsübliche Prophylaxe-Zahnpasta zur täglichen Anwendung (Elmex) im Sinne einer Kontrollgruppe vor der Anwendung von Depurdent verwendet.

Die verwendeten Zahnpasten unterscheiden sich hinsichtlich der Abrasivität und des Fluoridgehalts. (s. Tabelle 1 auf Seite 20)

Tabelle 1 Tabellarische Übersicht zu den verwendeten Zahnpasten: Neben Hersteller und Markennamen (Stand Jahr 2015) und der jeweils vom Hersteller angegebene RDA Wert und Fluoridanteil. Die Preisinformation basiert auf einem Mittelwert von drei Angeboten (Stand Feb 2020)

Kurzbezeichnung und Chargen#	Hersteller	Markenname	RDA-Wert	Fluoridanteil	Preis pro 100 ml
Signal LOT 6057FCA 61458CC EXP-Date 10/19	Unilever, Hamburg, Deutschland	Signal White Now	180	1450 ppm	4,01€
Black is White <u>LOT</u> 267 MHDEXP06/20	Curaprox, Stutensee, Deutschland	Black is White	50	950 ppm, 15.000 ppm HAp	19,30€
Depurdent <u>LOT</u> 505818 <u>LOT</u> 6015986 EXP10/18	Dr. Wild& Co. AG MuttENZ. Schweiz	Depurdent & Clean & Polish	195	Ohne Fluoride	20,60 €
Elmex LOT 7036PL1145	GABA GmbH, Hamburg, Deutschland	Elmex Kariesschutz	77	1450 ppm	4,00 €

2.1.2 Restaurationsmaterialien

Vita Enamic

Die Zusammensetzung der Vita Enamic Proben ist in der folgenden Tabelle 2 aufgelistet.

*Tabelle 2 Zusammensetzung des Keramiknetzwerks von Vita Enamic*¹³

Material	chemische Formel	Anteil
Siliziumdioxid	SiO ₂	58-63 %
Aluminiumoxid	Al ₂ O ₃	20-23 %
Natriumoxid	Na ₂ O	9–11 %
Kaliumoxid	K ₂ O	4-6 %
Bortrioxid	B ₂ O ₃	0,5-2 %
Zirkoniumdioxid	ZrO ₂	<1 %
Kalziumoxid	CaO	<1 %

Es wurden ganze Blanks einer Lot-Nummer (s. Kapitel 2.2 auf S. 25) gewählt und für den Versuch in dünne Scheiben geschnitten.

Zur Oberflächenvergütung von Vita Enamic kann die Politur mit aufsteigender Körnung bis zur Hochglanzpolitur sowie die Glasur mit der entsprechenden, vom Hersteller gelieferten, lichthärtenden Glasurmasse gewählt werden.

Celtra Duo

Die CAD/CAM Blocks von Celtra Duo sind in zwei Transluszenzen: „high translucency“ und „low translucency“ erhältlich.¹⁴ [120]

Hinsichtlich der Oberflächenvergütung ist eine Politur in aufsteigender Körnung sowie die Glasur durch die vom Hersteller empfohlene Glasurmasse möglich.

13: <https://www.vita-zahnfabrik.com/de/VITA-ENAMIC-24969.html> (letzter Zugriff 08.04.2022)

14(https://www.celtra-dentsplysirona.de/doc/Download/Celtra_Duo/RES-Celtra-Duo-FactFile-Web-Flyer-DE-K79101445.pdf) (letzter Zugriff 03.03.2022)

Bestandteile der Hybridkeramik sind Lithiumoxid und Siliziumdioxid ,sowie 10% Zirkoniumdioxid¹⁵.

Laut Herstellerangaben besitzt Celtra Duo eine intrinsische Festigkeit von 420 MPa, nach dem Beschleifen durch die Fräsmaschine und nach Oberflächenvergütung durch Politur nur noch circa 210 MPa und nach der Glasur 370 MPa.

2.1.3 Untersuchungsübersicht

Die folgende Abbildung 1 auf Seite 23 stellt die Übersicht des Versuchsaufbaus mit Anzahl der Probekörpern, Reihenfolge der Untersuchungen und die Untersuchungszeitpunkte dar. Die beiden verwendeten Materialien Vita Enamic und Celtra Duo wurden jeweils mit Politur sowie mit Politur und Glasur vergütet. Da für jede Gruppe 9 Probekörper zur Verfügung stehen sollten, wurden pro Material und Vergütung 27 Proben hergestellt. Da die Proben der in der Gruppe mit der Zahnpasta „Depurdent“ erst nach Anwendung der Zahnpasta „Elmex“ bearbeitet wurden, gab es für diese Gruppe ebenso nur 9 eigenständige Proben je Material. Insgesamt wurden 108 Proben hergestellt.

Eine genauere Darstellung des Versuchsaufbaus folgt auf der Seite 24 in *Tabelle 3*.

15

https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/pim/de_DE/Prosthetics/Fixed/High_strength_glass_ceramic/Celtra_Duo/RES-Celtra-Duo-FactFile-Web-Flyer-DE-K79101445.pdf (letzter Zugriff 08.04.2022)

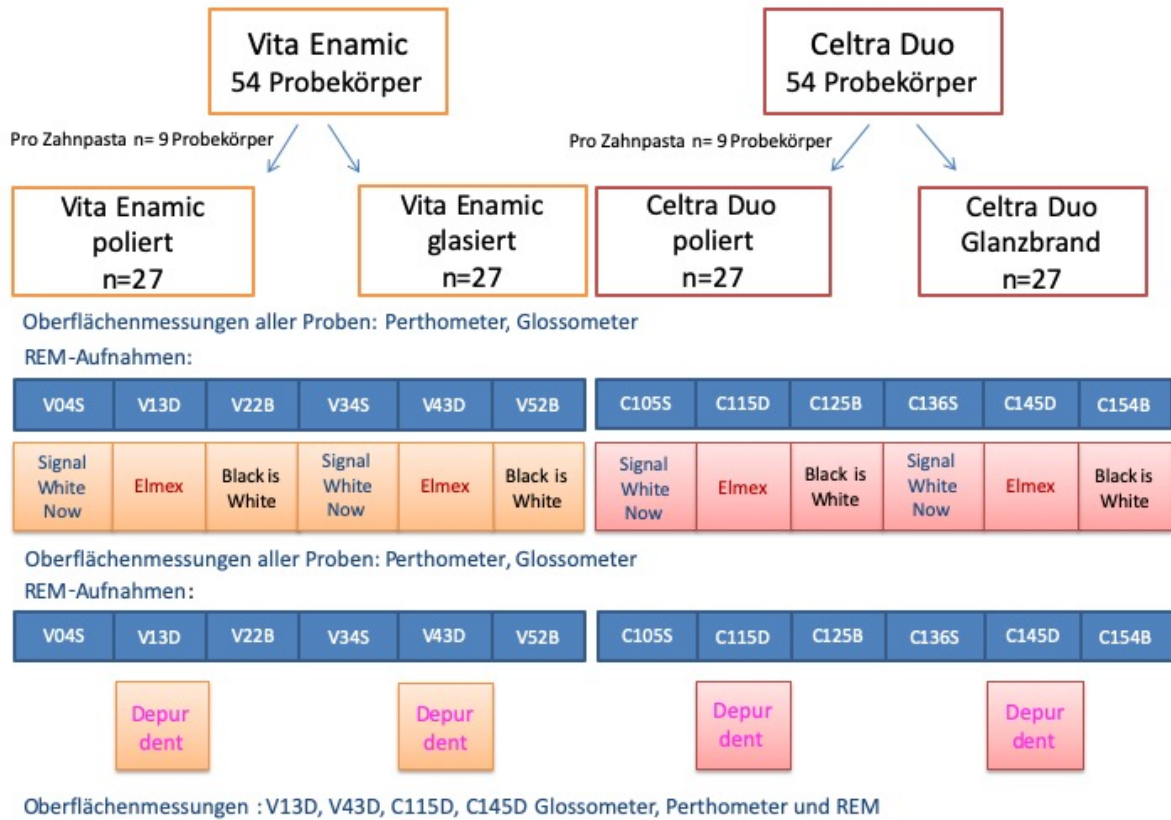


Abbildung 1 Flowchart der Probekörper unter Auflistung der Materialien mit jeweiliger Oberflächenvergütung und verwendeter Zahnpaste. Jedes Set von 9 Probenkörpern wurde mit einem eindeutigen Code versehen, der sich aus Material (V oder C) und einer laufenden Nummer ergänzt und abschließend mit dem Buchstabe der verwendete Zahnpaste (S,D,B) versehen. Im Verlauf sind auch die vorgenommenen Messungen zu den zwei resp. drei (Elmex+Depur dent) Zeitpunkten vermerkt.

Materialien & Methoden

Celtra Duo (n=54)						Vita Enamic (n=54)								
Poliert (n=27) C101-C109, C111-C119, C121-C129			glasiert (n=27) C131-C139, C140-C148, C149-C157			poliert (n=27) V01-V09, V10-V18, V19-V27			glasiert (n=27) V28-V36, V37-V45, V46-V54					
Oberflächenrauigkeit (Perthometer) n = 108 + Glanzmessung (Glossometer) n = 108														
Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (n = 12: C136S; C145D, C154B, C105S, C115D, C125B, V04S, V13D, V22B, V34S, V43D, V52B)														
Putzintervention (n=108: 365 * 12 = 49,5 min)														
Signal white now	Elmex	Black White	is	Signal white now	Elmex	Black White	is	Signal white now	Elmex	Black White	is	Signal white now	Elmex	Black White
Oberflächenrauigkeit (Perthometer) n=108														
Glanzmessung (Glossometer) n=108														
Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (n= 12, siehe folgende Probenbezeichnungen)														
C105S	C115D	C125B	C136S	C145D	C154B	V04S	V13D	V22B	V34S	V43D	V52B			
Putzintervention mit Depurderent (n=36: 8,15 * 52 ≈ 7min) : C111-C119, C140-C148, V10-V18, V37-V45														
Oberflächenrauigkeit (Perthometer) n=36 + Glanzmessung (Glossometer) n=36														
Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (n= 4: C115D, C145D, V13D, V43D)														

Tabelle 3 Darstellung der Untersuchung mit den Materialien, Oberflächenvergütungen, Voruntersuchungen mit den jeweiligen Zeitpunkten, sowie Probenbezeichnungen. Die Proben **C115D, C145D, V13D, V43D** wurden abschließend nach Putzintervention mit Depurderent erneut mit REM untersucht.

2.2 Herstellung der Prüfkörper Grundauführung

2.2.1 Trennen der Keramik-Blanks, Herstellen der Proben

Von den beiden Materialien Celtra Duo und Vita Enamic wurden jeweils Blanks für die CAD/CAM Fertigung aus der derselben Charge (identische LOT-Nummer) gewählt.

Da bei den Vita Enamic Chargen 1MT HT EM14 (CE0124 LOT 31950) insgesamt neun Blanks derselben Charge zur Verfügung standen, konnten mit einer Scheibendicke von 1,2 mm 92 Probekörpern hergestellt werden. Um die Anzahl der Scheiben pro Blank zu erreichen, wurden die Blanks vermessen und unter Berücksichtigung der Dicke der Schleifscheibe durch 9 geteilt.

Für die Celtra Duo Prüfkörper standen aus der Charge LTA2C14 REF 5365411015 LOT 18017907 8 Blanks zur Verfügung. Die Scheibendicke wurde auf 1,1 mm reduziert, und es konnten aus einem Celtra Duo Blank 10 Proben geschnitten werden.

Die Keramik-Blanks von Celtra Duo und Vita Enamic wurden halbautomatisch mit einer Diamantsäge unter kontinuierlicher Wasserkühlung in Summe 108 Scheiben getrennt (Accutom-50, Struers GmbH, Willich, Deutschland).

Trennmethode: Trennscheibe Diamond Cut-off Wheel 352 CA (neue Bezeichnung: B0D13, Struers, Ballerup, Dänemark), Geschwindigkeit: 3200 rpm, Vorschub: 0.100mm/s, Kraft: Mittel, Anzahl der Scheiben: 7, Dicke: 1.200 mm, Dickenkorrekturwert: 0.000 mm, Rotation: AUS, Kühlwasser: AN

Nach dem Trennen eines jeden Blanks in 8-10 Scheiben wurde die Trennscheibe des Struers Accutom-50 mit einem Schleifstein abgerichtet. Die Kühlflüssigkeit wurde jeden Tag nach Herstellerangabe gewechselt.



Abbildung 2 **getrennte Keramik-Blanks eines Vita CAD/CAM Blanks**, Kontrolle der Scheibendicke nach dem Trennen mit einer elektronischen Messlehre.

2.2.2 Herstellung der Prüfkörper (Einbetten)

Nach dem Trennen aller Keramik-Blanks in Scheiben wurden die entstandenen Proben (außer 27 Celtra Duo Proben zur späteren Oberflächenvergütung mit Glanzbrand) in Palavit G[®] eingebettet.

Die in Palavit G[®] eingebetteten Proben werden im weiteren Verlauf als Prüfkörper bezeichnet.

Verwendete Materialien und Vorgehen der Einbettung:

Einer der drei an der Putzmaschine montierten Kunststoffnäpfe wurde nach Isolierung mit Vaseline mit Palavit G[®] ausgegossen. Das verwendete Material Palavit G[®] wurde nach Herstellerangaben angemischt durch die Flüssigkeit Lot-Nr. 010464A, Farbe: 2017-07 und dem Pulver: Lot-Nr.: R010027, Farbe: 2019-07.

Dann wurde das hergestellte Palavit G[®]-Modell an einem wassergekühlten Trimmer an der oberen Seite reduziert und mit Silikon doubliert. Die entstandene Silikonform konnte dann zum Einbetten der Keramikproben verwendet werden.

Mit Hilfe eines Lochs am Boden der Silikonform konnte die Form kopfüber ausgegossen werden (s. Abbildung 3). Die Keramikprobe befand sich dabei auf einer Plexiglas[®]-Scheibe in zentraler Position, durch Vaseline fixiert (s. Abbildung 4). Um eine gleiche Position der Keramikscheiben bei allen Palavit G[®] Modellen zu gewährleisten, wurde auf das Plexiglas[®] ein Raster gezeichnet, das so bei allen Silikonformen angewendet werden konnte (s. Abbildung 4). Die Silikonform wurde mit einem definierten Gewicht (50 g) beschwert, um die Ränder abzudichten (s. Abbildung 5).

Der Kunststoffrest, der durch den Kanal in der Silikonform entstand, konnte mit einer Zange abgezwickelt und mit dem Handstück und einer kreuzverzahnten Fräse verschliffen werden.

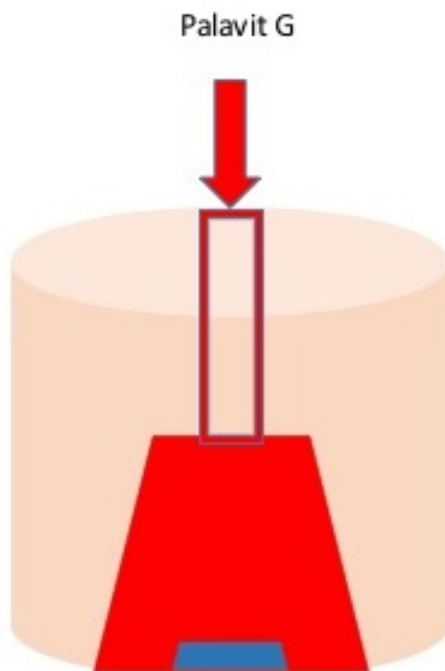


Abbildung 3 **Schematische Darstellung der Einbettung der Proben in[®] Acrylat mit Hilfe einer Silikonform.** Die Silikonform ist in hellorange dargestellt, der zentrale Kanal durch welchen Palavit G in die Hohlform eingegossen wird ist rötlich umrandet dargestellt. Die Keramik-Probe ist basal in blau dargestellt.

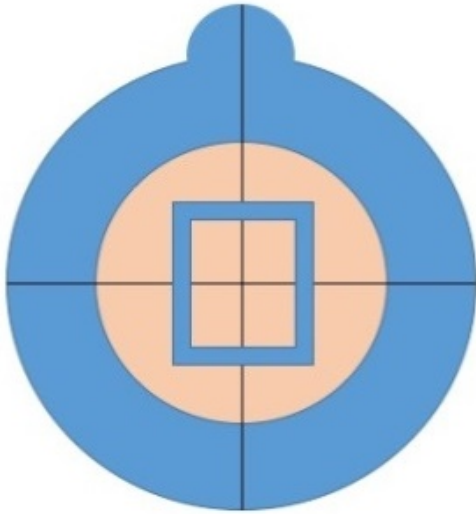


Abbildung 4 Schematische Darstellung der Entwicklung eines Rasters für eine vergleichbare Positionierung der Proben[®] im Acrylat. Die Maße des Acrylat-Probekörpers bilden den Umriss, Zentral ist der Umriss der Keramikprobe eingezeichnet. Es wurde von der Nase des Probekörpers nach oben zeigend ein Raster aufgezeichnet an welchem die Keramik-Proben zentral positioniert und mit Vaseline fixiert werden konnten.



Abbildung 5 mit Gewicht beschwerte Silikonform nach eingefülltem Palavit G[®]

Da nach 5-fachem Ausgießen mit Palavit G[®] die Silikonform durch die Hitzeentwicklung beim Abbinden beschädigt wurde, mussten diese Formen insgesamt 22-mal hergestellt werden. Durch die ständig gleichbleibende Benutzung des Rasters auf der Plexiglas[®]-Scheibe konnte die selbe Positionierung aller Keramikproben in den Palavit G[®]-Modellen erreicht werden.

2.3 Modifizieren der Probenoberflächen für die Prüfkörper

2.3.1 Politur Probenoberflächen im Prüfkörper

Nach dem Einbetten wurden alle Prüfkörper, bis auf die noch nicht eingebetteten 27 Celtra Duo Proben an einer rotierenden Scheibe mit Schleifpapier in aufsteigender Körnung bis zum Hochglanz poliert (Tegramin-20, Struers). Die Politur erfolgte in aufsteigender Körnung 320, 600, 1200, 4000 und 6000 stets in dieser Reihenfolge an einer Poliermaschine Motopol 12 von Buehler (Buehler UK Ltd., Coventry, England).

Pro Schleifpapier (Buehler, Carbi Met SiC Abrasive Paper) konnten 2 Proben geschliffen werden, danach musste das Schleifpapier gewechselt werden. Um eine möglichst gleiche Politur bei allen Keramikproben zu gewährleisten, wurden die Proben bei jedem Schleifpapierwechsel um 90 Grad gedreht. Begonnen wurde mit der Nase des Palavit G[®]-Modells zur Mitte der Schleifscheibe (siehe Abbildung 6, S. 30).

Während des Schleifens wurden die Proben nicht bewegt, sondern mit leichtem und gleichmäßigem Druck (manuell, Wheel only, ohne Auto head) auf das rotierende Schleifpapier (150 RPM) gedrückt.

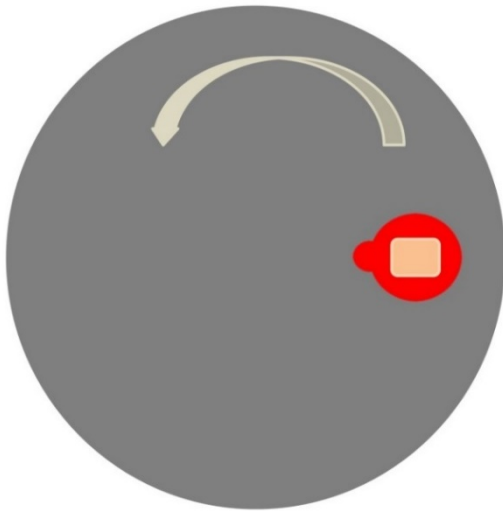


Abbildung 6 **Schematische Darstellung des Schleifvorgangs.** Der Pfeil zeigt die Drehrichtung der Scheibe mit der aufgeklebten Polierscheibe an. Die Probe wird zu Beginn mit der Nase zur Mitte und stetigem Druck auf die rotierende Polierscheibe gedrückt.

2.3.2 Glasur der Vita Enamic Proben im Prüfkörper ¹⁶

Die Hälfte der Vita Enamic Prüfkörper (n = 27) wurden nach der Politur (Abschnitt 2.3.1) entsprechend der Herstellerangaben mit Al₂O₃, 50 µm und einem Druck von 1 bar gestrahlt und mit heißem Wasserdampf am Dampfstrahlgerät gereinigt, um eine Glasur zu ermöglichen. Hiernach wurde die Oberfläche mit einem frischen Einwegpinsel mit Vita Adiva C-Prime silanisiert.

Für die Glasur wurde das Vita Enamic Stains Kit verwendet, welches sechs Malfarben, Pinsel und Liquid (LOT 38521) für die Individualisierung der Proben umfasst. Nach Vermischung der Farbe „6 Black“ des Vita Enamic Stains Kit mit dem Liquid wurde diese gleichmäßig mit dem Pinsel „Pinsel 6 Rein Rotmarder Kollinsky“ #61237 auf die Probe aufgetragen und die Oberfläche in einem Lichthärtegerät Speed Labolight (Hager und Werken, Matr. Nr 3586, Deutschland, 47269 Duisburg) für 5 Minuten auspolymerisiert. Für die Oberflächenversiegelung wurde die chemische Glasur Vita Enamic Glaze (LOT

¹⁶ https://www.vita-zahnfabrik.com/pdb_zubehoer_de,27568,103070.html (letzter Zugriff: 21.09.2021)

53570) verwendet. Diese wurde in dem Lichthärtegerät Speed Labolight (Hager & Werken, s.o.) für 10 Minuten auspolymerisiert.

2.3.3 Glanzbrand der Celtra Duo Proben und Einbettung in Prüfkörper

Die 27 Proben des Materials Celtra Duo wurden nach der Politur und vor dem Einbetten in Palavit G[®] zweifach mit dem entsprechenden Glanzbrand (Celtra Glaze LOT16002254, REF601322) nach Gebrauchsanweisung vergütet (s. Tabelle 4).

Überstehende Keramik-Kanten wurden vorher mit einem diamantierten Gummipolierer bei Umdrehungszahlen kleiner 8.000 U/min entfernt. Anschließend wurden die Probenoberflächen mit dem Dampfstrahlgerät gereinigt. Die Glasurmasse wurde vor der Benutzung mit einem Glasspatel/ Achatpatel umgerührt, um eine optimale Durchmischung zu gewährleisten. Danach wurde eine dünne Schicht Glasurmasse mit Liquid entsprechend der Herstellerangaben auf die Proben aufgetragen.

Die Eckdaten des verwendeten Brennprogramms sind der im Anschluss folgenden Tabelle 4 zu entnehmen.

Nach dem 1. Brand musste ein 2. Brand aufgetragen werden, um eine sichtbar homogene Oberfläche zu erzielen. Da die Glasurmasse auch für nachträgliche Strukturierung der Restaurationsoberfläche genutzt werden kann, ist die Oberfläche nach dem Glanzbrand nicht plan, sondern weist wellige Pinselspuren vom Auftragen auf (s. Abbildung 7 auf Seite 32). Der zweite Brand wurde mit einer verringerten Endtemperatur von 770°C durchgeführt.¹⁷

Die 27 Celtra Duo Keramikproben konnten aufgrund der hohen Brenntemperatur im Keramikofen erst nach dem Glanzbrand in Palavit G[®] eingebettet werden. Die Oberflächen der Proben waren wegen der oben beschriebenen Struktur des Glanzbrandes nicht „glatt“ im Sinne von plan, und wurden daher manuell eingebettet.

¹⁷https://www.dentsplysirona.com/content/dam/dentsply/pim/de_DE/Prosthetics/Fixed/High_strength_glass_ceramic/Celtra_Duo/GA_Celtra_Duo_Richtlinien_DE_50539988_2018_04.pdf
(letzter Zugriff: 17.03.2020)

Tabelle 4 Allgemeine Brennempfehlungen für Celtra Duo

	Trocken-Dauer	Schließzeit	Vorwärmzeit	Start-temp.	Aufwärmrate	Endtemp	Haltezeit	Abkühlzeit
1.Glasurbrand	2:00 (min.)	2:00 (min.)	2:00 (min.)	500 (°C)	60 (°C/min)	820 (°C)	1:30 (min)	3:00 (min)
2./3./4. Glasurbrand	2:00 (min.)	2:00 (min.)	2:00 (min.)	500 (°C)	60 (°C/min)	720 (°C)	1:30 (min)	3:00 (min)

(Allgemeine Brennempfehlungen für Celtra Duo)¹⁸



Abbildung 7 **Darstellung der strukturierten Oberfläche einer mit Glasur versehenen Celtra Duo Probe** nach dem Glanzbrand und nach dem Einbetten in Palavit G®.

Die Proben wurden unter Sicht von Hand auf die noch zähplastische Palavit G® Schicht im Kunststoffnapf gelegt. Bei Bedarf wurde im Nachhinein noch Kunststoff hinzugefügt und am Handstück bei max. 16.000 U/ per min die Seiten

¹⁸Quelle:https://www.celtra-dentsplysirona.de/doc/Download/Celtra_Duo/GA_Celtra_Duo_Richtlinien_DE_50539988_2018_04.pdf (letzter Zugriff 08.04.2022)

mit einer kreuzverzahnten Fräse und einem Silikonpolierer an den Rändern geglättet. Die Oberfläche der Proben wurde hierbei mit der Fräse nicht berührt.

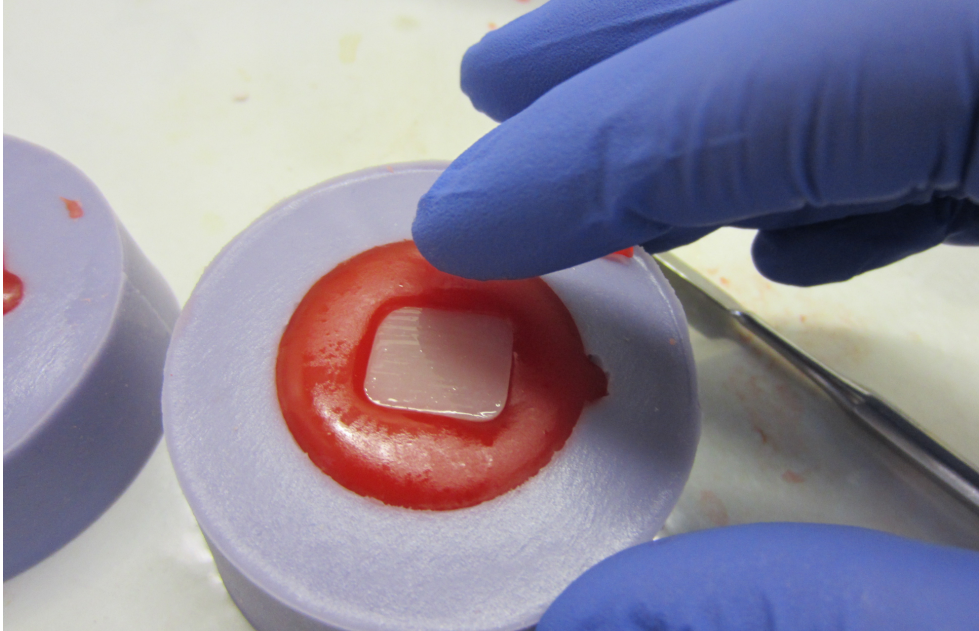


Abbildung 8 manuelle Positionierung der durch Glanzbrand vergüteten Celtra Duo Probe in leicht ausgehärtetem Kunststoff. Die Probe muss für geringe Nacharbeit möglichst Plan positioniert werden, da die Glanzmessung später auf einer planen Oberfläche durchgeführt werden sollte.

Nachbereitung der Proben

Zur Sicherstellung eines ausreichenden Platzangebots für Slurry und die Borsten der Bürstenköpfe wurde jeder Prüfkörper individuell mit dem Handstück und dem Trimmer basal sowie an den „Führungsnasen“ so beschliffen, dass sie friktionslos in die Kunststoffnäpfen der Putzmaschine gleiten konnten. Zudem mussten die Proben zur späteren Identifizierung nummeriert werden. Hierfür wurde die Materialbezeichnung als erster Buchstabe (V für Vita Enamic und C für Celtra Duo), sowie eine fortlaufende Nummer von 1 bis 54 für die Proben von Vita Enamic und 100-154 für die Proben von Celtra Duo. Als letzter Buchstabe wurde der Anfangsbuchstabe der zu verwendenden Zahnpasten genommen. Für die Gruppe Elmex-Depurident wurde der Buchstabe D gewählt.

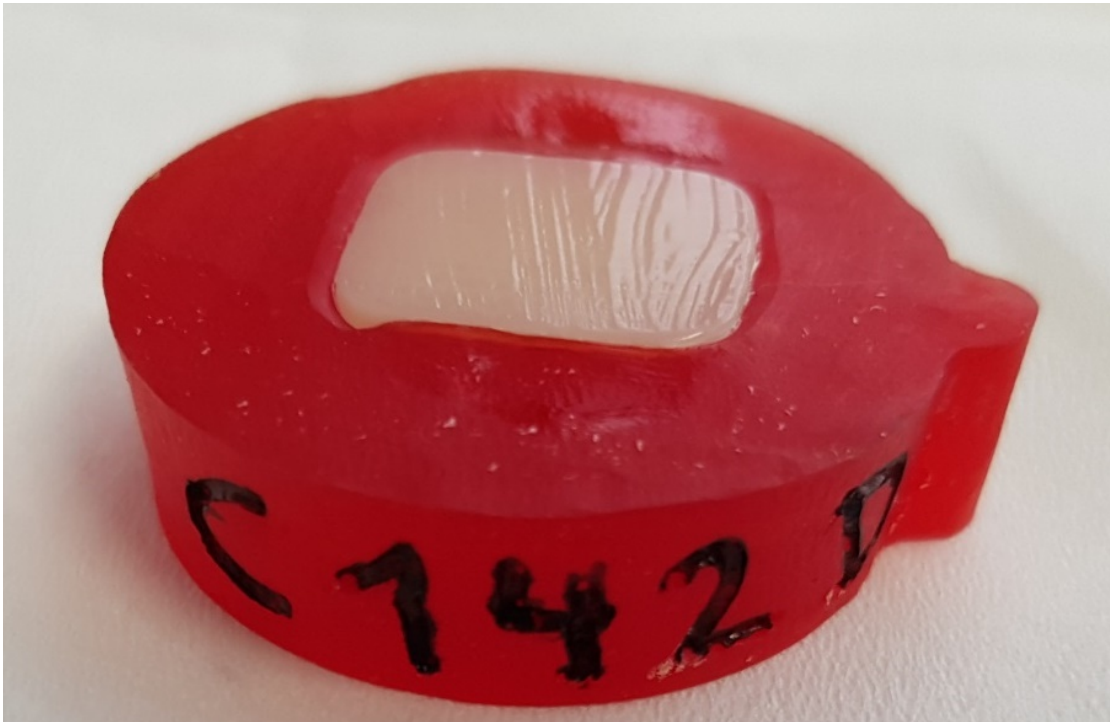


Abbildung 9 **Beispiel für die Probenbeschriftung „C142D“ auf dem Prüfkörper.** C steht für Celtra Duo (hier: glasiert), 142 ist die laufende Nummer der Probe und D bedeutet, dass diese Probe mit der Zahnpasta Depurdent geputzt wurde. Alle Proben bei dieser Reihe wurden vorab mit Elmex geputzt. Die Acrylatblöcke (Palavit G®) in die das Blättchen eingebettet ist haben neben einer konischen Form eine „Führungsnase“ (halbkreisförmige Ausbuchtung; rechts im Bild). Dadurch können die Prüfkörper reproduzierbar in die Aufnahmen der Putzmaschine gesetzt werden.

2.4 Herstellung des Slurrys

Das Mischen des Slurrys wurde nach den Vorgaben der ISO-Nummer EN ISO 11609 durchgeführt: 25 g der entsprechenden Zahnpasten wurden mit 40 ml destilliertem Wasser vermischt und in einem Glas-Messbecher mit Magnetrührer für 2 min vermischt. Nach dem Anmischen wurde die Suspension bis zum Rand in die Kunststoffnäpfe gefüllt. Für jeden Putzzyklus wurde ein neues Slurry angemischt.

Während der Putzzeit wurde kontrolliert, ob eine ausreichende Menge an Slurry vorhanden ist und gegebenenfalls nachgefüllt. Nach jeder Probenreihe wurde die Maschine gereinigt und ein neues Slurry eingegossen. Die Proben wurden für 20 Sekunden unter fließendem Wasser abgespült, mit einem weichen Baumwolltuch

getrocknet und vorsichtig trockengeblasen, um ein Verkratzen der Oberfläche zu verhindern.

2.5 Methoden der Oberflächenquantifizierung der Probekörper

Der Überblick über die Vorgehensweise und die jeweiligen Untersuchungszeitpunkte findet sich in Abbildung 1 auf Seite 23 und in der Tabelle 3 auf Seite 24.

Um die Oberflächenveränderung durch den Putzversuch beurteilen zu können, wurden nach der Oberflächenvergütung mit Hilfe des Glossometers, des Perthometers und durch Rasterelektronenmikroskopie bei einer Probe pro Gruppe die Oberflächen der Proben quantitativ und qualitativ vermessen.

2.5.1 Qualitative Untersuchung mittels Raster-Elektronenmikroskop (REM)

Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen wurden mit dem Gerät LEO 1430 der Firma Zeiss (Carl Zeiss Ag, Oberkochen, Germany) durchgeführt.

Vorab wurden die zu messenden Oberflächen mit Gold-Palladium an dem Sputter Coater der Firma BalTec (SCD 050 BalTec, Liechtenstein) beschichtet. Zur Orientierung wurden 4 Messpunkte je an der entsprechenden Seitenmitte in den Kunststoff eingraviert.

Der gewählte Arbeitsabstand betrug 18-21 mm.

Die REM-Aufnahmen wurden nur bei einer Probe jeder Charge aufgenommen.

Es wurden Aufnahmen in drei verschiedenen Vergrößerungen (100-fach, 1000-fach und 5000-fach) angefertigt.

2.5.2 Quantitative Untersuchung mittels Glossometer (Glanzmessgerät®)

Zur Messung des Oberflächenglanzes wurde das Glanzmessgerät Picogloss 560 MC-XS mit einem Einfallwinkel von 60 ° verwendet (Erichsen, Hemer, Germany).

Die resultierenden Glanzwerte wurden in GU (Glossunits) auf dem Display abgebildet. Zur Kalibrierung des Glossometers wurde die vom Hersteller empfohlene schwarze Glasplatte mit definiertem Glanzwert 100 GU verwendet.

Um die Glanzmessung auf den Proben an 3 reproduzierbaren Stellen innerhalb des „Putzfensters“ durchzuführen, wurde eine Vorrichtung mit Hilfe des 3D-Druckers entwickelt. 3 Markierungen definierten 3 Messstellen, die durch Verschieben des Glossometers jedes Mal reproduzierbar waren. Durch den Abstand von 1 mm zwischen den Markierungen lagen die gemessenen Punkte im Putzfenster auf der Materialprobe. Die Proben wurden mit einer kleinen Menge Knetmasse in die Vertiefung eingebracht und mit dem Glossometer geebnet. An jeder Messstelle (L, M, R) wurde 3-mal gemessen (L1, L2, L3; M1, M2, M3; R1, R, R3). In der Auswertung wurde der Durchschnittswert aller 9 Messwerte verwendet.

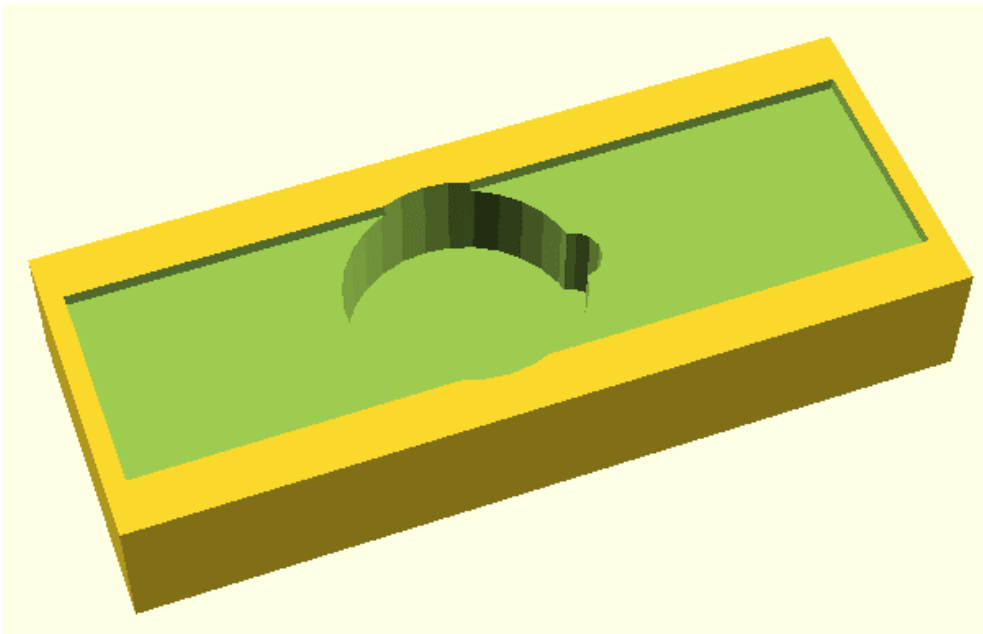


Abbildung 10 CAD der Aufnahme von Prüfköpfen zur Glanzmessung. Druckvorstufe des STL-Datensatzes für Fused Filament Modeling (Makerbot PLA Filament (schwarz), Replicator+, Makerbot Industries LLC, Brooklyn, NY 11201 USA). Die rechteckigen Vertiefung diente der Positionierung des Glossometers mit Freiheitsgrad von 9mm zum Verschieben in Längsachse.

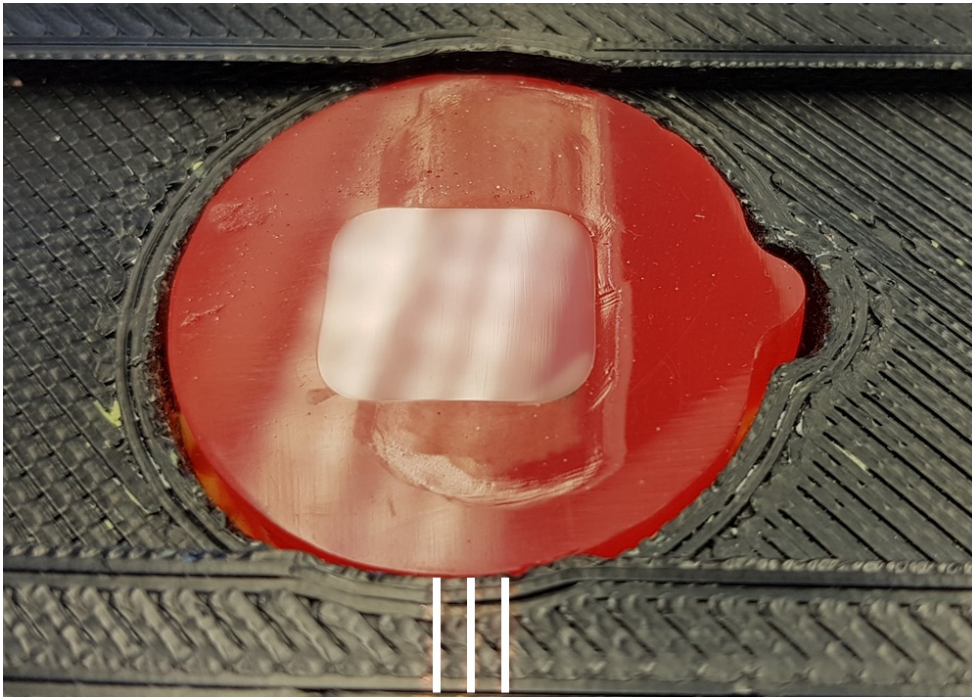


Abbildung 11 **Positionierte Probe in 3D gedruckter Vorrichtung für die Glanzmessung.** Das Putzfenster ist hier durch den Lichteinfall sichtbar. Die weißen Linien am unteren Bildrand stellen auf der Vorrichtung markierte Referenzlinien dar, für Messung der Glanzwerte auf der Probe. Es befindet sich eine Probe des Materials Celtra Duo poliert in der Glanzmessungsvorrichtung.



Abbildung 12 **positioniertes Glanzmessgerät Picogloss 560 MC-XS nach Probenmessung auf der 3D-gedruckten Vorrichtung mit eingesetztem Prüfkörper.** Oben im Bild befindet sich die Kalibrierungsvorrichtung mit einer schwarzen Glasscheibe.

2.5.3 Quantitative Untersuchung mittels Perthometer

Zur taktilen Messung der Oberflächenparameter Ra, Rz, Wt, Rt, Rp und Rq wurde ein Perthometer der Firma Mahr (S6P, Mahr, Göttingen, Germany) mit einer Messnadel unter direktem Kontakt der Probe verwendet.

Durch Vorversuche konnte das später resultierende Putzfenster für die Messung identifiziert werden. Die Messnadel des Perthometers Perthen Mahr kann Oberflächenabweichungen zwischen - 250 und +250 μm Höhe mit einer Genauigkeit von 2 μm auf einer maximalen Teststrecke von 6 cm erfassen.

Mit einem harten, plastischen Material wurden die Prüfkörper waagrecht auf einer Glasplatte fixiert und mittels einer installierten Richtwage zur Messebene 0° ausgerichtet. Diese Glasplatte mit Prüfkörper wurden mit Wachs auf dem Perthometer Messtisch so befestigt, dass die Messstrecke orthogonal zur Vor- und Rückschubbewegung der OralB Zahnbürste verlief.

Es wurden jeweils 11 Profile im Abstand von 600 μm mit einer Amplitude von max. 250 μm gemessen. Die Messgeschwindigkeit betrug 0,50 mm/s, der Punktabstand betrug 0,5 μm . Die Breite des Messbereichs betrug damit 6 mm.

Nach der Referenzfahrt zu Beginn der Messungen wurde die Messung unter Kontakt mit der Probenoberfläche +/-10 μm an der Probenecke links unten gestartet. Von dort aus fuhr die Perthometernadel 3 mm in Y-Achsenrichtung in die Probe, um die Messung im späteren Putzfeld vorzunehmen und startete dann die Messung.

Die Messstrecke der Profile umfasste ausschließlich die Probenoberfläche, unterschied sich durch die Spaltbildung bei eingebetteten Celtra Duo Proben jedoch zwischen den beiden Gruppen:

- Bei Vita Enamic wurde eine Profillänge von 15 mm eingestellt.
- Bei Celtra Duo wurde je nach Dimension der Probenoberfläche eine Profillänge von 12-13 mm eingestellt.

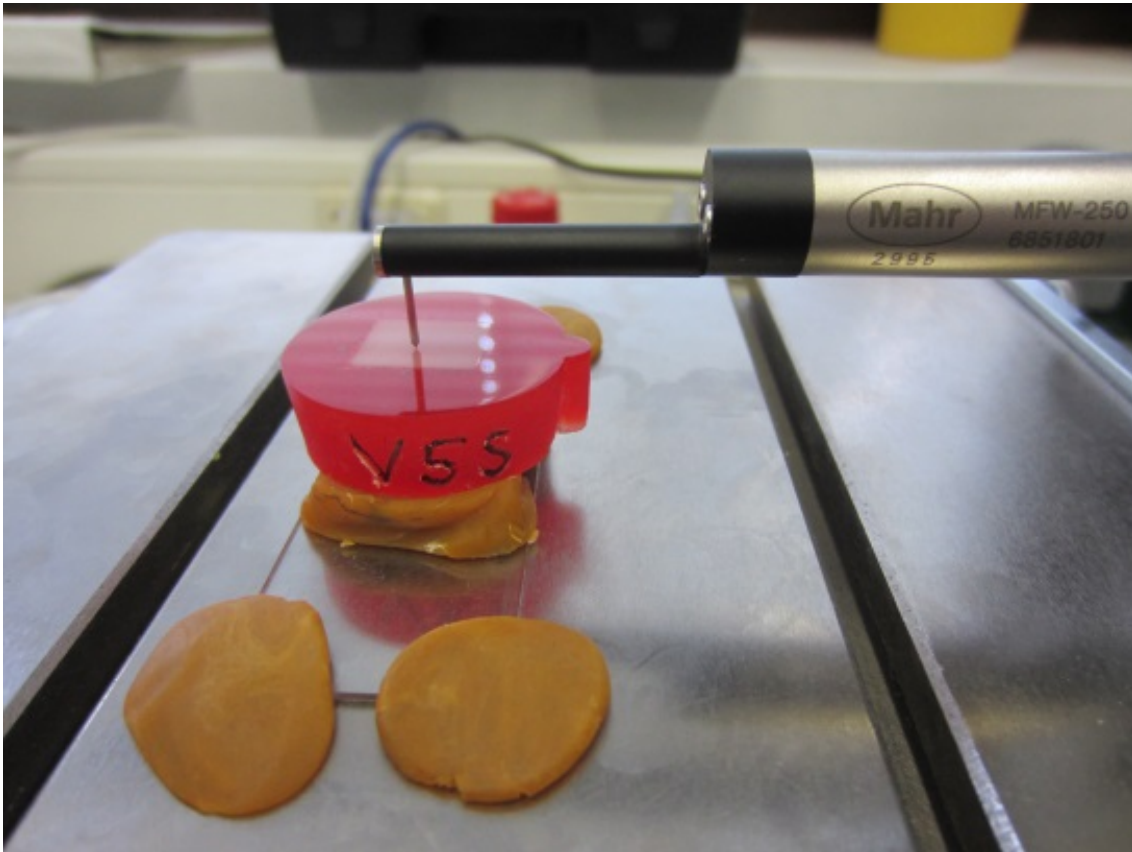


Abbildung 13 Seitliche Aufnahme einer Probe (V5S) bei der Oberflächenquantifizierung durch das Perthometer. Abgebildet ist die mit hartplastischem Material fixierte Glasplatte sowie die waagrecht eingestellte Probenoberfläche.

2.6 Putzsimulation als Intervention an den Oberflächen

Der Aufbau der Studie richtet sich nach dem ISO Standard für Abrasionstests [International Standards organization. Technical specification 14569-1. Dental materials – guidance on testing of wear resistance. Part 1: wear by tooth brushing. Switzerland: ISO; 2007] hinsichtlich der Herstellung des Slurrys und des maximalen Anpressdruckes.

Putzvorgang

Die Proben wurden mit elektrischen Zahnbürsten der Marke Oral-B 600 Cross Action, die in einem Prüfstand installiert sind, für einen simulierten Zeitraum von einem Jahr im Frontzahnbereich (s. Interventionszeit/ Putzzyklus, Seite 41) gereinigt. Mit drei montierten Zahnbürsten konnten jeweils drei Proben gleichzeitig geputzt werden.

Anpressdruck

Durch an jeder Zahnbürste montierte Gewichte, konnte der Anpressdruck variiert werden. In Anlehnung an die DIN 13973-1 (0,25 - 2,5 N) und die EN ISO 609:1998 (1,5 N), sowie weiteren Studiendesigns [111], [177] wurde ein Anpressdruck von 1,5 N gewählt. Um den effektiven Anpressdruck der Zahnbürsten zu überprüfen, ist an dem Gerät eine Messdose fixiert, welche das Auflagegewicht misst und an einen mit ihr verbundenen Bildschirm zur Kontrolle vor Start des Putzvorgangs wiedergibt.

Die Proben, welche mit Elmex geputzt wurden, wurden nach den Oberflächenmessungen noch mit der fluoridfreien Reinigungspaste Depurdent (RDA 195) geputzt.

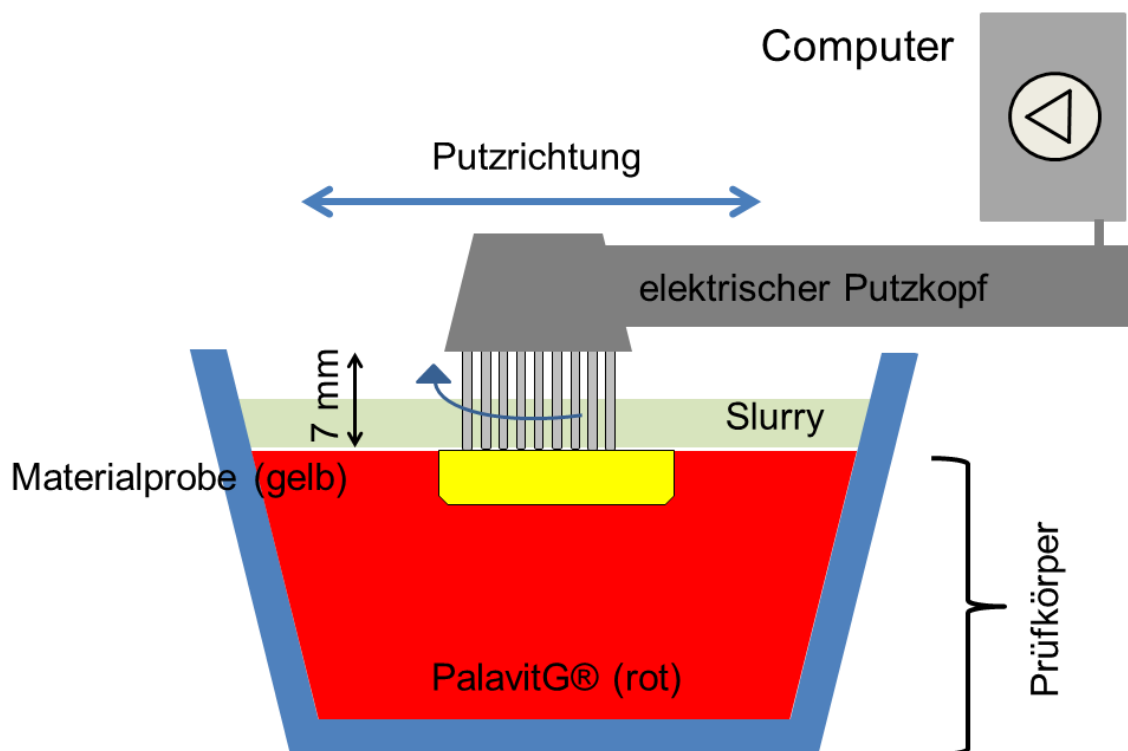


Abbildung 14 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus mit Oral-B-Bürstenkopf, Materialprobe (gelb) (Vita Enamic oder Celtra Duo) in Palavit-Kunststoff (rot) eingebettet. Die in

Palavit G® eingebetteten Materialproben werden als Prüfkörper bezeichnet. Die Materialproben wurden vor der Einbettung nur als „Proben“ bezeichnet.

Interventionsmedium

Der Slurry der Zahnpasten wurden wie in auf Seite 34 in Abschnitt 2.4 beschrieben hergestellt.

Nach dem Putzzyklus wurden die Proben für jeweils 20 Sekunden unter fließendem Wasser (18 °C) abgespült, mit dem Luftbläser getrocknet, mit einem weichen Baumwolltuch abgetupft, um Reste des Slurrys zu entfernen.

Interventionszeit/ Putzzyklus

Die Interventionszeit errechnet sich aus den Daten von Harnacke et al. [67], welche eine mittlere Putzdauer für den 2. Sextanten (Zähne 13 bis 23) von 8,15 Sekunden ermittelt haben. Auf ein Jahr mit 365 Tagen gerechnet, entspricht dies einer Putzdauer von 49 Minuten und 35 Sekunden für den Oberkiefer-Frontzahnbereich. Die Bürstenköpfe wurden jeweils nach 7 Zyklen à 49 Minuten 35 Sekunden; also etwa nach 6 Stunden effektivem Putzvorgang gewechselt.

a) Depurdent und Goldstandard

Die Reinigungszahnpasta Depurdent besitzt eine Anwendungsempfehlung von höchstens „2 Mal pro Woche“. Daher beträgt der Putzvorgang mit der Reinigungszahnpasta im Frontzahnbereich nach Daten von Harnacke et al für Depurdent für die Simulation eines Jahres 7 Minuten [67]. Zur klinischen Vergleichbarkeit wurden die Proben der Gruppe „Depurdent“ daher vorab mit einer Standard-Zahnpasta (Elmex) für 49 Minuten und 35 Sekunden geputzt. Vor der Intervention mit Depurdent wurde eine zusätzliche Oberflächen- und Glanzmessung durchgeführt.

b) Alle anderen Zahnpasten

Black is White und Signal White now wurden 49 Minuten und 35 Sekunden auf den vier Materialgruppen angewendet.

Pro Durchgang wurden 3 Probekörper parallel mit drei elektrischen Zahnbürsten der Marke Braun (Oral B®) und dem Bürstenkopf Precision Clean gereinigt. Der Bürstenkopf Precision Clean für die elektrische Zahnbürste von Oral B ist ein häufig verwendeter Bürstenkopf [42].

Messzeitpunkte

Nach der Putzintervention der Proben wurden die in Kapitel 2.5 beschriebenen Messungen durchgeführt.

2.7 Statistische Methoden

2.7.1 Konzept der Auswertung

Die Auswertung beschreibt anhand von Mittelwerten und Standardabweichung die Verteilung der Messwerte. Verteilungen jeder Versuchsreihe werden mittels Shapiro-Wilk Test auf Normalverteilung getestet, wobei ein Fehler erster Art von 5% angenommen wird. Im Falle der Ablehnung der Nullhypothese einer Normalverteilung werden Vergleiche der Mittelwerte mit dem nicht parametrischen Rangsummentest (Wilcoxon) durchgeführt. Ansonsten wird students t-test verwendet. In beiden Fällen wird der Fehler erster Art auf 5% gesetzt und das Niveau von $p < 0.05$ als statistisch signifikanter Unterschied gewertet. Zum Vergleich der Differenzen zwischen vor- und nach der Putzintervention wird aus den R_a -Werten (R_a [nach] - R_a [vor] Putzintervention) eine Matched-Pair-Analyse nach Bland & Altman durchgeführt [22]. Dazu wird auf der y-Achse die Differenz eines Messwertepaars vor und nach Intervention, und auf der x-Achse der Mittelwert des Messwertepaars vor und nach Intervention aufgetragen. Der Paardifferenztest prüft, ob sich bei den beiden Gruppen die mittlere Differenz aller Messungen statistisch unterscheidet. Zur Berechnung und Erstellung von Diagrammen und Tabellen wurde das Softwarepaket JMP (SAS Comp.) in den Versionen 13, 14.1 und 15 eingesetzt.

2.7.2 Umgang mit Rohdaten der Rauigkeitsmessung

Es wurden pro Probenoberfläche je 11 Linien vor und nach der Putzintervention am Perthometer gemessen. Die Werte R_a , R_t , R_z , W_t , R_q und R_p wurden durch das Programm Digisurf für jede Probe und jede Messlinie einzeln exportiert und in einer Rohdatentabelle anhand der Probenbezeichnung zusammengefasst.

- R_z gemittelte Rautiefe von 5 hintereinander liegenden Messstrecken
- R_a arithmetischer Mittelrauwert, Abweichungen des Rauheitsprofils ohne Unterscheidung zwischen Materialauf- oder abtrag

Die Beschreibung der Rauigkeitsparameter findet sich auf Seite IV. Die in der Dissertation enthaltenen Rauigkeitsparameter sind zum besseren Verständnis im Folgenden aufgeführt^{19,20}.

Für die Auswertung wurden in der vorliegenden Arbeit nur die oben beschriebenen Rauigkeitsparameter Ra und Rz verwendet. Dafür werden Mittelwerte und Standardabweichung der Verteilungen wiedergegeben und deskriptiv mit Boxplot-Graphen dargestellt. Zu jedem mittelwertigen Messwert (Ra, Rz) sind zur Darstellung der Streuung der Werte die Standardabweichung und das Ergebnis des Shapiro Wilk Tests aufgeführt.

Mithilfe des Statistikprogrammes JMP wurde dann die Auswertung anhand dieser Rohdaten und den Mittelwerten einer jeder Probengruppe vor und nach Putzintervention durchgeführt. Die Rauigkeitswerte Ra wurden mittels matched pairs von JMP verglichen.

2.7.3 Umgang mit Rohdaten der Glossometermessung

Es wurde die Oberfläche jedes Prüfkörpers vor und nach Putzintervention mit der 3D gedruckten Vorrichtung und dem Glossometer vermessen.

An 3 Stellen auf der geputzten Probenoberfläche wurden je 3 Messwerte ermittelt. Die Messwerte wurden handschriftlich in das Laborbuch eingetragen und in eine Excel-Tabelle übertragen.

Aus den 3 Messwerten der jeweils 3 Messstellen wurden 3 Mittelwerte ermittelt sowie ein Mittelwert aller 9 Werte (mittlere Mittelwerte).

Die Verteilungen der mittleren Mittelwerte aller Proben einer Prüfgruppe wurden unter Annahme einer zugrunde liegenden Normalverteilung mittels Shapiro Wilk Test ($\alpha = 0.05$) getestet.

Ein statistisch relevanter Unterschied wird angenommen, wenn der p-Wert kleiner oder gleich 0,05 ist.

19 <https://www.mahr.com/mahr-parameter/html/deutsch/MarSurf/MarSurf.html> (letzter Zugriff 08.01.2020)

20 <https://www.technisches-zeichnen.net/technisches-zeichnen/diverses/rauheitswerte.php> (letzter Zugriff 08.01.2020)

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Rauigkeitsmessung

3.1.1 Übersicht der Ergebnisse der Rauigkeitsmessung

Die Tabelle 5 und auf Seite 46 und Seite 47 umfassen jeweils die Mittelwerte und Standardabweichungen aus den Rauigkeitsuntersuchungen des RIC (Vita Enamic, Tabelle 5) sowie der ZLS Keramik (Celtra Duo,) vor und nach den Putzinterventionen mit den vier Zahnpasten sowie das Ergebnis des Tests auf Normalverteilung in jeder Prüfgruppe (n = 9).

Insgesamt wurden an allen Proben der 12 Gruppen (Gesamt: n = 108) die Messungen von Ra, Rt, Rz, Wt sowie Rp und Rq vor und nach Putzintervention erfolgreich durchgeführt. An allen 36 Proben, welche mit Elmex geputzt wurden, wurde eine zusätzliche Messung der Rauigkeit (mit den o.g. Parametern) nach Simulation der einjährigen Nutzung der Reinigungszahnpasta Depurdent erfolgreich durchgeführt.

Bei der Untersuchung auf Normalverteilung der arithmetischen Mittelrauigkeit Ra zeigten sich bei 2 Proben deutliche Ausreißer in den Perthometer-Linien vor Putzintervention. Bei diesen insgesamt 14 Perthometer-Messlinien handelt es sich um die komplette Probe C135 S vor Intervention mit Signal White now und Perthometerlinien 9, 10, 11 der Probe C133 S vor Intervention mit Signal.

Diese Messwerte wurden aus der weiteren Auswertung ausgeschlossen und sind in der Mastertabelle nicht aufgeführt. Weiteres dazu findet sich in der Diskussion.

Tabelle 5 **Ergebnisse der Rauigkeitsmessung von Vita Enamic glasiert und poliert** vor und nach Putzintervention mit den vier Zahnpasten. Angegeben sind die Mittelwerte aus den verwerteten Messungen (9 Proben à 11 Linienpaare, 99 Messlinien) sowie die Standardabweichungen (Std.Abw.). Die Spalte „Shapiro Wilk“ gibt das Ergebnis des Tests auf Normalverteilung an; bei $p < 0.05$ muss wird das Vorliegen einer solchen abgelehnt.

		Zahnpaste	Zustand	Ra			Rz		
				Mittelwert	Std. Abw.	Shapiro Wilk	Mittelwert	Std. Abw.	Shapiro Wilk
Vita Enamic	glasiert	Black is White	vor Intervention	0,92	0,52	<0,0001	4,31	2,01	<0,0001
			nach Intervention	0,94	0,64	<0,0001	5,41	3,27	<0,0001
		Depurdent	vor Intervention	1,67	0,96	<0,0001	8,73	4,7	<0,0001
			nach Intervention	1,53	0,7	<0,0001	8,06	3,6	<0,0001
		Elmex	vor Intervention	1,32	0,73	<0,0001	7,24	4,41	<0,0001
			nach Intervention	1,67	0,96	<0,0001	8,73	4,7	<0,0001
	Signal	vor Intervention	1,14	0,52	<0,0001	5,52	2,6	<0,0001	
		nach Intervention	1,78	1,11	<0,0001	8,12	5	<0,0001	
	poliert	Black is White	vor Intervention	0,97	0,9	<0,0001	4,07	4,87	<0,0001
			nach Intervention	0,07	0,03	<0,0001	1,73	3,82	<0,0001
		Depurdent	vor Intervention	0,11	0,11	<0,0001	1,42	1,84	<0,0001
			nach Intervention	0,09	0,03	<0,0001	1,19	1,22	<0,0001
		Elmex	vor Intervention	0,98	0,67	<0,0001	4,16	3,29	<0,0001
			nach Intervention	0,11	0,11	<0,0001	1,42	1,84	<0,0001
Signal		vor Intervention	0,58	0,33	<0,0001	2,81	1,08	0,0019	
		nach Intervention	0,08	0,04	<0,0001	1,41	3,72	<0,0001	

Tabelle 6 **Ergebnisse der Rauigkeitsmessung von Celtra Duo glasiert und poliert** vor und nach Putzintervention mit den vier Zahnpasten. Angegeben sind die Mittelwerte aus den verwerteten Messungen (9 Proben à 11 Linienpaare, 99 Messlinien) sowie die Standardabweichungen (Std.Abw.). Die Spalte „Shapiro Wilk“ gibt das Ergebnis des Tests auf Normalverteilung an; bei $p < 0.05$ muss wird das Vorliegen einer solchen abgelehnt.

Zahnpaste		Zustand	Ra			Rz			
			Mittel wert	Std. Abw.	Shapiro Wilk	Mittel wert	Std. Abw.	Shapiro Wilk	
Celtra Duo	glasiert	Black is White	vor Intervention	3,45	0,93	<0,0001	17	4,67	0,0002
			nach Intervention	3,45	0,92	<0,0001	16,73	4,28	0,0056
		Depurdent	vor Intervention	3,17	1	0,0311	15,31	4,65	0,5259
			nach Intervention	3,26	1,01	0,3576	15,93	4,89	0,2866
		Elmex	vor Intervention	3,26	1,03	0,3742	15,82	4,84	0,2037
			nach Intervention	3,17	1	0,0311	15,31	4,65	0,5259
	Signal	vor Intervention	4,57	1,57	0,1513	27,4	13,8	<0,0001	
		nach Intervention	3,88	1,31	0,0062	19,52	5,35	0,0484	
	poliert	Black is White	vor Intervention	0,09	0,09	<0,0001	1,11	1,1	<0,0001
			nach Intervention	0,1	0,14	<0,0001	0,75	0,47	<0,0001
Depurdent		vor Intervention	1,68	4,69	<0,0001	4,01	10,22	<0,0001	
		nach Intervention	0,99	2,78	<0,0001	2,43	5,45	<0,0001	
Elmex		vor Intervention	0,11	0,27	<0,0001	1,68	3,64	<0,0001	
		nach Intervention	1,68	4,69	<0,0001	4,01	10,22	<0,0001	
Signal	vor Intervention	0,07	0,03	<0,0001	0,64	0,48	<0,0001		
	nach Intervention	0,1	0,09	<0,0001	1,56	1,26	<0,0001		

3.1.2 Darstellung der Vita Enamic Probenoberflächen (3D)

Bei den Bildern auf den folgenden Seiten, handelt es sich um die dreidimensionale Darstellung der elf zweidimensionalen Perthometerlinien. Die manuelle Einebnung der Probenoberflächen durch einen Stempel führt zur verkippten Darstellung der Profile. Es ist pro Material und Oberflächenspezialisierung exemplarisch ein Bild dargestellt.

Man beachte dabei die unterschiedliche Skalierung (in μm) der Profile.

Ergebnisse

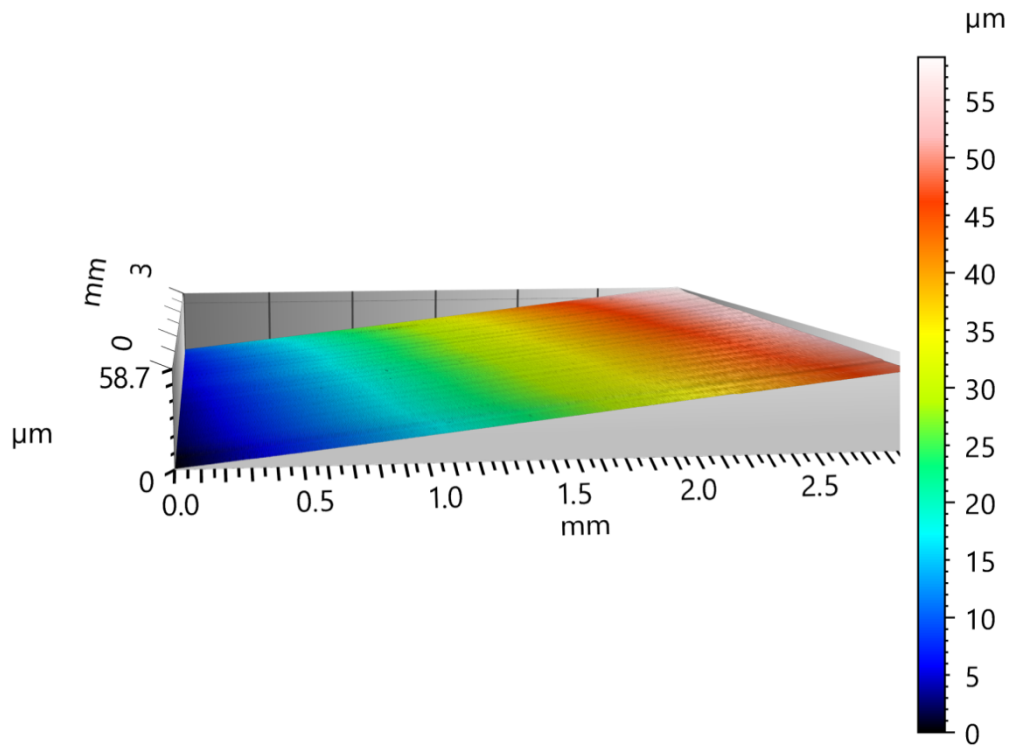


Abbildung 15 Oberflächenprofil des Prüfkörpers V04S.1 Vita Enamic poliert vor Putzintervention mit Signal

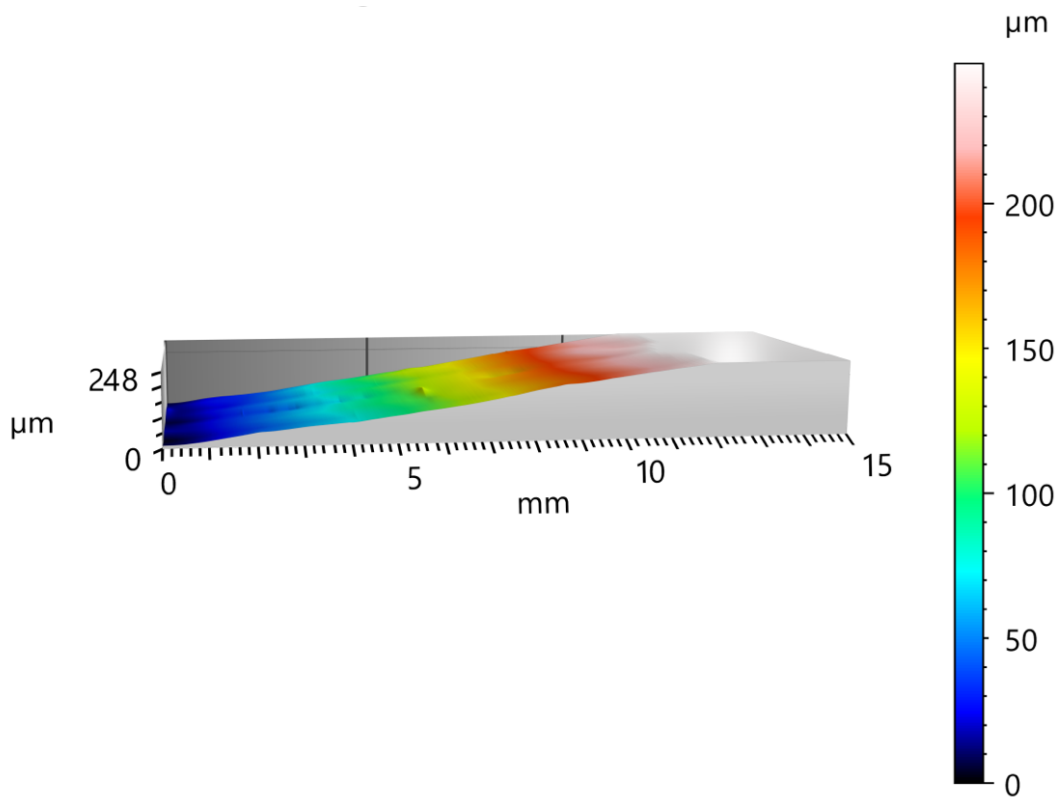


Abbildung 16 Oberflächenprofil des Prüfkörpers V52B.1 Vita Enamic glasiert vor Putzintervention mit Black is White

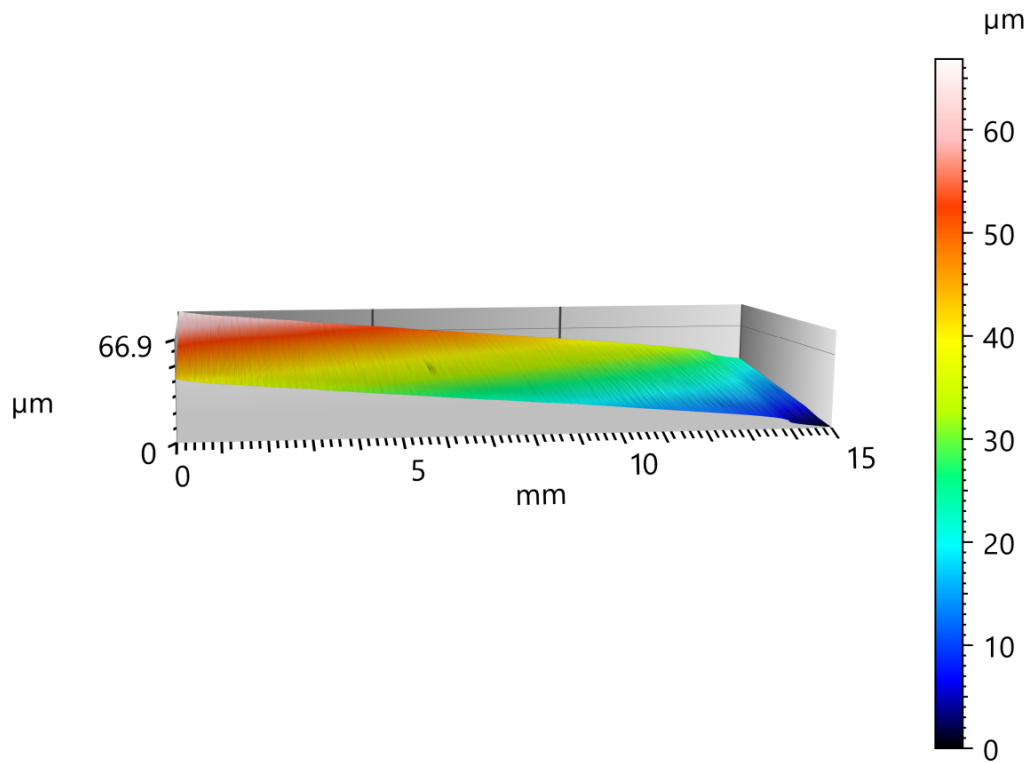


Abbildung 17 Oberflächenprofil des Prüfkörpers C105S.1 Celtra Duo poliert vor Putzintervention mit Signal

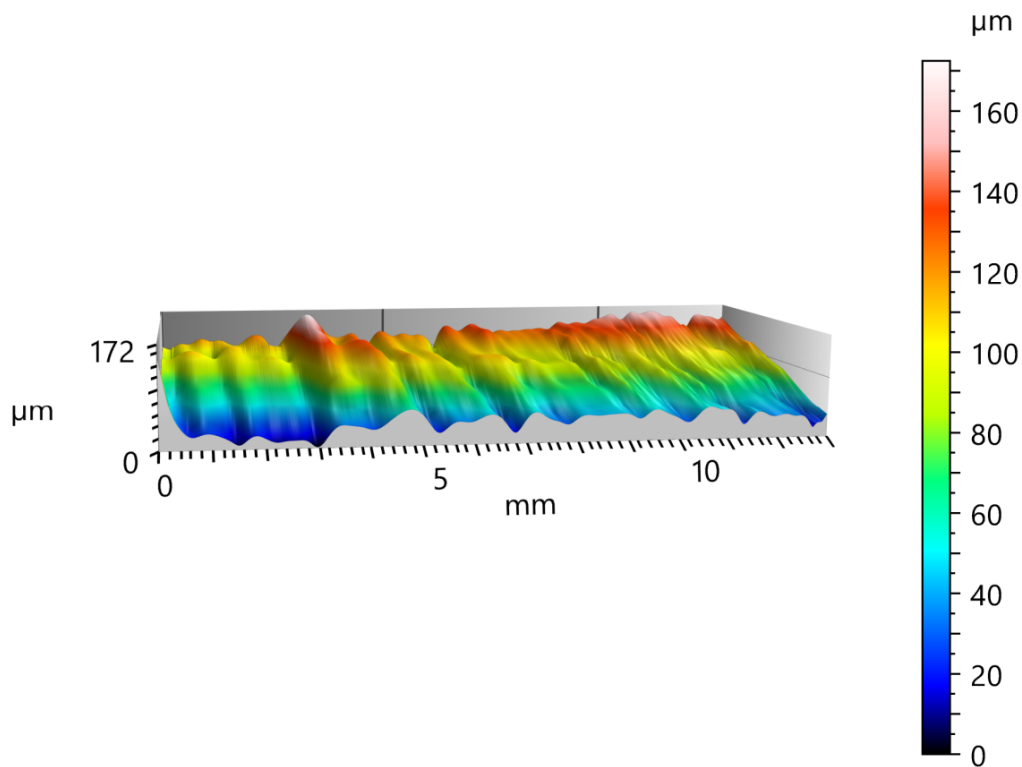


Abbildung 18 Oberflächenprofil des Prüfkörpers C136S.1 Celtra Duo glasiert vor Putzintervention mit Signal

3.1.3 Analyse von Ra bei Vita Enamic vor Intervention

In der folgenden Abbildung von Vita Enamic poliert und glasiert sind die arithmetischen Mittelrauigkeitswerte Ra auf der y-Achse angegeben. Auf der x-Achse sind die Probengruppen bereits der später verwendeten Zahnpasta zugeordnet. Die Proben der Gruppe Depurdent wurden herausgenommen, da diese vorab bereits mit Elmex geputzt wurden und nicht mehr den Ausgangszustand aufweisen.

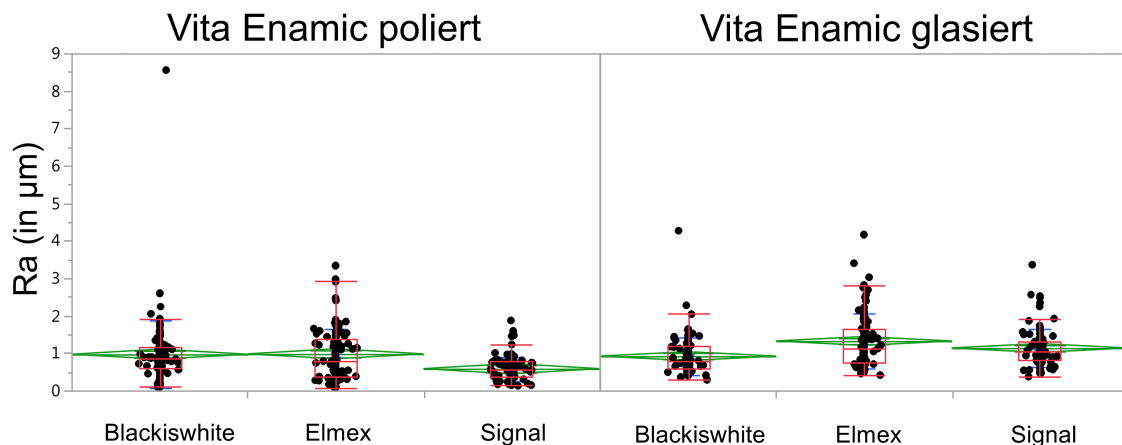


Abbildung 19 Darstellung der arithmetischen Mittelrauigkeitswerte Ra (in μm) von Vita Enamic glasiert und poliert vor Putzintervention in den drei Prüfgruppen der Zahnpasten.

Bei den gepoolten Mittelwerten der arithmetischen Oberflächenrauigkeit Ra ohne Zuordnung zur jeweiligen Zahnpasta-Gruppe besteht ein Unterschied von $0,28 \mu\text{m}$. Die durchschnittlichen Ra-Werte der glasierten Oberflächen von Vita Enamic sind um $+0,28 \mu\text{m}$ größer.

Im Vergleich von poliert und glasiert, unabhängig der zugeordneten Prüfgruppe, besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($p=0,0001$) zwischen poliertem (Mittelwert= $0,85 \mu\text{m}$, $SD= 0,70$) und glasiertem (Mittelwert = $1,13 \mu\text{m}$, $SD=0,62$) Ausgangszustand von Vita Enamic (s. Abbildung 19).

Beim Vergleich der arithmetischen Mittelrauigkeitswert Ra im Ausgangszustand der polierten Vita Enamic Proben zeigt sich ein Unterschied von $0,22 \mu\text{m}$ (MW = $0,55 \mu\text{m}$, $SD = 0,65$ Gruppe Elmex – MW = $0,33 \mu\text{m}$, $SD = 0,35$ Gruppe Signal) bei den für die Prüfgruppen (Zahnpasten) zugeordneten Probekörpern.

Dabei besteht kein statistisch signifikanter Unterschied (Wilcoxon) zwischen den Oberflächen der den Prüfgruppen (Zahnpasten) zugeordneten Materialproben.

Beim Vergleich des arithmetischen Mittelrauhigkeitswertes Ra im Ausgangszustand der glasierten Vita Enamic Proben zeigt sich ein Unterschied von 0,57 µm von Elmex MW = 1,50 µm, SD = 0,87 zu Black is White MW = 0,93 µm, SD = 0,58, bei den für die Prüfgruppen (Zahnpasten) zugeordneten Probekörpern. Dabei besteht kein statistisch signifikanter Unterschied (Wilcoxon) zwischen den Oberflächen der den Prüfgruppen (Zahnpasten) zugeordneten Materialproben.

Werte für die Intervention mit „Elmex“ (Zwischenmessung ohne Depurderent):

Vita Enamic poliert vor Putzintervention	Ra MW 0,85 µm (SD = 0,70)
Vita Enamic glasiert vor Putzintervention	Ra MW 1,13 µm (SD = 0,62)
Vita Enamic poliert vor Black is White	Ra MW 0,52 µm (SD = 0,78)
Vita Enamic poliert vor Elmex	Ra MW 0,55 µm (SD = 0,65)
Vita Enamic poliert vor Signal White now	Ra MW 0,33 µm (SD = 0,35)
Vita Enamic glasiert vor Black is White	Ra MW 0,93 µm (SD = 0,58)
Vita Enamic glasiert vor Elmex	Ra MW 1,50 µm (SD = 0,87)
Vita Enamic glasiert vor Signal White now	Ra MW 1,46 µm (SD = 0,92)

3.1.4 Analyse von Ra bei Vita Enamic nach Intervention

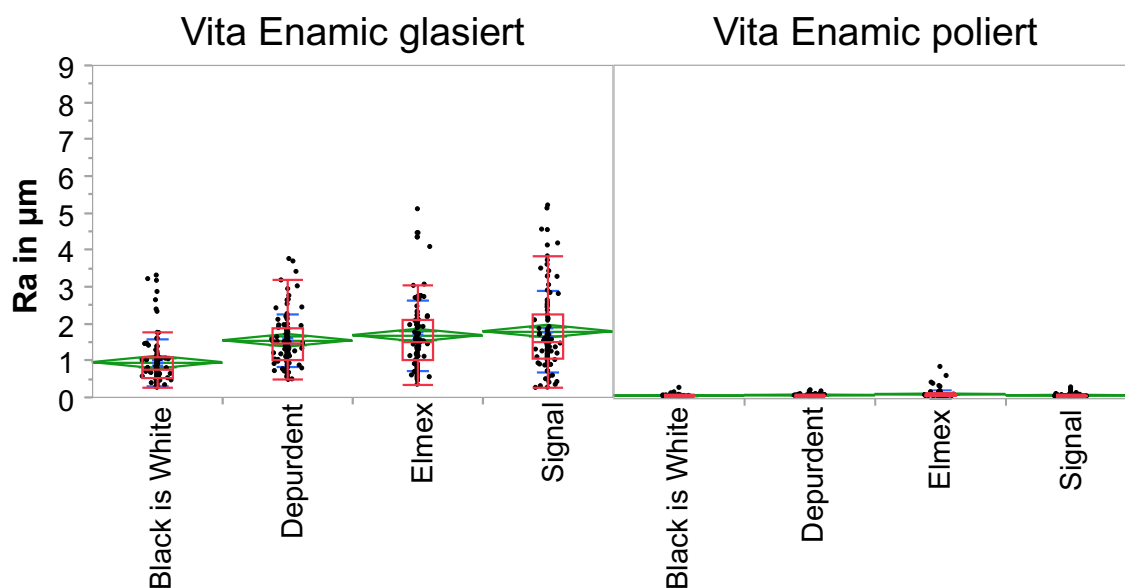


Abbildung 20 Darstellung der Oberflächenrauigkeit von Vita Enamic glasiert und poliert nach Putzintervention durch den arithmetischen Mittelrauigkeitswert Ra (in μm). Auf der x-Achse sind die jeweils verwendeten Zahnpasten der simulierten einjährigen Putzintervention angegeben (Black is White, Signal White now, Elmex und Depurdent).

Die arithmetischen Mittelrauigkeitswerte Ra nach der einjährigen Putzintervention – unabhängig von der verwendeten Zahnpasta - sind bei den glasierten Oberflächen von Vita Enamic mit $\text{MW} = 1,48 \mu\text{m}$ ($\text{SD} = 0,93$) durchschnittlich um $1,39 \mu\text{m}$ höher, als die der polierten Oberflächen mit $\text{MW} = 0,09 \mu\text{m}$ ($\text{SD} = 0,06$) und unterliegen einer um $0,87$ größeren Streuung als die Werte der polierten Oberflächen.

Bei Vita Enamic glasiert beträgt der größte Unterschied von Ra im Mittelwert $0,84 \mu\text{m}$ zwischen Black is White ($\text{MW} = 0,94 \mu\text{m}$, $\text{SD} = 0,64$) und Signal White now ($\text{MW} = 1,78$, $\text{SD} = 1,11$).

Die Streuung der glasierten Gruppe variiert zwischen Signal White now mit $\text{SD} = 1,11$ und Black is White mit $\text{SD} = 0,64$.

Bei Vita Enamic poliert beträgt die größte Differenz zwischen den Mittelwerten von Ra $0,04 \mu\text{m}$ zwischen Elmex ($\text{MW} = 0,11 \mu\text{m}$, $\text{SD} = 0,11$) und Black is White ($\text{MW} = 0,07$, $\text{SD} = 0,03$). Die Streuung der polierten Gruppen nach Putzintervention variiert zwischen $\text{SD} = 0,11$ (Elmex) und $\text{SD} = 0,03$ (Depurdent).

3.1.5 Vergleich von Ra bei Vita Enamic vor und nach Intervention

Im folgenden Abschnitt sind die Mittelwerte von Vita Enamic vor und nach Putzintervention mit Balkendiagrammen angegeben.

Die blauen Balken stellen Mittelwerte (MW) der arithmetischen Rauigkeit Ra in μm vor Putzintervention dar, die roten Balken stellen die entsprechenden Werte nach der Putzintervention dar. Die Konfidenzintervalle sind bei jedem Balken am oberen Ende durch die H-förmige Linie angegeben. Im Text unter der jeweiligen Abbildung sind die Werte aus der Mastertabelle von Vita Enamic (Tabelle 5, S. 46) und die prozentualen Veränderungen angegeben.

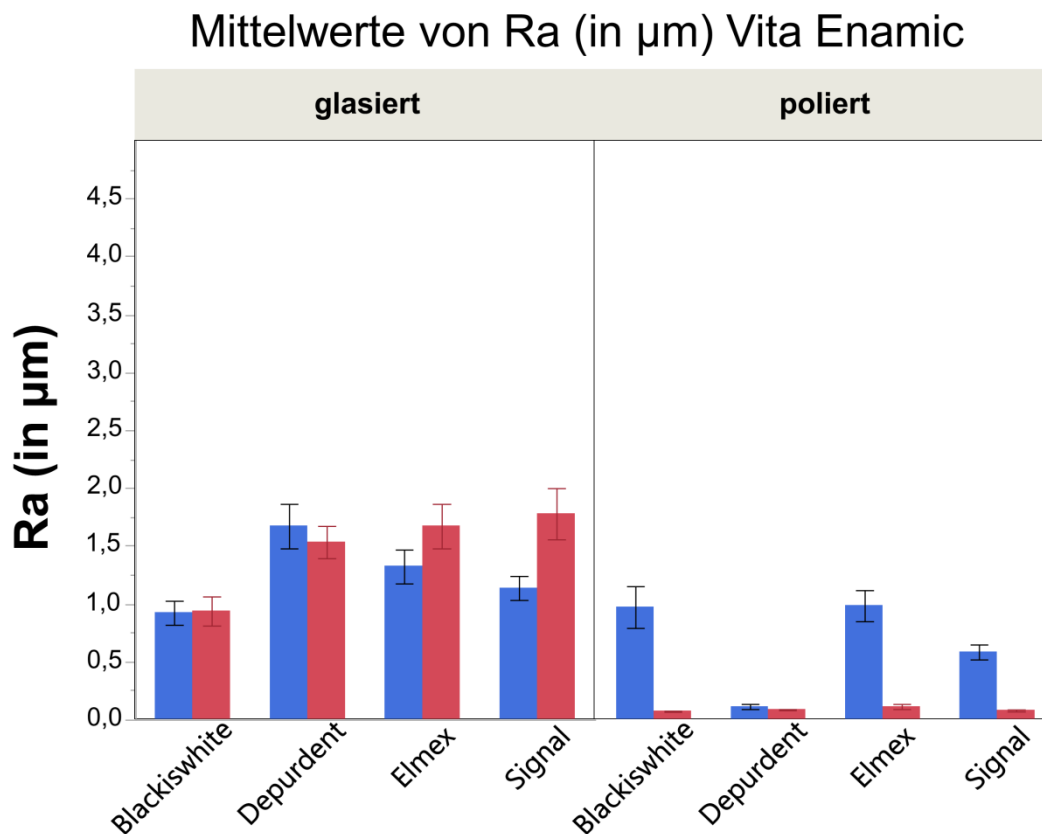


Abbildung 21 **Darstellung der Mittelwerte von Ra (in μm), der Proben Vita Enamic glasiert und poliert je vor (blau, linker Balken) und nach (rot, rechter Balken) Putzintervention. Die Striche geben den Standardfehler des errechneten Mittelwerts an.**

Glasiert

Nach der Putzintervention mit Signal White now ist der arithmetische Rauigkeitsparameter Ra auf glasiertem Vita Enamic von MW = 1,14 μm (SD = 0,52) um +56,14 % auf MW = 1,78 μm (SD = 1,11) erhöht. Die zweitgrößte Veränderung des Rauigkeitsparameters Ra wird auf Vita Enamic glasiert durch Putzintervention mit Elmex von MW = 1,32 μm (SD = 0,73) auf MW = 1,67 μm (SD = 0,96) um +26,52 % hervorgerufen.

Black is White vergrößert Ra von MW = 0,92 μm (SD = 0,52) um 1,09 % auf MW = 0,94 μm (SD = 0,64). Depurdent verringert den Mittelrauigkeitswert Ra von MW = 1,67 μm (SD = 0,96) auf glasiertem Vita Enamic um -8,38 % auf MW = 1,53 μm (SD = 0,7).

Nach der Putzintervention liegen die durchschnittlichen arithmetischen Rauigkeitsparameter Ra zwischen MW 0,94 μm (Black is White SD = 0,64) und MW 1,78 (Signal; SD = 1,11).

Poliert

Die größte Abnahme der Oberflächenrauigkeit von Ra auf poliertem Vita Enamic resultiert durch die Zahnpasta Black is White mit - 92,78% von 0,97 μm (SD = 0,9) auf 0,07 μm (SD = 0,03) und Elmex mit einer Abnahme um 88,78% von MW 0,98 μm (SD = 0,67) auf 0,11 μm (SD = 0,11).

Depurdent verändert Ra auf poliertem Vita Enamic von 0,11 μm (SD = 0,11) vor der Putzintervention um -27,27% auf 0,09 μm (SD = 0,03).

Die Zahnpasta Signal White now ruft auf poliertem Vita Enamic mit -87,93 % von MW 0,58 μm (SD = 0,33) auf MW 0,08 μm (SD = 0,04) den drittgrößten Abtrag von Ra hervor.

Nach der Putzintervention liegen die durchschnittlichen Ra-Werte aller Gruppen zwischen MW = 0,07 μm SD = 0,03 (Black is White) und MW = 0,11 μm SD = 0,27 (Elmex).

3.1.6 Vergleich von Rz bei Vita Enamic vor und nach Intervention

Im folgenden Abschnitt sind die Mittelwerte der Materialien vor und nach Putzintervention mit Balkendiagrammen angegeben.

Die blauen Balken stellen die Mittelwerte (MW) der gemittelten Rautiefe Rz in μm vor Putzintervention dar. Die roten Balken stellen die entsprechenden Werte nach der Putzintervention dar. Die Konfidenzintervalle sind bei jedem Balken am oberen Ende durch die H-förmige Linie angegeben. Im Text unter der jeweiligen Abbildung sind die Werte aus der Mastertabelle von Vita Enamic (Tabelle 5, S. 46) und die prozentualen Veränderungen angegeben.

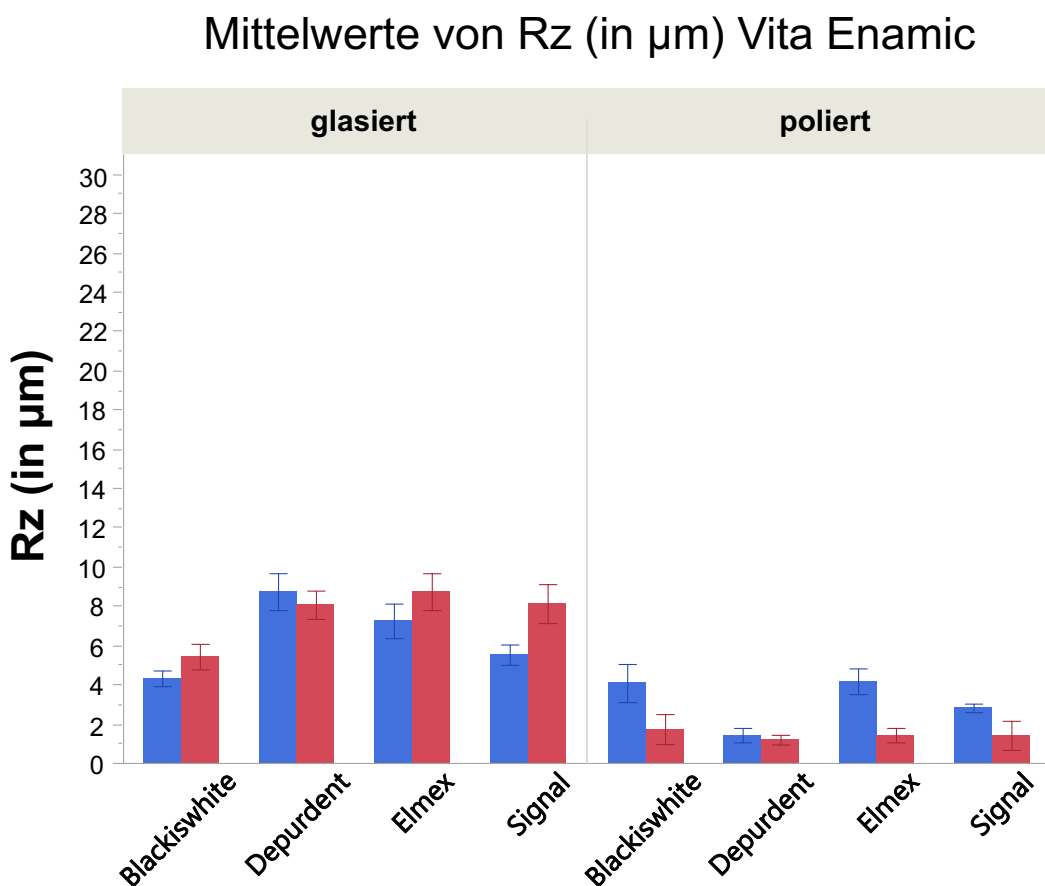


Abbildung 22 **Darstellung der Mittelwerte von Rz in μm , der Proben Vita Enamic glasiert und poliert je vor (blau, linker Balken) und nach (rot, rechter Balken) Putzintervention.**

Glasiert

Nach der Putzintervention mit Signal White now ist der Rauigkeitsparameter Rz von MW = 5,52 μm (SD = 2,60) mit +47,10 % auf MW = 8,12 μm (SD = 5) am deutlichsten erhöht. Die zweitgrößte Veränderung des Rauigkeitsparameters Rz auf Vita Enamic glasiert wird durch Putzintervention mit Elmex von MW = 7,24 μm (SD = 4,41) auf 8,73 μm (SD = 4,7) um +20,58 % hervorgerufen. Black is White vergrößert Rz von MW = 4,31 μm (SD = 2,01) um +25,52 % auf MW = 5,41 μm (SD = 3,27).

Depurdent verringert Rz von MW = 8,73 μm (SD = 4,70) um -7,67 % auf MW = 8,06 μm (SD = 3,6).

Poliert

Elmex verursacht auf Vita Enamic poliert die größte Abnahme des Parameters Rz von MW = 4,16 μm (SD = 3,29) auf 1,42 μm (SD = 1,84) um -65,87 %. Die Zahnpasta Signal White Now verringert Rz von MW = 2,81 μm (SD = 1,08) um -49,82 % auf MW 1,41 μm (SD = 3,72). Black is White reduziert Rz von MW = 4,07 μm (SD = 4,87) um 57,49 % auf 1,73 μm (SD = 3,82). Depurdent verringert Rz von MW 1,42 μm (SD = 1,84) auf MW 1,19 μm (SD = 1,22) um -16,20 % am wenigsten.

3.1.7 Analyse von Ra bei Celtra Duo vor Intervention

Bei den gepoolten Mittelwerten der arithmetischen Oberflächenrauigkeit Ra ohne Zuordnung zur jeweiligen Zahnpasta-Gruppe besteht ein Unterschied von 3,63 μm . Die durchschnittlichen Ra-Werte der glasierten Oberflächen von Celtra Duo sind mittelwertig +3,63 μm größer als die der polierten Oberflächen von Celtra Duo. Im Vergleich von poliert und glasiert, unabhängig der zugeordneten Prüfgruppe, besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($p=0,0001$) zwischen poliertem (Mittelwert= 0,09, SD=0,16) und glasiertem (Mittelwert= 3,72 μm , SD= 1,32) Ausgangszustand von Celtra Duo (s. Abbildung 23).

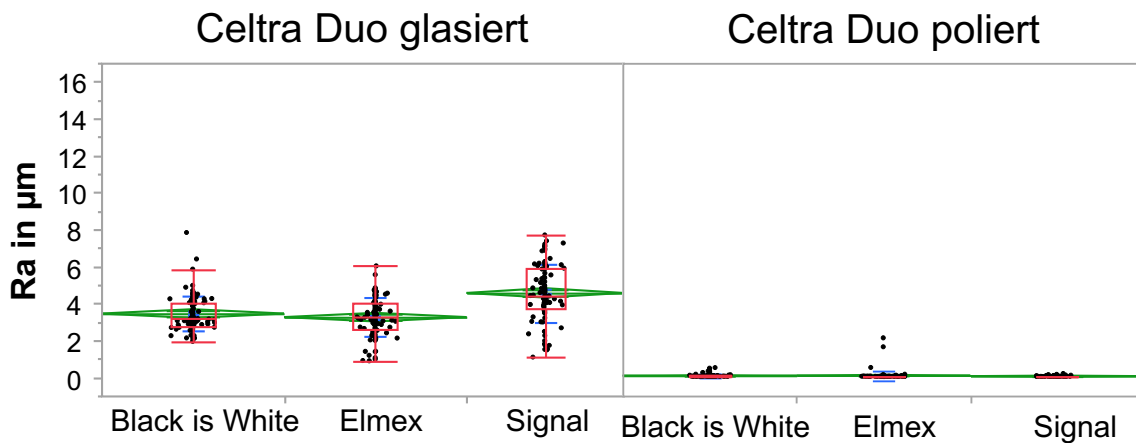


Abbildung 23 Darstellung des arithmetischen Mittelrauigkeitswert Ra-Werte von Celtra Duo glasiert und poliert im Vergleich vor Putzintervention mit der jeweiligen Zahnpasta. Die Angabe der Zahnpasta an der X-Achse ist durch die bereits vorsortierten Proben gegeben. Auf der y-Achse ist der arithmetische Mittelrauigkeitswert Ra in μm angegeben.

Beim Vergleich der arithmetischen Mittelrauigkeitswerte Ra im Ausgangszustand der polierten Celtra Duo Proben zeigt sich ein Unterschied von $0,80 \mu\text{m}$ (Ra MW $0,89 \mu\text{m}$ (Gruppe Elmex), $0,09 \mu\text{m}$ (Gruppe Signal und Black is White)) bei den für die den Prüfgruppen (Zahnpasten) zugeordneten Probekörpern. Dabei besteht kein statistisch signifikanter Unterschied (Wilcoxon) zwischen den Oberflächen der den Prüfgruppen zugeordneten Materialproben.

Beim Vergleich der arithmetischen Mittelrauigkeitswert Ra im Ausgangszustand der glasierten Celtra Duo Proben zeigt sich ein Unterschied von $0,98 \mu\text{m}$ (Ra MW $4,20 \mu\text{m}$ (Gruppe Signal), $3,22 \mu\text{m}$ (Elmex)) bei den für die den Prüfgruppen (Zahnpasten) zugeordneten Probekörpern. Dabei besteht kein statistisch signifikanter Unterschied (Wilcoxon) zwischen den Oberflächen der den Prüfgruppen zugeordneten Materialproben.

Celtra Duo poliert vor Intervention	Ra MW 0,09 μm (SD = 0,16)
Celtra Duo glasiert vor Intervention	Ra MW 3,72 μm (SD = 1,32)
Celtra Duo poliert vor Black is White	Ra MW 0,09 μm (SD = 0,12)
Celtra Duo poliert vor Elmex	Ra MW 0,89 μm (SD = 3,40)
Celtra Duo poliert vor Signal	Ra MW 0,09 μm (SD = 0,07)
Celtra Duo glasiert vor Black is White	Ra MW 3,45 μm (SD = 0,92)
Celtra Duo glasiert vor Elmex	Ra MW 3,22 μm (SD = 1,02)
Celtra Duo glasiert vor Signal	Ra MW 4,20 μm (SD = 1,48)

3.1.8 Analyse von Ra bei Celtra Duo nach Intervention

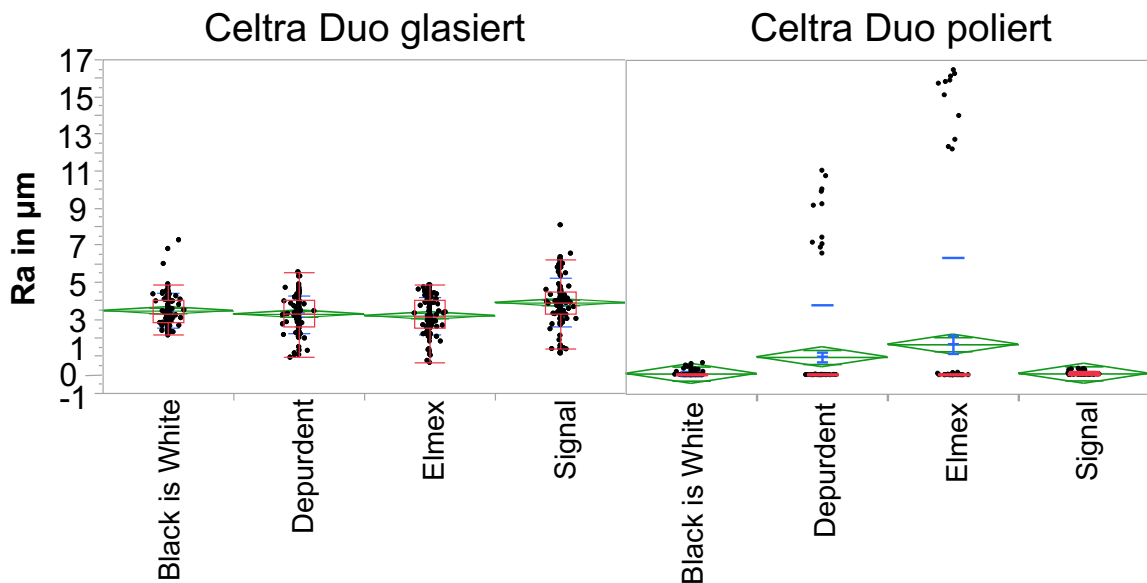


Abbildung 24 Darstellung der Rauigkeit durch den Ra Wert auf der y-Achse (gemessen in μm) von Celtra Duo nach der simulierten einjährigen Putzintervention mit der jeweiligen Zahnpasta auf der x-Achse (Black is White, Signal White now, Elmex und Depurdent).

Der Oberflächenrauigkeitsparameter Ra der glasierten Oberflächen von Celtra Duo 3,44 μm (SD = 1,10) (linke Seite der Abbildung 24) ist nach der simulierten Putzintervention mit allen verwendeten Zahnpasten um 2,72 μm höher als der durchschnittliche Ra-Wert der polierten Oberflächen mit 0,72 μm (SD = 2,80) .

Ergebnisse

Die Ra-Werte der glasierten Proben von Celtra Duo unterliegen einer um 1,70 größeren Streuung.

Celtra Duo glasiert nach Black is White	Ra MW 3,45 μm , SD =0,92
Celtra Duo glasiert nach Depurdent	Ra MW 3,26 μm , SD =1,01
Celtra Duo glasiert nach Elmex	Ra MW 3,17 μm , SD = 1,00
Celtra Duo glasiert nach Signal	Ra MW 3,88 μm , SD = 1,31
Celtra Duo poliert nach Black is White	Ra MW 0,10 μm , SD = 0,14
Celtra Duo poliert nach Depurdent	Ra MW 0,99 μm , SD = 2,78
Celtra Duo poliert nach Elmex	Ra MW 1,68 μm , SD = 4,69
Celtra Duo poliert nach Signal	Ra MW 0,10 μm , SD = 0,09

Aufgrund des Ausreißers der Probe C115D nach Putzintervention mit Elmex und Depurdent liegen die Mittelwerte von Ra nach der entsprechenden Putzintervention um +1,58 μm (Elmex MW = 1,68 μm , SD = 4,69) und +0,89 μm (Depurdent MW = 0,99 μm , SD = 2,78) höher als die Werte nach Signal (Ra MW = 0,10 μm , SD = 0,09) und Black is White (Ra MW = 0,10 μm , SD = 0,14). Auch die Streuung ist bei den Gruppen Elmex und Depurdent durch die erhöhte Standardabweichung um mindestens 2,64 (Depurdent SD = 2,78 zu Black is White SD = 0,14) bis 4,87 (Elmex SD = 4,69 zu Signal SD = 0,09) höher.

Es folgt die Darstellung der Proben Celtra Duo poliert und glasiert vor und nach Putzintervention mit Depurdent.

Die Probe C115D vor und nach Putzintervention zeigt einen deutlichen Unterschied in den Ra-Werten zu den weiteren Proben der Prüfgruppe.

Die Probe wird in der Diskussion auf Seite 126 genauer besprochen.

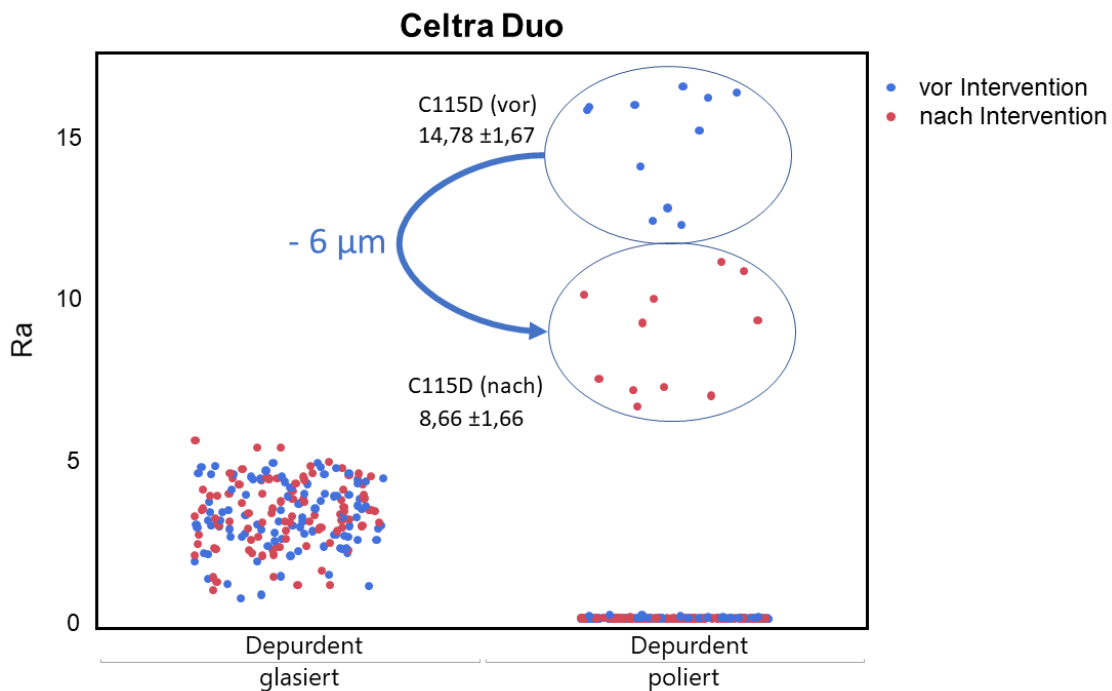


Abbildung 25 Darstellung der Rauigkeitswerte von Celtra Duo poliert und glasiert mit Depurderent durch Ra in μm auf der y-Achse. Die Werte sind vor der Putzintervention in blau und nach der Putzintervention in Rot dargestellt. Die durchschnittlichen Werte sowie die dazugehörige Standardabweichung sind in der Abbildung neben den eingekreisten Punkten der Probe 115 D angegeben.

Die Werte der Probe Celtra Duo poliert C115D unterscheidet sich deutlich von den Werten den restlichen Proben. Der vor der Putzintervention hohe Ra-Wert von $MW = 14,78 \mu\text{m}$ ($SD = 1,67$) wird um durchschnittlich $6 \mu\text{m}$ auf $MW = 8,66 \mu\text{m}$ ($SD = 1,66$) reduziert. Die Probe ist nach der Putzintervention glatter als vor der Putzintervention. Die Standardabweichung bleibt bis auf $0,01$ gleich.

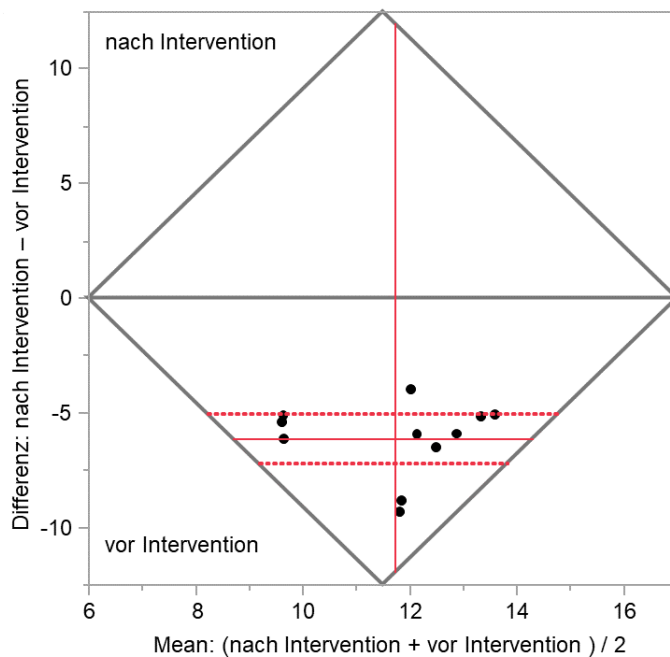


Abbildung 26 Darstellung der Probe C115 D (Celtra Duo poliert) vor und nach Putzintervention mit Depurident mittels Matched-pairs Analyse.

Ra Mittelwert (nach Intervention)	8,6	t-Ratio	-12,6363
Ra Mittelwert (vor Intervention)	14,8	DF	10
Mittelwert Differenz	-6,1225	Prob > t	<,0001*
Standardfehler	0,48451	Prob > t	1,0000
oberes 95% Konfidenzintervall	-5,0429		
unteres 95% Konfidenzintervall	-7,2021		
N Linienpaare	11	Korrelationskoeffizient	0,5355

3.1.9 Vergleich von Ra bei Celtra Duo vor und nach Intervention

Im folgenden Abschnitt sind die Mittelwerte der Materialien vor und nach Putzintervention mit Balkendiagrammen angegeben.

Die blauen Balken stellen die Mittelwerte (MW) der arithmetischen Mittelrauigkeit Ra in μm vor Putzintervention dar. Die roten Balken stellen die entsprechenden Werte nach der Putzintervention dar. Die Konfidenzintervalle sind bei jedem Balken am oberen Ende durch die H-förmige Linie angegeben. Im Text unter der jeweiligen Abbildung sind die Werte aus der Mastertabelle von Celtra Duo (S. 47) und die prozentualen Veränderungen angegeben.

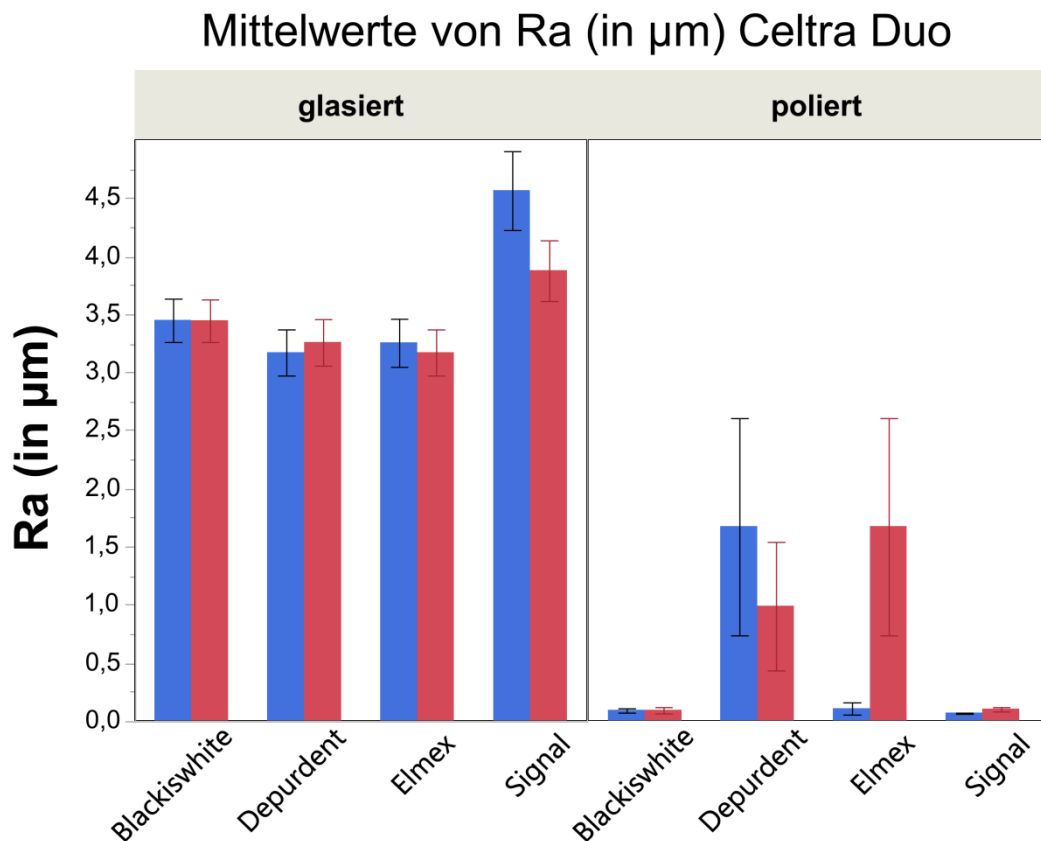


Abbildung 27 Darstellung der Mittelwerte von Ra in μm , der Proben Celtra Duo glasiert und poliert durch ein Balkendiagramm je vor (blau, linker Balken) und nach (rot, rechter Balken) Putzintervention.

Glasiert

Die größte Abnahme von Ra auf glasiertem Celtra Duo wird durch Putzintervention mit Signal von MW = 4,57 μm (SD = 1,57) um - 14,22 % auf MW = 3,88 μm (SD = 1,31) hervorgerufen.

Bei den glasierten Celtra Duo Proben wird der Oberflächenparameter Ra nur durch Putzintervention mit Depurdent von MW = 3,17 μm (SD = 1,00) um +2,84 % auf MW = 3,26 μm (SD = 1,01) erhöht.

Durch Putzintervention mit Black is White bleibt Ra im Mittelwert unverändert auf MW = 3,45 μm (SD_{Diff} = 0,01).

Elmex verringert Ra nach der simulierten einjährigen Putzintervention von MW = 3,26 μm (SD = 1,03) um - 2,76 % auf MW = 3,17 μm (SD = 1,00).

Die durchschnittlichen Ra-Werte der glasierten Celtra Duo Proben liegen zwischen $MW = 3,17 \mu\text{m}$ ($SD = 1,00$) nach Putzintervention mit Elmex und bei $MW = 3,88 \mu\text{m}$ ($SD = 1,31$) nach Putzintervention mit Signal.

Poliert

Nach der Putzintervention mit Elmex ist der mittelwertige Ra von $MW = 0,11 \mu\text{m}$ ($SD = 0,27$) um +1427,27 % auf $MW = 1,68 \mu\text{m}$ ($SD = 4,69$) am deutlichsten erhöht. Nach Putzintervention mit Elmex wurde der Ra von $MW = 1,68 \mu\text{m}$ ($SD = 4,69$) durch Depurdent um -40,48 % auf durchschnittlich $0,99 \mu\text{m}$ ($SD = 2,78$) verringert.

Signal erhöht den arithmetischen Rauigkeitsparameter von $MW = 0,07 \mu\text{m}$ ($SD = 0,03$) um +42,86 % auf $MW = 0,1 \mu\text{m}$ ($SD = 0,09$).

Der Ra-Wert wird durch Black is White von $MW = 0,09 \mu\text{m}$ ($SD = 0,09$) auf $MW = 0,10 \mu\text{m}$ ($SD = 0,14$) kaum verändert.

Die Ra-Werte nach der einjährigen simulierten Putzintervention liegen zwischen $MW = 0,10 \mu\text{m}$ (Black is White $SD = 0,14$, Signal $SD = 0,09$) und $MW = 1,68 \mu\text{m}$ (Elmex $SD = 4,69$).

Da die Rauigkeitsparameter vor der Putzintervention sehr gering sind, bedeutet eine geringe Veränderung der Oberflächenrauigkeit im μm -Bereich bereits eine große prozentuale Veränderung.

3.1.10 Vergleich von Rz bei Celtra Duo vor und nach Intervention

Im folgenden Abschnitt sind die Mittelwerte der Materialien vor und nach Putzintervention mit Balkendiagrammen angegeben.

Die blauen Balken stellen die Mittelwerte (MW) der gemittelten Rautiefe Rz in μm vor Putzintervention dar. Die roten Balken stellen die entsprechenden Werte nach der Putzintervention dar. Die Konfidenzintervalle sind bei jedem Balken am oberen Ende durch die H-förmige Linie angegeben. Im Text unter der jeweiligen Abbildung sind die Werte aus der Mastertabelle von Celtra Duo (Tabelle 6, S. 47) und die prozentualen Veränderungen angegeben.

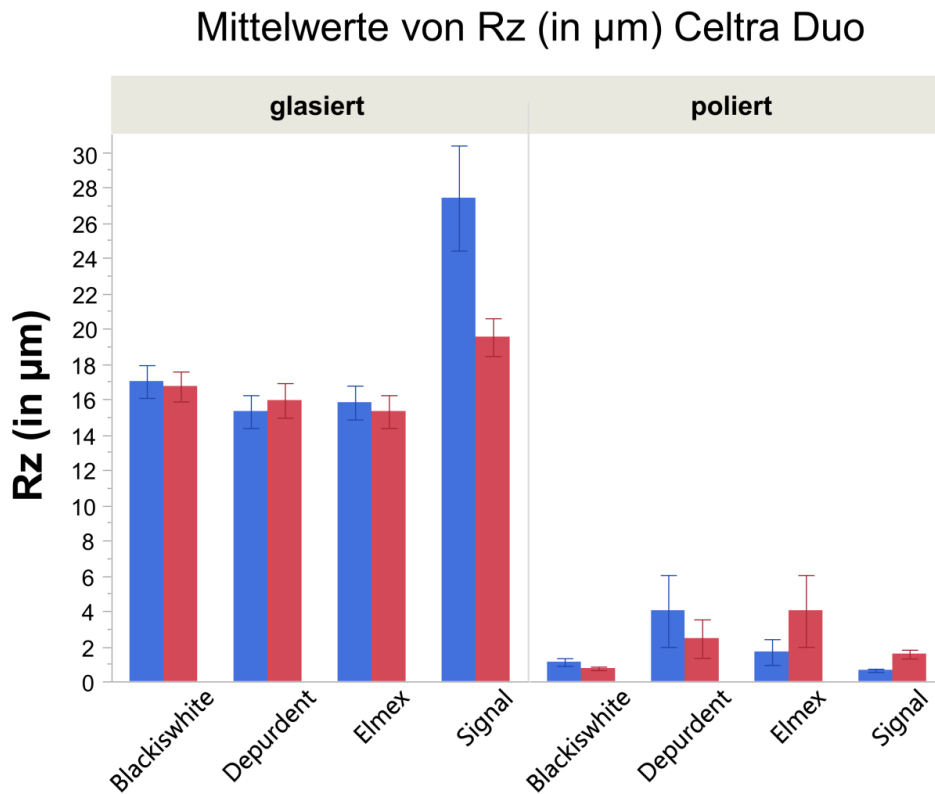


Abbildung 28 **Darstellung der Mittelwerte von Rz in μm , der Proben Celtra Duo glasiert und poliert** je vor (blau, linker Balken) und nach (rot, rechter Balken) Putzintervention.

Glasiert

Rz auf Celtra Duo glasiert wird durch Depurdent von MW = 15,31 μm (SD = 4,65) um +4,05% auf MW = 15,93 μm (SD = 4,89) erhöht.

Rz ist nach Putzintervention mit Black is White von MW = 17 μm (SD = 4,67) auf MW = 16,73 μm (SD = 4,28) um -1,65 % leicht verringert.

Elmex verringert Rz von MW = 15,82 μm (SD = 4,84) um -3,22 % auf MW = 15,31 μm (SD = 4,65).

Die deutlichste Veränderung von Rz auf glasiertem Celtra Duo wird durch Signal mit einer Reduktion von -27,41 % von MW = 27,4 μm (SD = 13,8) auf MW = 19,52 μm (SD = 5,35).

Poliert

Nach der Putzintervention mit Elmex ist der Oberflächenparameter Rz um +139,29 % von MW = 1,68 μm (SD = 3,64) auf MW = 4,01 μm (SD = 10,22) erhöht.

Signal erhöht den arithmetischen Rauigkeitsparameter Rz mit +143,75 % von MW = 0,64 μm (SD = 0,48) auf MW = 1,56 μm (SD = 1,26).

Durch Putzintervention mit Black is White nimmt die gemittelte Rz von MW = 1,11 μm (SD = 1,10) um - 32,43 % auf MW = 0,75 μm (SD = 0,47) ab.

Depurderent verringert Rz von MW = 4,01 μm (SD = 10,22) um -39,40 % auf MW = 2,43 μm (SD = 5,45).

3.1.11 Vergleich von Ra vor und nach Putzintervention von Vita Enamic glasiert und poliert

In der folgenden Abbildung wird die arithmetische Mittelrauigkeit Ra der mittels Politur und Glasur vergüteten Oberflächen von Vita Enamic vor Putzinterventionen im Vergleich zu nach den Putzinterventionen verglichen. Die entsprechenden Mittelwerte MW in μm finden sich im Text darunter.

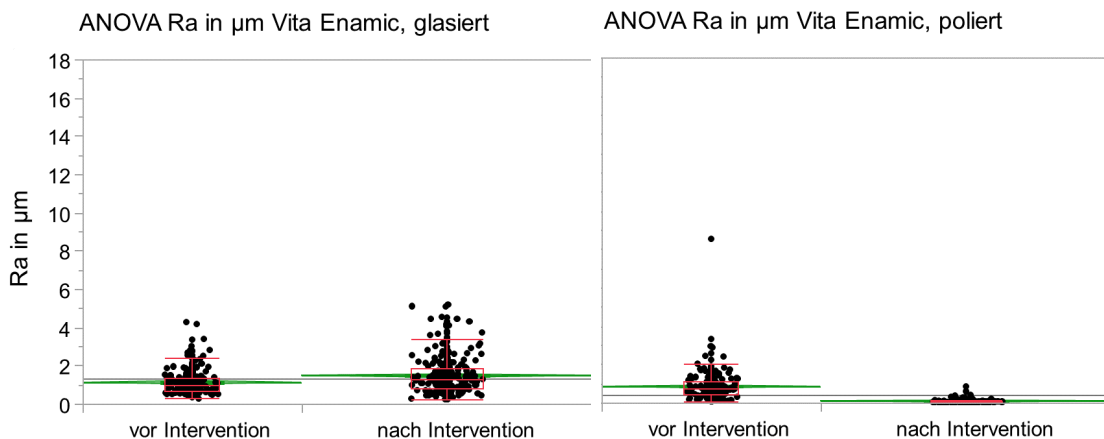


Abbildung 29 Darstellung der Rauigkeitsparameter Ra in μm der Oberflächen von Vita Enamic vor und nach Putzintervention im Vergleich. Der Vergleich erfolgt ohne die Berücksichtigung der verwendeten Zahnpasten. Auf der y-Achse sind die arithmetischen Mittelrauigkeitswerte Ra in μm abgebildet. Der Zustand vor und nach der Putzintervention ist auf der x-Achse ablesbar.

Vor der Putzintervention liegt der arithmetische Mittelrauwert bei Vita Enamic glasiert (ohne die bereits mit Elmex geputzten Depurderent-Proben) bei MW = 1,13 μm (SD = 0,62). Nach den Putzinterventionen liegen die Werte bei MW = 1,48 μm (SD = 0,93). Vor der Putzintervention liegt der arithmetische Mittelrauwert Ra bei poliertem Vita Enamic (ohne die bereits mit Elmex

geputzten Depurderent-Proben) bei $MW = 0,85 \mu\text{m}$ ($SD = 0,70$). Nach den Putzinterventionen liegen die Werte bei $MW = 0,09 \mu\text{m}$ ($SD = 0,06$).

3.1.12 Vergleich von Ra vor und nach Putzintervention von Celtra Duo poliert und glasiert.

In der folgenden Abbildung wird die arithmetische Mittelrauigkeit Ra der mittels Glasur und Politur vergüteten Oberflächen von Celtra Duo vor Putzinterventionen im Vergleich zu nach den Putzinterventionen verglichen. Die entsprechenden Mittelwerte MW in μm finden sich im Text darunter.

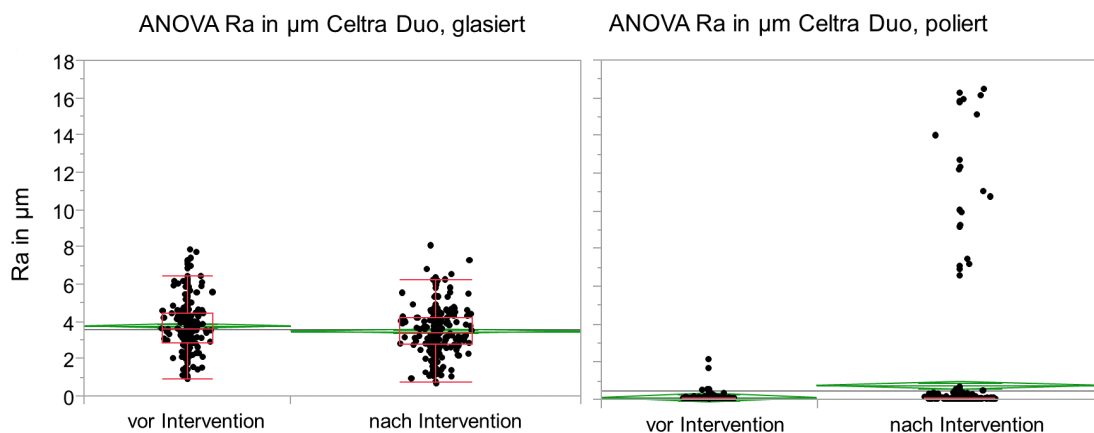


Abbildung 30 Darstellung der Rauigkeitsparameter Ra in μm der Oberflächen vor und nach Putzintervention von Celtra Duo im Vergleich. Der Vergleich erfolgt ohne die Berücksichtigung der verwendeten Zahnpasten. Auf der y-Achse sind die arithmetischen Mittelrauigkeitswerte Ra in μm abgebildet. Der Zustand vor und nach der Putzintervention ist im direkten Vergleich auf der x-Achse ablesbar.

Bei den Proben von Celtra Duo glasiert liegen die Werte Ra vor der Putzintervention bei $MW = 3,72 \mu\text{m}$ ($SD = 1,31$). Nach der simulierten Putzintervention ist der arithmetische Mittelrauigkeitswert Ra auf $MW = 3,44 \mu\text{m}$ ($SD = 1,10$) gesunken. Bei den Proben von Celtra Duo poliert liegen die Werte Ra vor der Putzintervention bei $MW = 0,09 \mu\text{m}$ ($SD = 0,16$). Nach der simulierten Putzintervention ist der arithmetische Mittelrauigkeitswert Ra auf $MW = 0,72 \mu\text{m}$ ($SD = 2,80$) gestiegen. Die weiterführende Analyse der Differenzen findet sich im folgenden Kapitel 3.2 ab Seite 68.

3.2 Vergleich zwischen den Materialien und Interventionen

In der u.a.

Tabelle 7 und Tabelle 8 sind die mittelwertigen Veränderungen (in μm) nach der Putzintervention im Vergleich zum Ausgangszustand wiedergegeben. Bei einem positiven Wert ist der jeweilige Rauigkeitsparameter erhöht worden. Die positiven Werte sind grau hinterlegt.

Bei einem negativen Wert ist der entsprechende Rauigkeitsparameter im Mittel verringert worden.

Tabelle 7 mittelwertige Veränderungen der Rauigkeitsparameter Ra und Rz der Vita Enamic-Proben. Bei negativen Werten ist der Rauigkeitsparameter nach der Putzintervention niedriger. Bei positiven Werten (grau hinterlegt) ist der entsprechende Rauigkeitsparameter nach der Putzintervention erhöht.

Vita Enamic								
glasiert					poliert			
Zahnpasta	Black is White	Signal	Elmex	Depurderent	Black is White	Signal	Elmex	Depurderent
Ra	+ 0,02 μm	+ 0,64 μm	+ 0,35 μm	- 0,14 μm	- 0,90 μm	- 0,5 μm	- 0,87 μm	- 0,02 μm
Rz	+ 1,10 μm	+ 2,60 μm	+ 1,49 μm	- 0,67 μm	- 2,34 μm	- 1,40 μm	- 2,74 μm	- 0,23 μm

Tabelle 8 Darstellung der mittelwertigen Veränderungen der Rauigkeitsparameter Ra und Rz der Celtra Duo-Proben. Bei negativen Werten ist der Rauigkeitsparameter nach der Putzintervention niedriger. Bei positiven Werten (grau hinterlegt) ist der entsprechende Rauigkeitsparameter nach der Putzintervention erhöht.

Celtra Duo								
glasiert					poliert			
Zahnpaste	Black is White	Signal	Elmex	Depurdent	Black is White	Signal	Elmex	Depurdent
Ra	0 μm	- 0,69 μm	- 0,09 μm	+ 0,09 μm	+ 0,01 μm	+ 0,03 μm	+ 1,57 μm	- 0,69 μm
Rz	- 0,27 μm	- 7,88 μm	- 0,51 μm	+ 0,62 μm	- 0,36 μm	+ 0,92 μm	+ 2,33 μm	- 1,58 μm

3.2.1 Statistischer Vergleich der Rauigkeitsparameter der Materialien vor Intervention

In der folgenden Tabelle wurden die Werte (Ra und Rz) der Vita Enamic-Proben (glasiert zu poliert) und Celtra Duo-Proben (glasiert und poliert) vor der Putzintervention durch den Wilcoxon-Test verglichen. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um das Ergebnis des Tests auf Basis der p-Werte. Bei einem p-Wert $>0,05$ unterscheiden sich die Werte der Probenoberfläche nicht signifikant von glasiert zu poliert.

Ergebnisse

Tabelle 9 Ergebnis des Wilcoxon Tests zum Vergleich der Rauigkeitsparameter der Oberflächen vor Putzintervention.

Material		Ra	Rz
Enamic	glasiert - poliert	<0,0001*	<0,0001*
Celtra Duo	glasiert - poliert	<0,0001*	<0,0001*

3.2.2 Vergleich der Rauigkeitsparameter vor und nach Intervention in Abhängigkeit der Zahnpasta

Tabelle 10 Ergebnisse des Wilcoxon Tests über den Vergleich der Rauigkeitsverteilungen bei der Gruppe Vita Enamic. Es werden die p-Werte des Vergleichs der Rauigkeitsparameter Ra und Rz vor und nach Intervention in Abhängigkeit der Zahnpasten und Oberflächenspezialisierung angegeben.

VITA ENAMIC				
Poliert			Glasiert	
	Ra	Rz	Ra	Rz
Black is White	<0,0001 *	<0,0001*	0,8403	0,3651
Depurdent	0,9664	0,9357	0,8225	0,8921
Elmex	<0,0001*	<0,0001*	0,2172	0,3090
Signal	<0,0001*	<0,0001*	0,7159	0,9492

Ergebnisse

Tabelle 11 Ergebnisse des Wilcoxon Tests über den Vergleich der Rauigkeitsverteilungen bei der Gruppe Celtra Duo. Es werden die p-Werte des Vergleichs der Rauigkeitsparameter Ra und Rz vor und nach Intervention in Abhängigkeit der Zahnpasten und Oberflächenspezialisierung angegeben.

Celtra Duo				
Poliert			Glasiert	
	Ra	Rz	Ra	Rz
Black is White	<0,0001*	0,0120*	1,0000	0,7622
Depurdent	0,1488	0,0163*	0,5700	0,3446
Elmex	<0,0001*	<0,0001*	0,5550	0,3549
Signal	0,7117	<0,0001*	<0,0001*	<0,0001*

3.2.3 statistische Untersuchung der Differenzen von Ra vor und nach der Intervention

In den folgenden vier kombinierten Abbildungen sind die Differenzen der vier verwendeten Materialproben durch Putzintervention mit den vier Zahnpasten abgebildet.

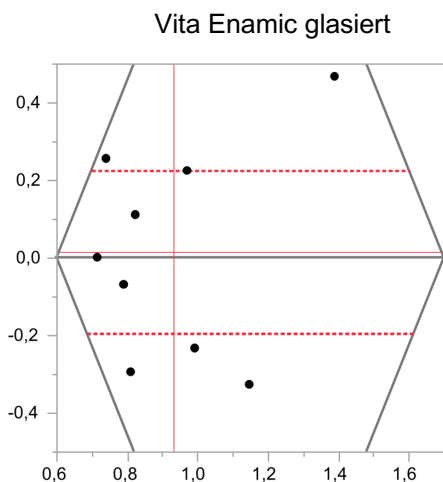
- Black is White in Tabelle 12 auf Seite 73.
- Elmex in Tabelle 13 auf Seite 74.
- Depurdent in Tabelle 14 auf Seite 75.
- Signal in
- Tabelle 15 auf Seite 76.

Die Abbildungen stellen die Differenzen in einem Koordinatensystem wie folgt dar: Aufgetragen sind jeweils auf der X-Achse die Mittelwerte der Differenzen und auf der Y-Achse die Abweichung des Differenzpaares vom gemeinsamen Mittelwert (vertikale Linie). Die horizontalen Linien geben die durchschnittliche Differenz und deren Konfidenzintervall an.

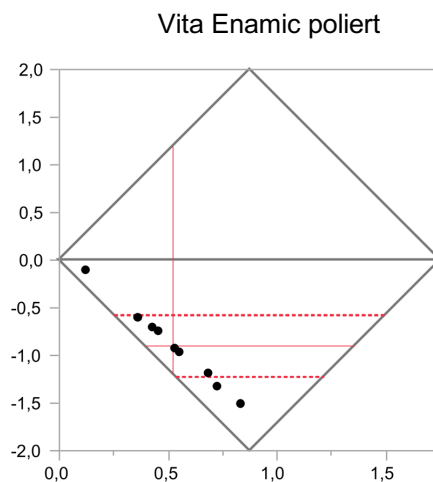
Ergebnisse

Tabelle 12 Differenzen von Ra zwischen Nach zu Vor der Intervention mit "Black is White"
 (N=9 pro Materialgruppe) Aufgetragen sind jeweils auf der X-Achse die Mittelwerte der Differenzen und auf der Y-Achse die Abweichung des Differenzpaares vom gemeinsamen Mittelwert (vertikale Linie). Die horizontalen Linien geben die durchschnittliche Differenz und deren Konfidenzintervall an.

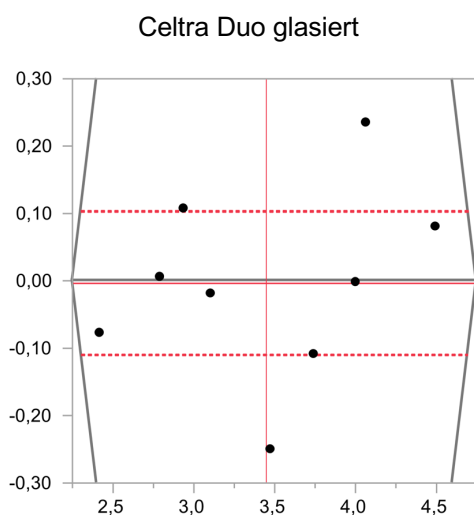
Mittelwert Ra nach Intervention – Mittelwert Ra vor Intervention



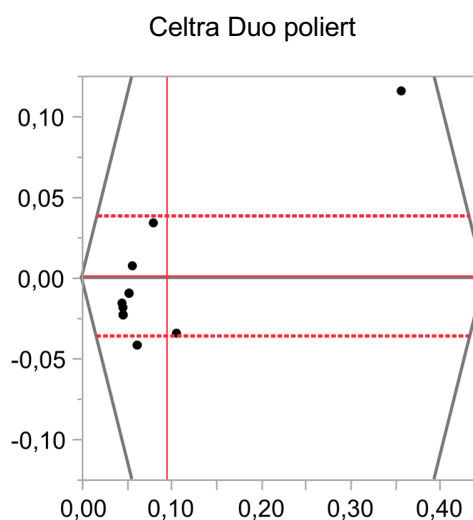
durchschn. Differenz:	0,01479
Std- Abweichung:	0,09111
Prob > [t]:	0,8750
Obere 95% KI	0,22488
Untere 95% KI	-0,1953



durchschn. Differenz:	-0,8998
Std- Abweichung:	0,14028
Prob > [t]:	0,0002*
Obere 95% KI	-0,5763
Untere 95% KI	-1,2232



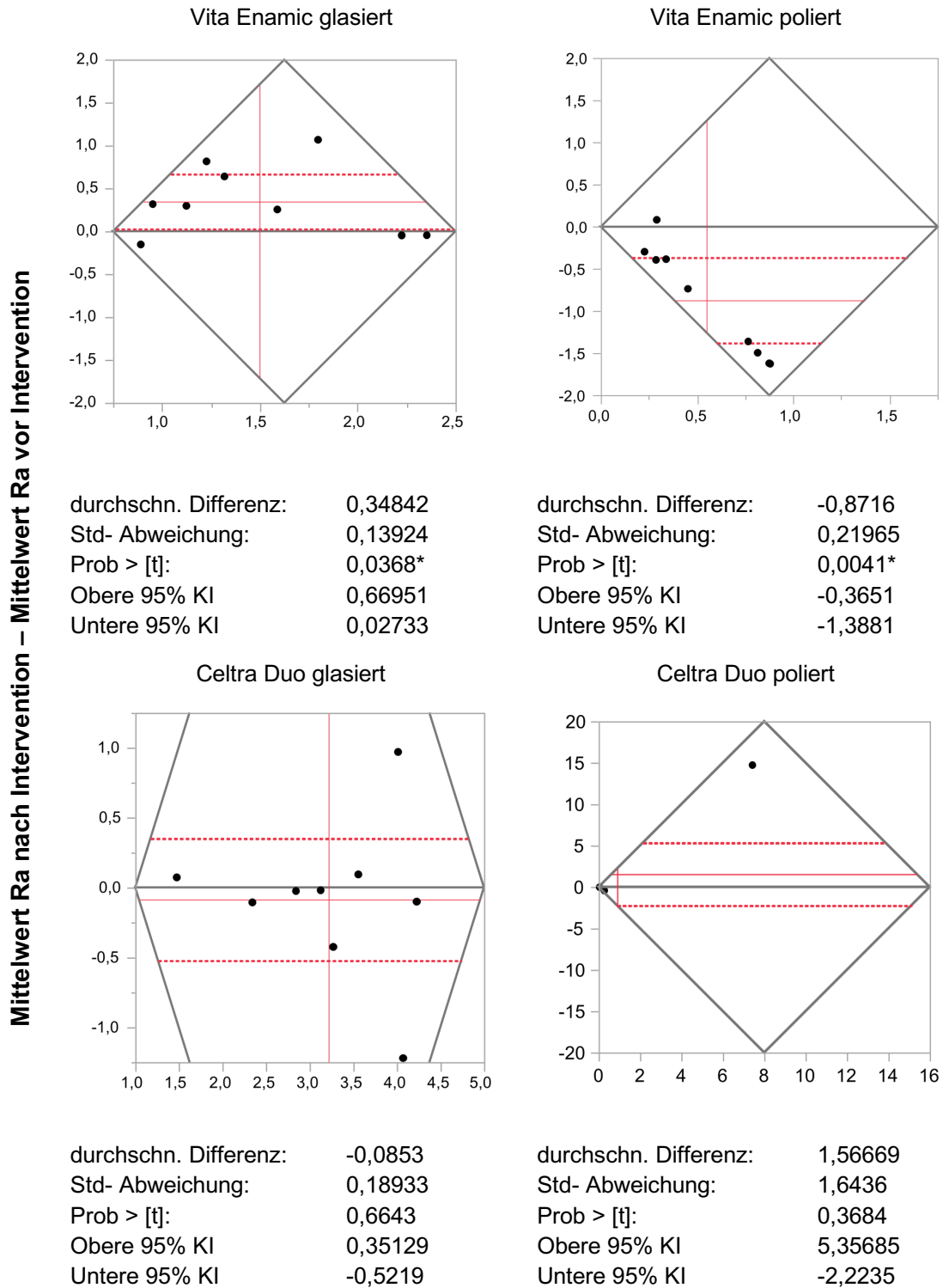
durchschn. Differenz:	-0,0033
Std- Abweichung:	0,04621
Prob > [t]:	0,9450
Obere 95% KI	0,10327
Untere 95% KI	-0,1098



durchschn. Differenz:	0,00151
Std- Abweichung:	0,01612
Prob > [t]:	0,9277
Obere 95% KI	0,03869
Untere 95% KI	-0,0357

Ergebnisse

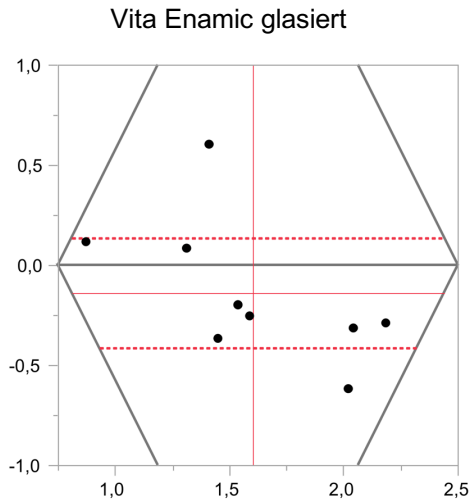
Tabelle 13 Differenzen von Ra zwischen Nach zu Vor der Intervention mit "Elmex" (N=9 pro Materialgruppe) Aufgetragen sind jeweils auf der X-Achse die Mittelwerte der Differenzen und auf der Y-Achse die Abweichung des Differenzpaares vom gemeinsamen Mittelwert (vertikale Linie). Die horizontalen Linien geben die durchschnittliche Differenz und deren Konfidenzintervall an.



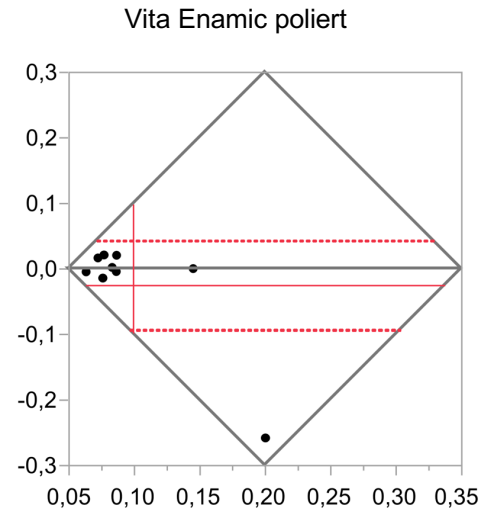
Ergebnisse

Tabelle 14 Differenzen von Ra zwischen Nach zu Vor der Intervention mit "Depurident"
 (N=9 pro Materialgruppe) Aufgetragen sind jeweils auf der X-Achse die Mittelwerte der Differenzen und auf der Y-Achse die Abweichung des Differenzpaares vom gemeinsamen Mittelwert (vertikale Linie). Die horizontalen Linien geben die durchschnittliche Differenz und deren Konfidenzintervall an.

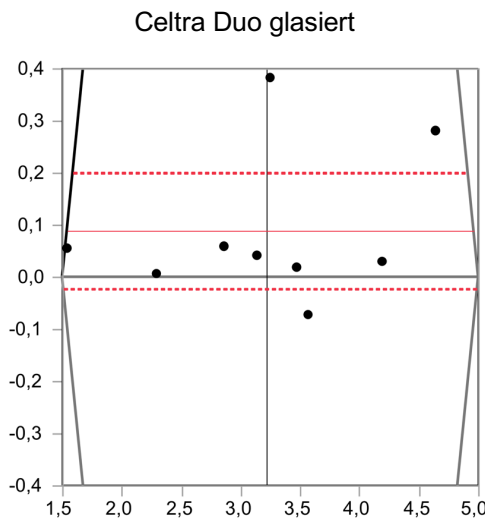
Mittelwert Ra nach Intervention – Mittelwert Ra vor Intervention



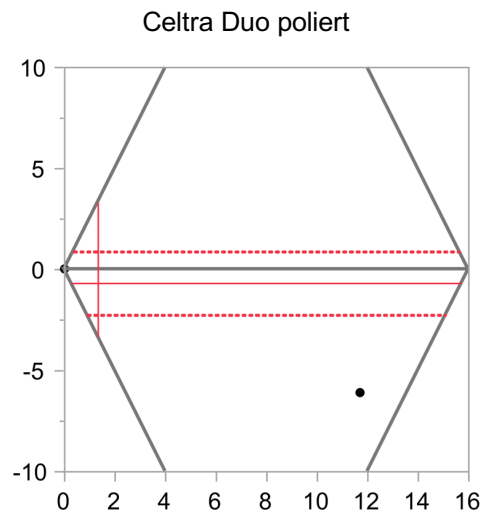
durchschn. Differenz: -0,1383
 Std- Abweichung: 0,11895
 Prob > [t]: 0,2786
 Obere 95% KI 0,13603
 Untere 95% KI -0,4126



durchschn. Differenz: -0,0253
 Std- Abweichung: 0,02948
 Prob > [t]: 0,4149
 Obere 95% KI 0,04263
 Untere 95% KI -0,0933



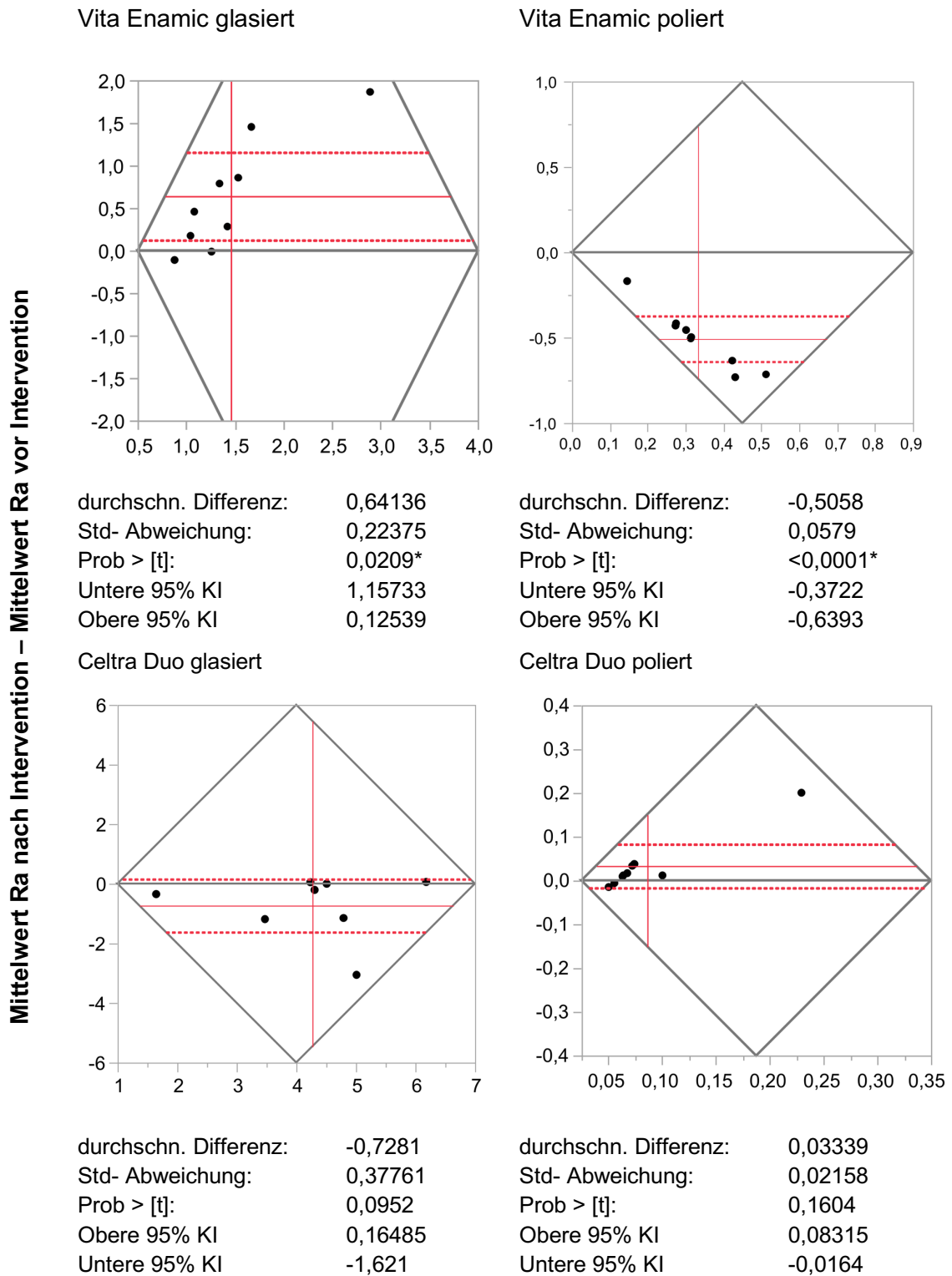
durchschn. Differenz: 0,08885
 Std- Abweichung: 0,04836
 Prob > [t]: 0,10350
 Obere 95% KI 0,20036
 Untere 95% KI -0,0227



durchschn. Differenz: -0,6843
 Std- Abweichung: 0,67978
 Prob > [t]: 0,3436
 Obere 95% KI 0,88325
 Untere 95% KI -2,2519

Ergebnisse

Tabelle 15 Differenzen von Ra zwischen Nach zu Vor der Intervention mit "Signal" (N=9)
 Aufgetragen sind jeweils auf der X-Achse die Mittelwerte der Differenzen und auf der Y-Achse die Abweichung des Differenzpaares vom gemeinsamen Mittelwert (vertikale Linie). Die horizontalen Linien geben die durchschnittliche Differenz und deren Konfidenzintervall an



3.3 Glanzmessung

Die Vorgehensweise der Glanzmessung wurde in Kapitel 2.5.2 auf Seite 35 beschrieben. Hochglanz ist ab 70 GU definiert, geringer Glanz unter 10 GU.

Polierte Metalle und Spiegeloberflächen können Werte bis zu 2000 GU erreichen.

3.3.1 Glanzwerte in GU (gloss units) aller Proben

In den beiden folgenden Tabellen auf Seite 77 (Vita Enamic, Tabelle 16) und auf Seite 78 (Celtra Duo, Tabelle 17) sind die mittelwertigen Glanzwerte in GU (gloss units) vor und nach Putzintervention abgebildet.

Tabelle 16 mittelwertige Glanzwerte in GU von Vita Enamic glasiert und poliert vor und nach Putzintervention mit Standardabweichung und p-Werten des Shapiro Wilk Tests

Vita Enamic	Zahnpasta	Zustand	Glossunits (MW)	Std.-Abw.	Differe nz in %	Shapiro Wilk (p)	
Glasiert	Black is	vor	86,44	2,92	-43 %	0,4789	
		nach	49,15	7,64		0,5491	
	Depurdent	vor	75,16	6,56	-59 %	0,0647	
		nach	30,71	5,99		0,5755	
	Elmex	vor	81,47	7,08	-8%	0,0420	
		nach	75,16	6,56		0,0647	
	Signal	vor	84,86	3,67	-18%	0,5368	
		nach	69,75	4,5		0,4171	
	Poliert	Black is	vor	76,61	5,17	-43%	0,6368
			nach	43,52	6,88		0,8474
		Depurdent	vor	32,91	6,16	-8%	0,6215
			nach	30,32	3,86		0,5600
Elmex		vor	75,98	7,49	-57%	0,1690	
		nach	32,91	6,16		0,6215	
Signal		vor	84,37	4,75	-37%	0,0528	
		nach	53,2	7,91		0,6777	

Ergebnisse

Tabelle 17 mittelwertige Glanzwerte in GU von Celtra Duo glasiert und poliert vor und nach Putzintervention mit Standardabweichung und prozentualem Zugewinn/Verlust an Glanzwert sowie den p-Werten des Shapiro Wilk Tests ($p < 0.05$ führt zur Ablehnung der Hypothese einer Normalverteilung).

Celtra Duo	Zahnpasta	Zustand	Glossunits (MW)	Std.-Abw.	Differenz in %	Shapiro Wilk (p)	
glasiert	Black is White	vor	35,87	9,05	-13%	0,3860	
		nach	31,21	9,41		0,3942	
	Depurdent	vor	30,17	18,19	+15%	0,0063	
		nach	34,61	16,75		0,0133	
	Elmex	vor	35,05	18,88	-14%	0,0335	
		nach	30,17	18,19		0,0063	
	Signal	vor	32,43	11,45	-18%	0,0011	
		nach	26,6	13,43		0,0114	
	Poliert	Black is White	vor	97,73	2,37	-15%	0,3255
			nach	82,6	2,06		0,3818
		Depurdent	vor	85,27	2,17	+8%	0,8204
			nach	91,97	2,98		0,0005
Elmex		vor	98,67	3,12	-14%	0,0018	
		nach	85,27	2,17		0,8204	
Signal		vor	100,48	2	-17%	0,8286	
		nach	83,93	7,6		0,0029	

3.3.2 Glanzwerte im Ausgangszustand der Materialproben

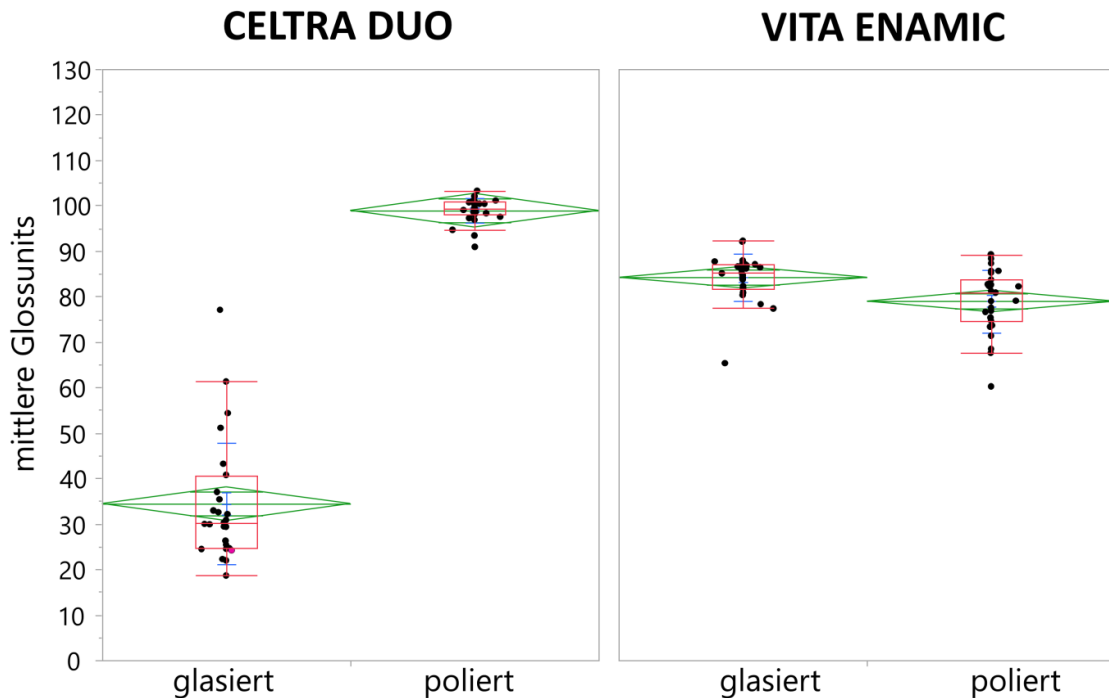


Abbildung 31 **Box-Plot-Diagramm der Glanzwerte von Celtra Duo und Vita Enamic** mit ihren beiden Oberflächenspezialisierung im Ausgangszustand (vor Putzintervention). Die rote Linie innerhalb des Boxplotes stellt den Medianwert dar. Außerhalb der Whisker liegen die Ausreißer der jeweiligen Gruppe. Der Mittelwert ist durch die zentrale grüne Linie in der Raute abgebildet, die das 95% Konfidenzintervall darstellt.

In der Abbildung 31 sind die Glanzwerte in GU (gloss units/ Glanzeinheiten) der zwei Materialien (Celtra Duo und Vita Enamic) mit ihrer jeweiligen Oberflächenspezialisierung (poliert und glasiert) vor Putzintervention aus jeweils 27 Proben dargestellt. Bei den Mittelwerten wurde die Gruppe Depurdent ausgeschlossen, da diese vor der Putzintervention bereits ein simuliertes Jahr mit Elmex geputzt wurden und sich nicht mehr im Ausgangszustand befinden.

Die Glanzwerte der glasierten Celtra Duo Proben weisen vor Putzintervention die größte Streuung mit einer Standardabweichung von $SD = 13,32$ auf. Der mittelwertige Glanzwert von Celtra Duo glasiert ist mit $MW = 34,45$ GU im Vergleich zu den anderen Materialgruppen am kleinsten. Die Proben der Gruppe Celtra Duo poliert haben eine geringe Streuung mit $SD = 2,70$ und der mittlere Glanzwert liegt bei $98,96$ GU. Die Proben der Gruppe Vita Enamic glasiert haben

Ergebnisse

eine nur geringfügig höhere Streuung mit SD = 5,16 und einen mittelwertigen Glanzwert von 84,26 GU. Bei den Proben der Gruppe Vita Enamic ist die Streuung der Werte bei den polierten Proben mit SD = 6,90 geringfügig größer als die der glasierten Proben. Der mittlere Glanzwert der polierten Proben liegt bei MW = 78,99 GU.

3.3.3 Glanzwerte vor und nach Putzintervention von Vita Enamic poliert

Vita Enamic	Zahnpasta	Zustand	Glossunits (MW)	Veränderung in GU	Veränderung in %
poliert	gepoolt	vor	78,99	-	-
	Black is White	vor	76,61	-33,09	-43,20
		nach	43,52		
	Depurdent	vor	32,91	-2,95	-7,87
		nach	30,32		
	Elmex	vor	75,98	-43,07	-56,69
		nach	32,91		
	Signal	vor	84,37	-31,16	-36,94
		nach	53,2		

Bei den Proben Vita Enamic poliert lagen die gepoolten Glanzwerte vor den jeweiligen Putzinterventionen durchschnittlich bei 78,99 GU. Die Glanzwerte wurden durch alle Zahnpasten reduziert. Die höchste Reduzierung des Glanzwertes wurde durch Elmex mit - 43,07 GU (- 56,69 %) verursacht. Black is White (- 33,09 GU; -43,20 %) und Signal White Now (- 31,16 GU, - 36,94 %) bewirkten eine ähnliche Abnahme der Glanzwerte. Die Reinigungszahnpasta Depurdent hatte eine geringe Abnahme von - 2,59 GU; -7,87 % aus dem Zustand „nach Elmex“ zur Folge.

Vita Enamic poliert

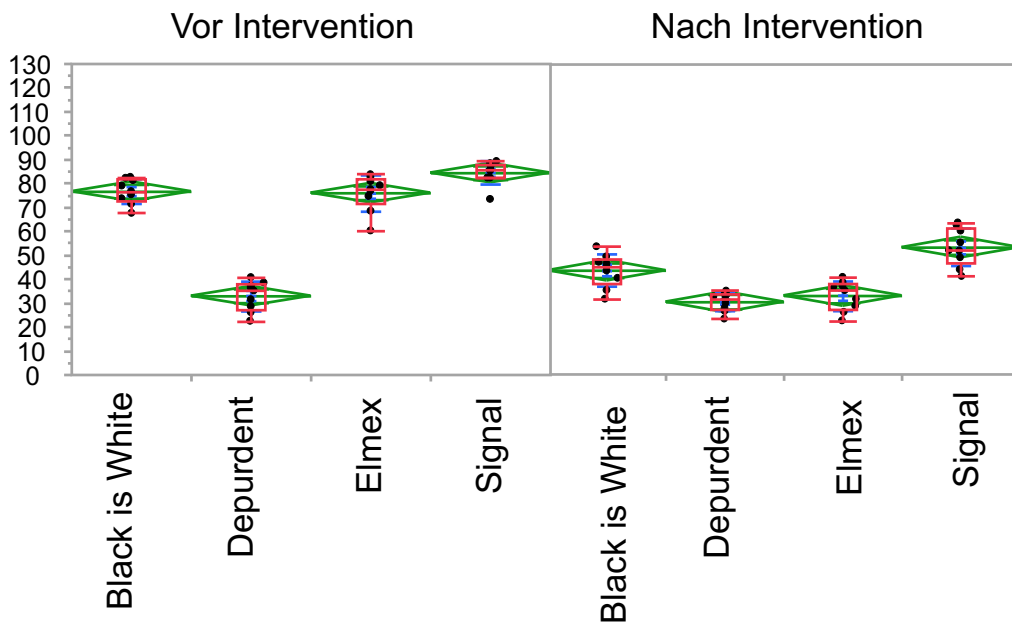


Abbildung 32 **Darstellung der Glanzwerte von Vita Enamic poliert in GU (gloss units) auf der y-Achse in Abhängigkeit des Zustandes (vor und nach Putzintervention) und der verwendeten Zahnpasta(x-Achse).**

3.3.4 Glanzwerte vor und nach Putzintervention von Vita Enamic glasiert

Bei den Proben Vita Enamic glasiert lagen die gepoolten Glanzwerte vor den jeweiligen Putzinterventionen durchschnittlich bei 84,26 GU. Bei den Proben Vita Enamic glasiert mit lichthärtender Glasurmasse wurde durch die Putzintervention mit allen vier Zahnpasten eine Verringerung des Glanzwertes von - 6,31 GU; - 7,74 % (Elmex) bis - 44,45 GU; - 59,14 % (Depurdent) verursacht. Die Zahnpasta Black is White reduzierte den Glanz um - 37,29 GU; - 43,14 % während Signal White Now eine Abnahme von - 15,11 GU; - 17,80 % verursachte.

Vita Enamic	Zahnpasta	Zustand	Glossunits (MW)	Veränderung in GU	Veränderung in %
glasiert	gepoolt	vor	84,26	-	-
	Black is White	vor	86,44	-37,29	-43,14
		nach	49,15		
	Depurdent	vor	75,16	-44,45	-59,14
		nach	30,71		
	Elmex	vor	81,47	-6,31	-7,74
		nach	75,16		
	Signal	vor	84,86	-15,11	-17,80
		nach	69,75		

Vita Enamic glasiert

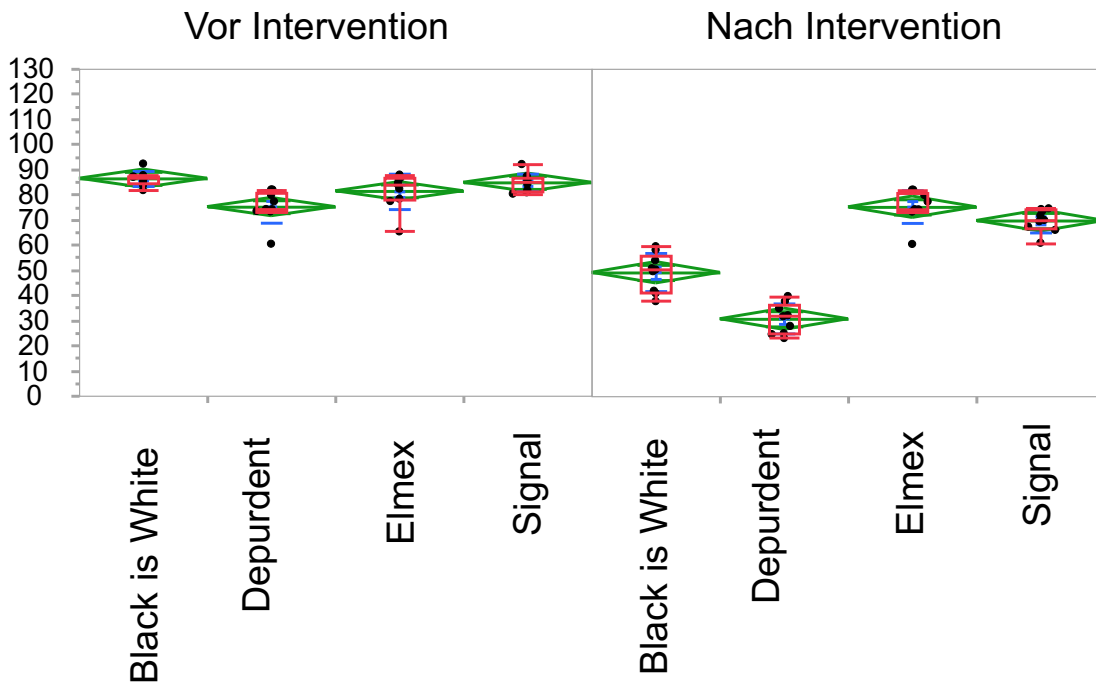


Abbildung 33 **Darstellung der Glanzwerte von Vita Enamic glasiert in GU (gloss units) auf der y-Achse in Abhängigkeit des Zustandes (vor und nach Putzintervention) und der verwendeten Zahnpasta(x-Achse).**

3.3.5 Glanzwerte vor und nach Putzintervention von Celtra Duo poliert

Bei den Proben Celtra Duo poliert lagen die gepoolten Glanzwerte vor den jeweiligen Putzinterventionen durchschnittlich bei 98,96 GU. Bei den Proben Celtra Duo poliert ohne weitere Oberflächenvergütung konnte nach Putzintervention durch Signal White Now, Black is White und Elmex ebenfalls eine Reduzierung des Glanzwertes festgestellt werden. Die höchste Abnahme des Glanzwertes wurde hier ebenfalls durch Signal White Now mit -16,55 GU; -16,47 % und Black is White mit -15,14 GU; -15,49 % erzielt. Der Glanz wurde durch Elmex um -13,40 GU und -13,6 % verringert und durch Putzintervention mit Depurdent um +6,70 GU; +7,86 % erhöht.

Celtra Duo	Zahnpasta	Zustand	Glossunits (MW)	Veränderung in GU	Veränderung in %
poliert	gepoolt	vor	98,96	-	-
	Black is White	vor	97,73	-15,14 GU	-15,49
		nach	82,6		
	Depurdent	vor	85,27	+6,70 GU	+7,86
		nach	91,97		
	Elmex	vor	98,67	-13,40 GU	-13,60
		nach	85,27		
	Signal	vor	100,48	-16,55	-16,47
		nach	83,93		

Celtra Duo poliert

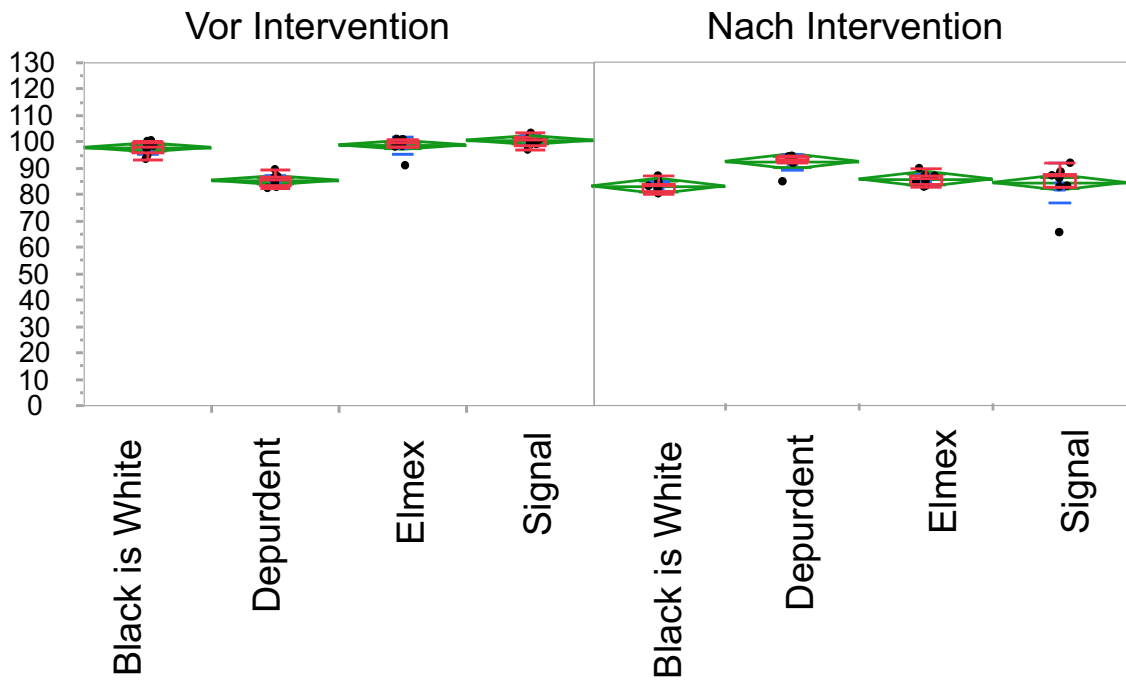


Abbildung 34 **Darstellung der Glanzwerte von Celtra Duo poliert in GU (gloss units) auf der y-Achse in Abhängigkeit des Zustandes (vor und nach Putzintervention) und der verwendeten Zahnpasta(x-Achse).**

3.3.6 Glanzwerte vor und nach Putzintervention von Celtra Duo glasiert

Bei den Proben Celtra Duo glasiert lagen die gepoolten Glanzwerte vor den jeweiligen Putzinterventionen durchschnittlich bei 34,45 GU. Bei den Proben des Materials Celtra Duo mit der durch Glasurmasse vergüteten Oberfläche konnte eine Abnahme des Glanzwertes durch Putzintervention mit den Zahnpasten Signal, Elmex und Black is White festgestellt werden. Nach der Putzintervention mit Depurdent waren die Oberflächen im Mittelwert um +4,45 GU; +14,74 % glänzender. Von den drei Zahnpasten, die den Oberflächenglanz reduziert haben, hatte Signal White Now mit -5,83 GU; -17,99 % die höchste Minderung des mittelwertigen Glanzwertes. Elmex reduzierte den Glanz um MW -4,89 GU; -13,95 % und Black is White reduzierte den Glanzwert um MW = -4,65 GU; -12,97 %.

Celtra Duo	Zahnpasta	Zustand	Glossunits (MW)	Veränderung in GU	Veränderung in %
glasiert	gepoolt	vor	34,45		
	Black is White	vor	35,87	-4,65	-12,97
		nach	31,21		
	Depurdent	vor	30,17	+4,45	+14,74
		nach	34,61		
	Elmex	vor	35,05	-4,89	-13,95
		nach	30,17		
	Signal	vor	32,43	-5,83	-17,99
		nach	26,60		

Celtra Duo glasiert

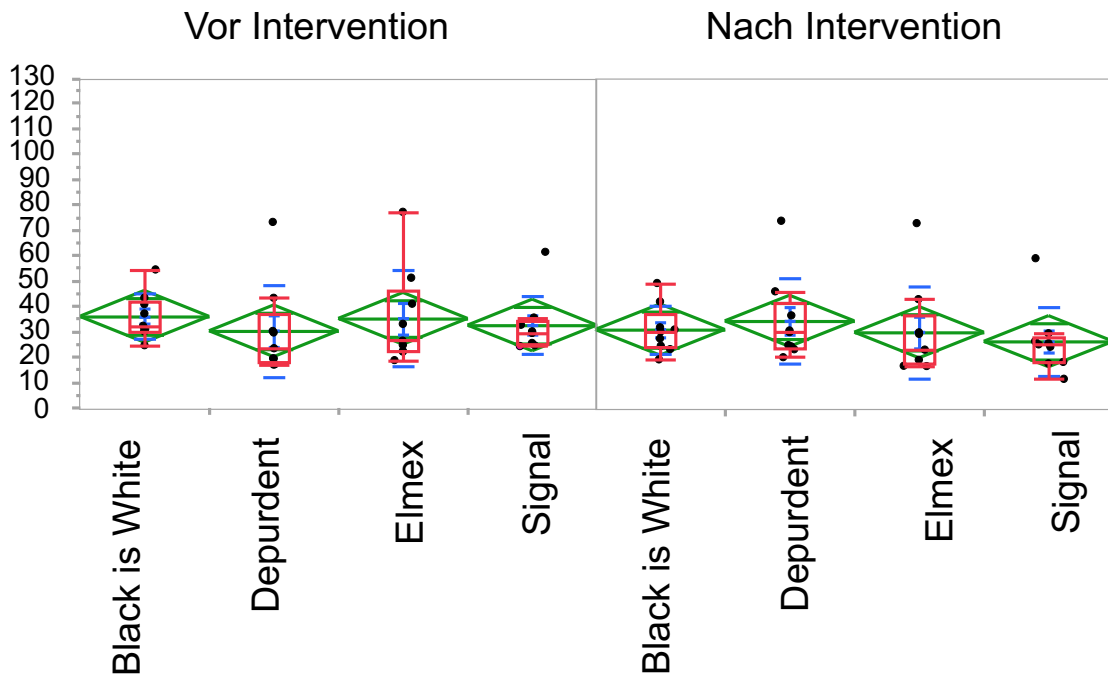


Abbildung 35 **Darstellung der Glanzwerte von Celtra Duo glasiert in GU** (gloss units) auf der y-Achse in Abhängigkeit des Zustandes (gruppiert nach vor und nach Putzintervention) und der verwendeten Zahnpasta(x-Achse).

3.3.7 Statistischer Vergleich der Glanz-Mittelwerte vor Intervention

In der folgenden Tabelle wurden die Glanzwerte der Vita Enamic-Proben (glasiert zu poliert) und Celtra Duo-Proben (glasiert und poliert) vor der Putzintervention durch den Wilcoxon-Test verglichen.

Tabelle 18 Vergleich der Ausgangs-Glanzwerte (vor Putzintervention, in GU) von Celtra Duo und Vita Enamic zwischen poliert und glasiert durch den p-Wert des Wilcoxon Tests.

Material / Zustand	Mittelwert-differenz (GU)	p-Wert Glanz
Enamic glasiert – poliert	+ 14,52	0,0023*
Celtra Duo glasiert - poliert	- 62,16	<0,0001*

3.3.8 Vergleich des Glanzes vor und nach Intervention

Tabelle 19 Ergebnisse des Wilcoxon Tests der Glanzwerte in GU von Vita Enamic vor zu nach Putzintervention in Abhängigkeit der verwendeten Zahnpasta und Oberflächenspezialisierung.

Vita Enamic	p-Wert: vor/nach	
	poliert	glasiert
Black is White	0,0004*	0,0004*
Depurdent	0,2510	0,0004*
Elmex	0,0004*	0,0217*
Signal White now	0,0004*	0,0004*

Tabelle 20 Darstellung der p-Werte des Wilcoxon Tests der Glanzwerte in GU von Celtra Duo vor zu nach Putzintervention in Abhängigkeit der verwendeten Zahnpasta und Oberflächenspezialisierung.

Celtra Duo	p-Wert: vor/nach	
	poliert	glasiert
Black is White	0,0004*	0,2893
Depurdent	0,0027*	0,1577
Elmex	0,0004*	0,3772
Signal White now	0,0004*	0,1333

3.4 Qualitative Bewertung der Rasterelektronen-mikroskopischen Aufnahmen

Im Folgenden sind die Raster-Elektronenaufnahmen in 5000-facher Vergrößerung der CAD/CAM Materialien angeführt.

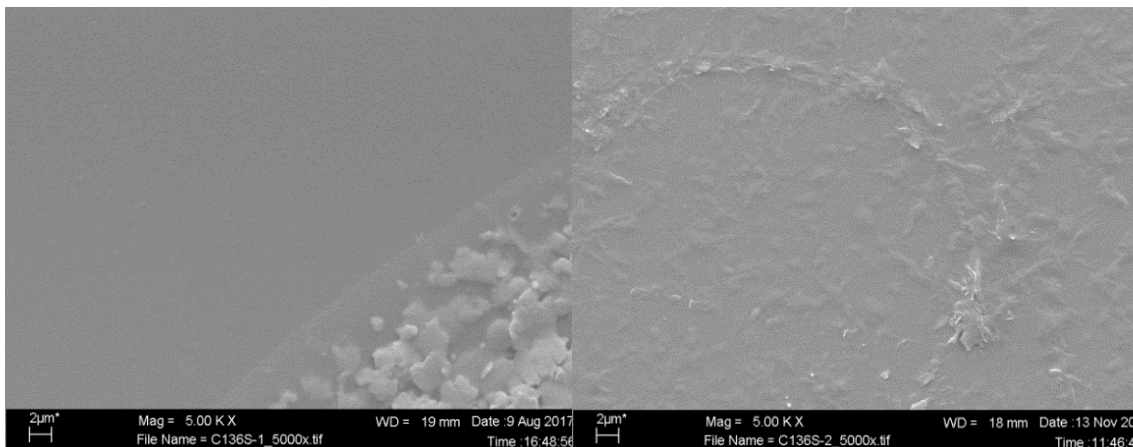
Die *Tabelle 3* auf Seite 24, in welcher die Materialien mit ihrer entsprechenden Spezialisierung, verwendeten Zahnpasten und Chargennummern dargestellt werden, ist zum Verständnis hilfreich. Es folgen 19 erklärende Abbildungen von *Tabelle 21* bis *Tabelle 36* auf den Seiten 89 bis 104.

Tabelle 21 REM der Probe C136S, Celtra Duo glasiert. Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Signal White now.

Celtra Duo, glasiert; Intervention: Signal
(Probe: C136S)

Vor Intervention

Nach Intervention



Die Oberfläche ist leicht inhomogen, mit regelmäßiger Grundstruktur und aufgelagerten, agglomerierten, kristallinen Partikeln im rechten unteren Bildbereich. Die Oberfläche weist im abgebildeten Bereich keine Defektmorphologie auf.

Die Oberfläche ist leicht inhomogen, mit regelmäßiger Grundstruktur und aufgelagerten kristallinen Partikeln. Die Oberfläche weist im abgebildeten Bereich keine Defektmorphologie auf.

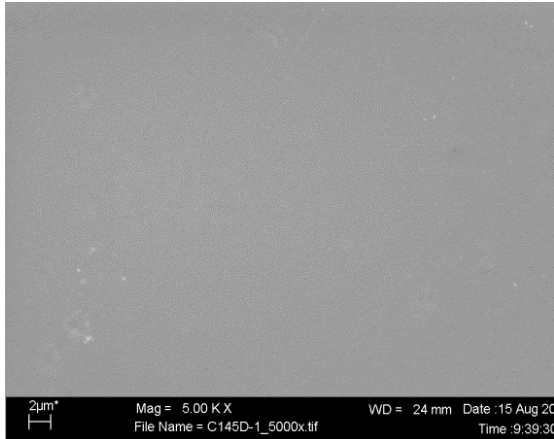
Ergebnisse

Tabelle 22 **REM der Probe C145D Celtra Duo glasiert**. Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Elmex.

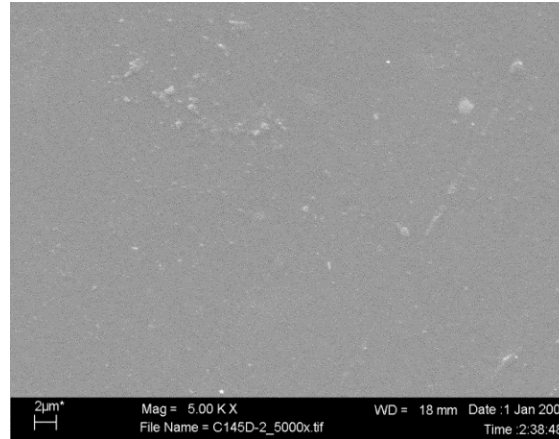
Celtra Duo, glasiert; Intervention: Elmex

(Probe: C145D)

Vor Intervention



Nach Intervention



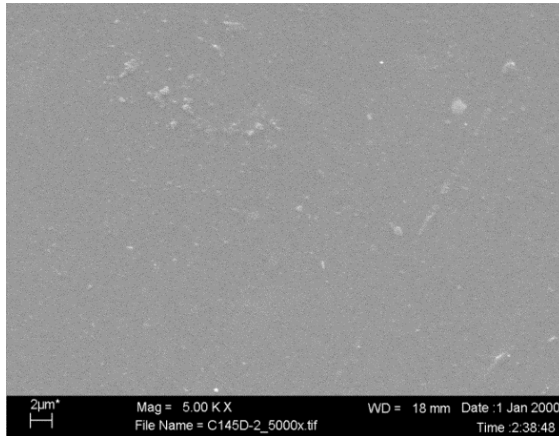
Abgebildet ist eine homogene Oberfläche mit regelmäßiger Grundstruktur und wenigen vereinzelten hellen Flecken im linken unteren Bildbereich. Die Oberfläche weist im abgebildeten Bereich keine Defektmorphologie auf.

Es zeigt sich eine homogene Oberfläche mit wenigen inhomogenen Auflagerungen. Die Oberfläche weist im abgebildeten Bereich keine Defektmorphologie auf.

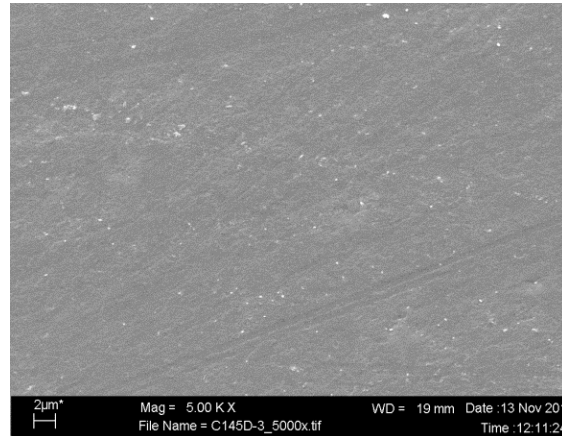
Tabelle 23 **REM der Probe C145D, Celtra Duo glasiert.** Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Depurdent.

Celtra Duo, glasiert; Intervention: Depurdent
(Probe: C145D)

Vor Intervention



Nach Intervention



Es zeigt sich eine homogene Oberfläche mit regelmäßiger Grundstruktur und wenigen aufgelagerten, disseminierten Partikeln von bis zu 1 µm. Die Oberfläche weist im abgebildeten Bereich keine Defektmorphologie auf. Dies ist der Ausgangszustand der Probe C145D nach der Reinigung mit Elmex und vor der Reinigung mit Depurdent.

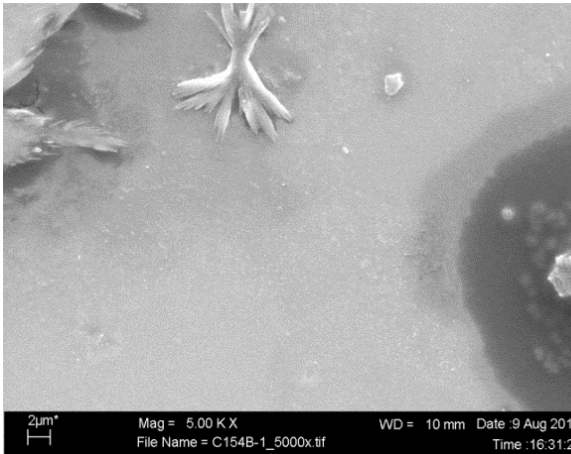
Sichtbar im gesamten Bildbereich, ist eine inhomogene Oberfläche mit disseminierten Kratzern und Rillen, sowie im oberen Bildbereich vereinzelt aufgelagerten Partikeln mit einer Größe von < 0,5 µm.

Ergebnisse

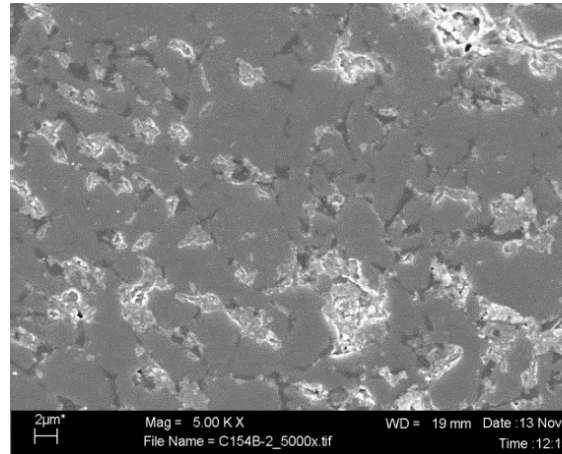
Tabelle 24 **REM der Probe C154B, Celtra Duo glasiert.** Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Black is White.

Celtra Duo, glasiert; Intervention: Black is White
(Probe: C154B)

Vor Intervention



Nach Intervention



Die Oberfläche ist leicht inhomogen, mit regelmäßiger Grundstruktur und ca. 10 µm großen aufgelagerten kristallinen Partikeln im linken oberen Bildbereich. Im rechten unteren Bildbereich sind mehrere rundlich agglomerierte Partikel zu erkennen.

Der auf der Abbildung dargestellte Bereich weist eine inhomogene Oberfläche auf. Sichtbar ist ein deutlich größerer Anteil einer grauen Oberfläche mit disseminierten, dunkler erscheinenden vertieften Bereichen. Darin sind teilweise weißliche Ablagerungen erkennbar.

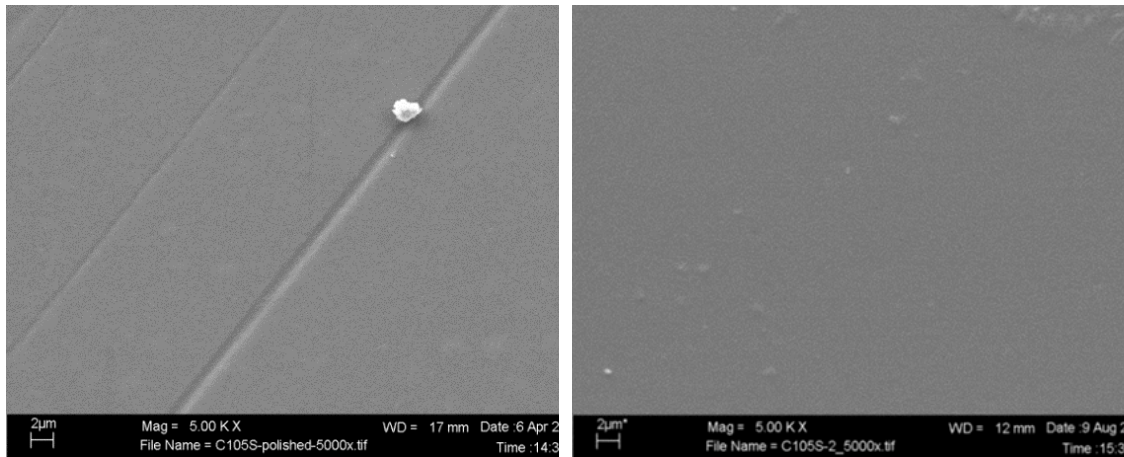
Tabelle 25 **REM der Probe C105S, Celtra Duo poliert.** Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Signal White now.

Celtra Duo, poliert; Intervention: Signal

(Probe: C105S)

Vor Intervention

Nach Intervention



Abgebildet ist eine homogene Oberfläche mit regelmäßiger Grundstruktur. Zentral befindet sich eine größere Rille über der gesamten Probenoberfläche und ein weißer, rundlicher Partikel mit einer Größe von ca. 2 μm .

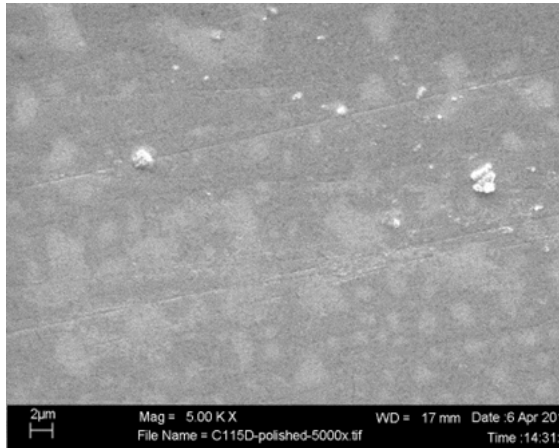
In der linken oberen Bildhälfte sind zwei weitere, weniger tiefe Rillen erkennbar.

Die abgebildete Oberfläche ist einheitlich grau und homogen mit kleinen aufgelagerten, weißlichen Partikeln. Im abgebildeten Bereich sind keine Defektmorphologien sichtbar.

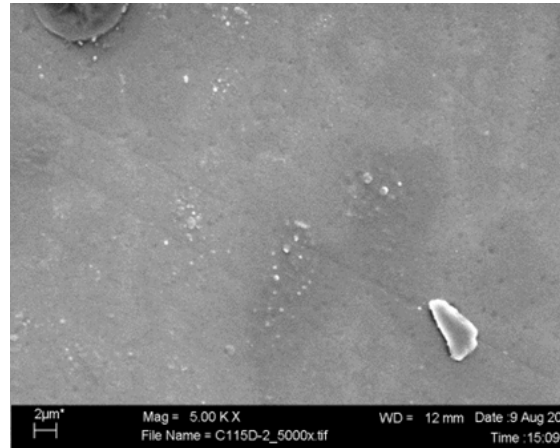
Tabelle 26 **REM der Probe C115D, Celtra Duo poliert**. Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Elmex.

Celtra Duo, poliert; Intervention: Elmex
(Probe: C115D)

Vor Intervention



Nach Intervention



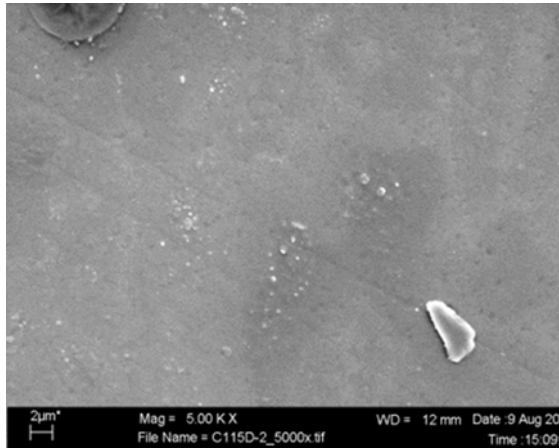
Abgebildet ist eine leicht inhomogene Oberfläche mit leichten disseminierten Kratzern. Es sind zudem hellere Flecken und weißliche, aufgelagerte Partikel mit einer Größe bis zu 2 μm sichtbar.

Die Oberfläche ist leicht inhomogen, mit leichten Kratzern in der Grundstruktur und aufgelagerten kristallinen Partikeln. Im rechten unteren Bildbereich ist ein weißlicher Partikel von ca. 4 mal 2 μm Größe aufgelagert.

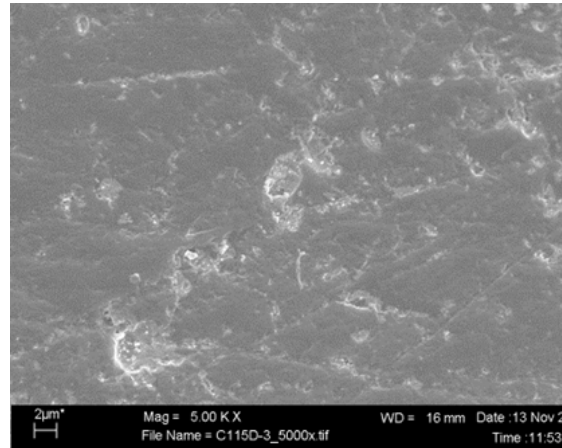
Tabelle 27 **REM der Probe C115D, Celtra Duo poliert**. Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Depurdent.

Celtra Duo, poliert; Intervention: Depurdent
(Probe: C115D)

Vor Intervention



Nach Intervention



Die Oberfläche ist leicht inhomogen, mit leichten Kratzern in der Grundstruktur und aufgelagerten kristallinen Partikeln.

Im rechten unteren Bildbereich ist ein weißlicher Partikel

von ca. $4 \times 2 \mu\text{m}$ Größe aufgelagert.

Dies ist der Ausgangszustand der Probe C115D nach der Reinigung mit Elmex und vor der Reinigung mit Depurdent

Sichtbar ist eine inhomogene Oberfläche

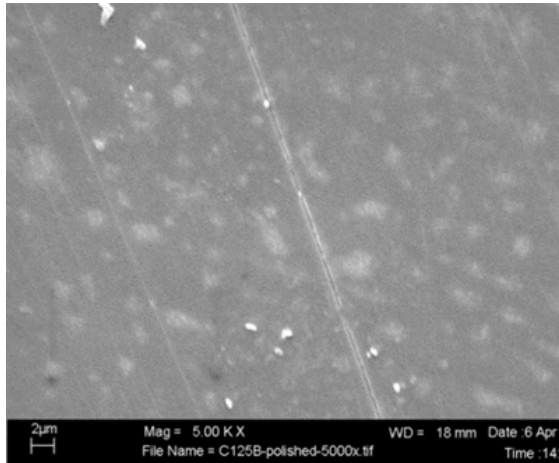
mit disseminierten Kratzern

und größeren Defekten. Teile der Oberfläche scheinen herausgelöst.

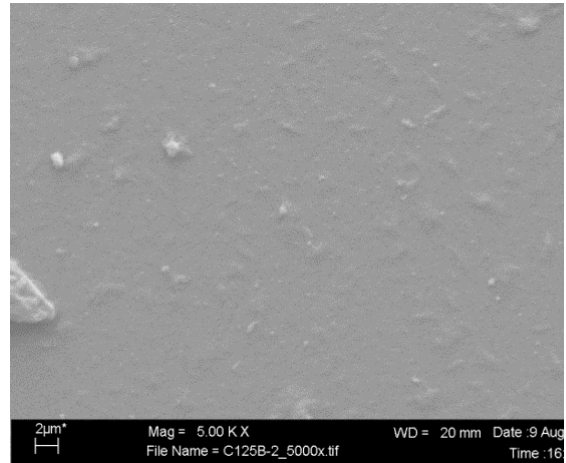
Tabelle 28 **REM der Probe C125 B, Celtra Duo poliert**. Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Black is White.

Celtra Duo, poliert; Intervention: Black is White
(Probe: C125B)

Vor Intervention



Nach Intervention



Die Oberfläche ist leicht inhomogen, mit oberflächlichen Kratzern, aufgelagerten kristallinen Partikeln mit einer Größe von ca. 0,5 μm und weißlichen Flecken.

Die Oberfläche ist homogen mit regelmäßiger Grundstruktur ohne sichtbare morphologische Kratzer oder Rillen.

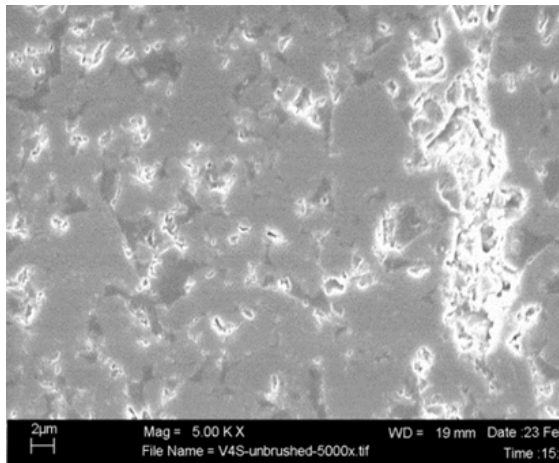
Im Vergleich zum Zustand vor der Putzintervention (links)

scheint die Oberfläche homogener zu sein. Kleine disseminiert aufgelagerte Partikel mit einer Größe von 0,5 – 1 μm sind auf der Oberfläche zu sehen.

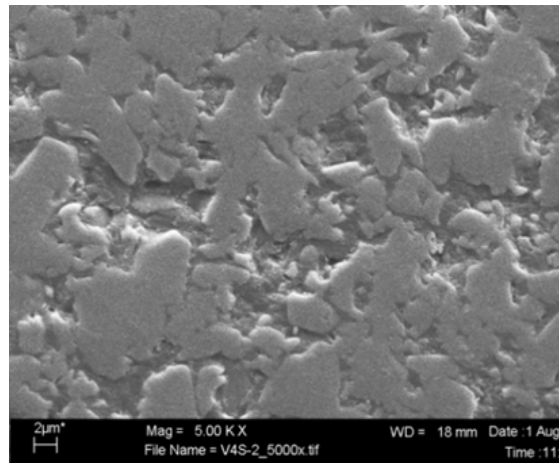
Tabelle 29 **REM der Probe V04S, Vita Enamic poliert**. Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Signal White now.

Vita Enamic, poliert; Intervention: Signal
(Probe: V04S)

Vor Intervention



Nach Intervention



Abgebildet ist eine inhomogene graue Oberfläche mit Vertiefungen im Bereich der dunkelgrauen Bereiche. Weißlichen Ablagerungen sind zu erkennen.

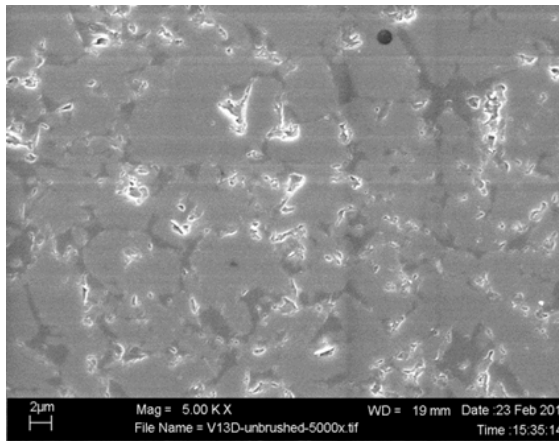
Die hellgrauen und dunkelgrauen Bereiche stellen unterschiedliche Strukturen des Material-Netzwerkes dar. Die hellgrauen Bereiche repräsentieren die feldspatkeramischen Anteile von Vita Enamic [24].

Sichtbar ist eine inhomogene Oberfläche mit vertieften dunkel erscheinenden Bereichen im Bereich der Polymermatrix. Die dunkelgrauen Anteile stellen sich, im Vergleich zu vor der Putzintervention (links), als stärker vertieft dar.

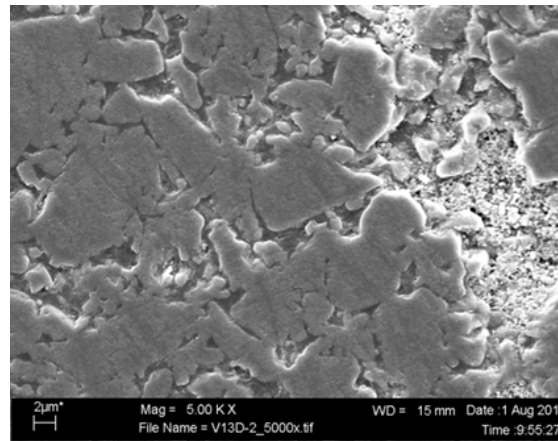
Tabelle 30 REM der Probe V13D, Vita Enamic poliert. Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Elmex.

Vita Enamic, poliert; Intervention: Elmex
(Probe: V13D)

Vor Intervention



Nach Intervention



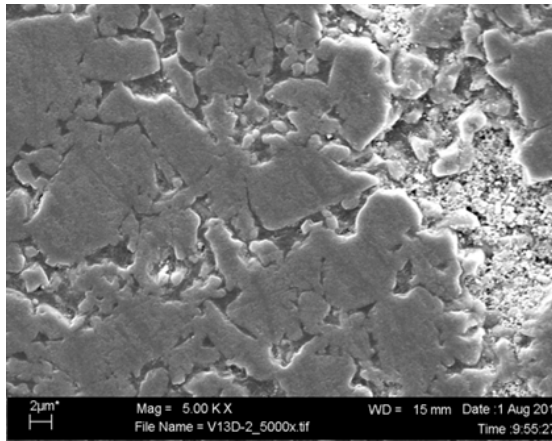
Abgebildet ist eine leicht inhomogene Oberfläche mit hell- und dunkelgrauen Anteilen der typischen REM-Struktur von Vita Enamic. Es sind vereinzelte Vertiefungen im Bereich der dunkelgrauen Bereiche und weißlichen Ablagerungen zu erkennen.

Sichtbar ist eine inhomogene Oberfläche mit Vertiefungen und darin befindliche weißliche Ablagerungen. Die dunkelgrauen Bereiche des Polymernetzwerkes sind stärker vertieft als vor der Putzintervention (linke Abbildung).

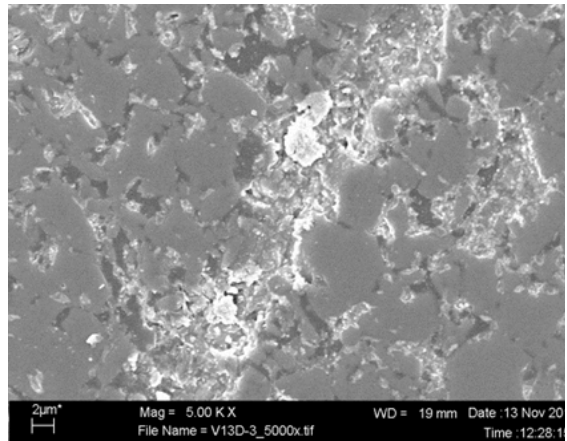
Tabelle 31 **REM der Probe V13D, Vita Enamic poliert.** Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Depurdent.

Vita Enamic, poliert; Intervention: Depurdent
(Probe: V13D)

Vor Intervention



Nach Intervention



Sichtbar ist eine inhomogene Oberfläche mit Vertiefungen und weißlichen Ablagerungen.

Die dunkelgrauen Bereiche des Polymers sind im Vergleich zur helleren keramischen Matrix stärker vertieft

Dies ist der Ausgangszustand der Probe V13D nach der Reinigung mit Elmex und vor der Reinigung mit Depurdent.

Sichtbar ist eine inhomogene Oberfläche mit den typischen hellgrauen (Feldspatkeramik) und

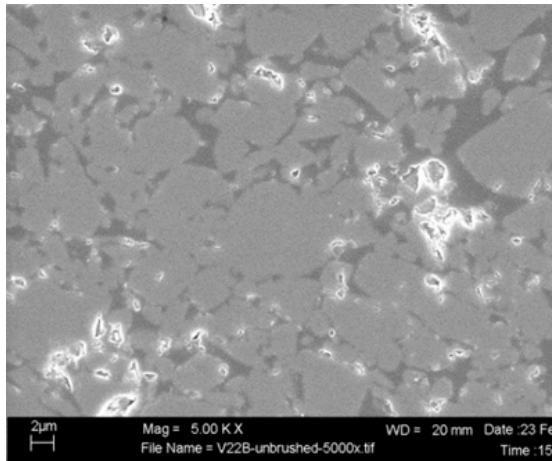
dunkelgrauen Bereichen (Polymer) von Vita Enamic.

Die Grundstruktur der Oberfläche zeigt sich homogener, mit weniger Vertiefungen als vor der Putzintervention mit Depurdent (linke Abbildung).

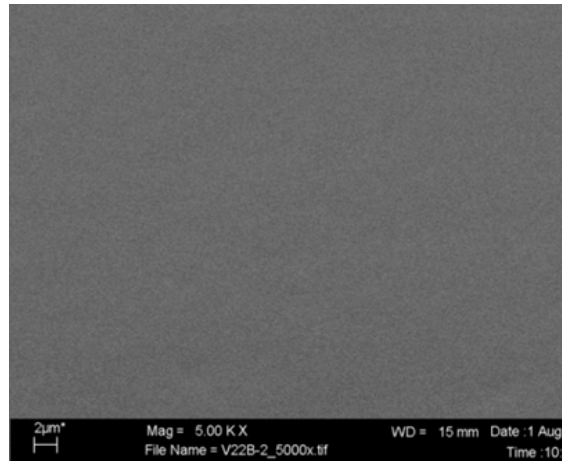
Tabelle 32 **REM der Probe V22B, Vita Enamic poliert**. Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit *Black is White*.

Vita Enamic, poliert; Intervention: Black is White
(Probe: V22B)

Vor Intervention



Nach Intervention



Abgebildet ist eine inhomogene Oberfläche. Es kann zwischen dunkelgrauen und hellgrauen Bereichen unterschieden werden. Die Oberfläche weist leichte morphologische Defekte mit weißlichen Ablagerungen auf.

Die Oberfläche erscheint homogen und stellt sich als ebenmäßig dar. Es ist kein Unterschied zwischen dem Polymernetzwerk und der keramischen Matrix erkennbar. Im Vergleich zum Zustand vor dem Putzen (links) scheint die Oberfläche nun homogener.

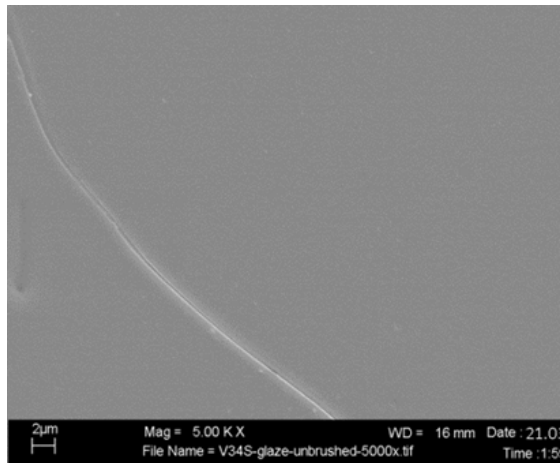
Die typische REM-Oberflächenstruktur von Vita Enamic ist nicht sichtbar [24].

Tabelle 33 **REM der Probe V34S, Vita Enamic glasiert.** Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Signal White now.

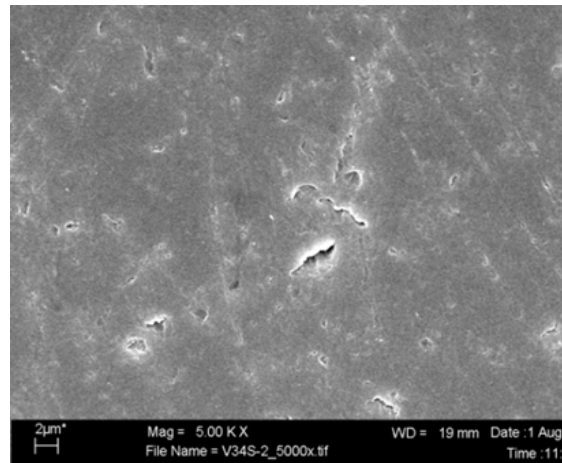
Vita Enamic, glasiert; Intervention: Signal

(Probe: V34S)

Vor Intervention



Nach Intervention



Abgebildet ist eine homogene graue Oberfläche im Sinne der lichthärtenden Komposit-Glasurmasse.

Die keramische Matrix ist morphologisch nicht von der Kompositmatrix zu unterscheiden.

In dem linken Bilddrittel ist eine weiße Rille erkennbar, die sich mit einer Breite von 0,5 µm über den gesamten Probenbereich erstreckt.

Es zeigt sich eine graue Oberflächenstruktur bei der nicht zwischen hell- und dunkelgrauen Bereichen unterschieden werden kann. Auf dem gesamten abgebildeten Bereich zeigen sich nach der Putzintervention

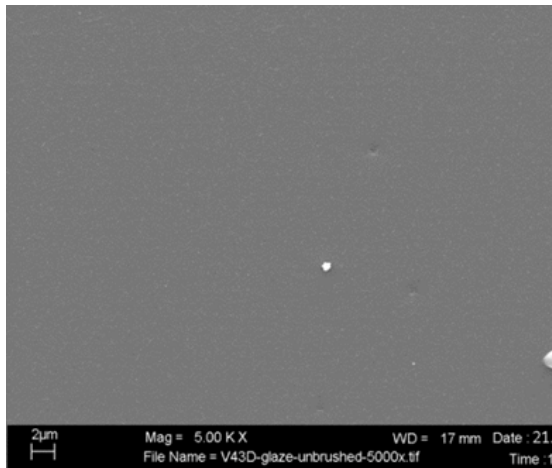
disseminierte, weißliche morphologische Defekte.

Teile des Materials scheinen herausgelöst.

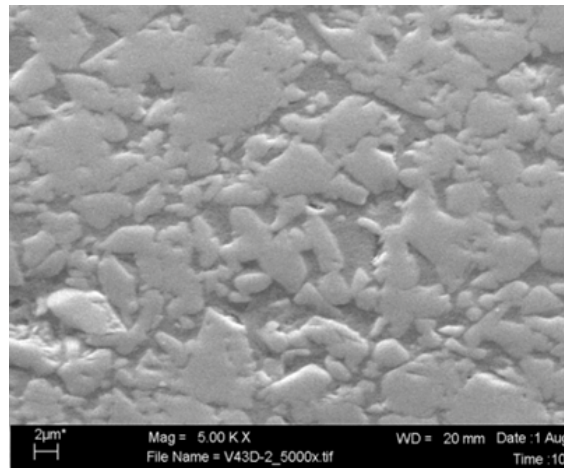
Tabelle 34 **REM der Probe V43D, Vita Enamic glasiert.** Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Elmex.

Vita Enamic, glasiert; Intervention: Elmex
(Probe: V43D)

Vor Intervention



Nach Intervention



Abgebildet ist eine homogene graue Oberfläche im Sinne der lichthärtenden Komposit-Glasurmasse.

Die keramische Matrix ist morphologisch nicht von der Kompositmatrix zu unterscheiden.

Zentral und am rechten unteren Bildbereich sind weißliche, rundliche Partikel abgebildet.

Abgebildet ist eine inhomogene graue Oberfläche mit der typischen REM-Struktur von Vita Enamic [24]. Es zeigen sich Vertiefungen im Bereich der dunkelgrauen Bereiche (Polymermatrix).

Im linken unteren Bildbereich sind weißliche Partikel erkennbar.

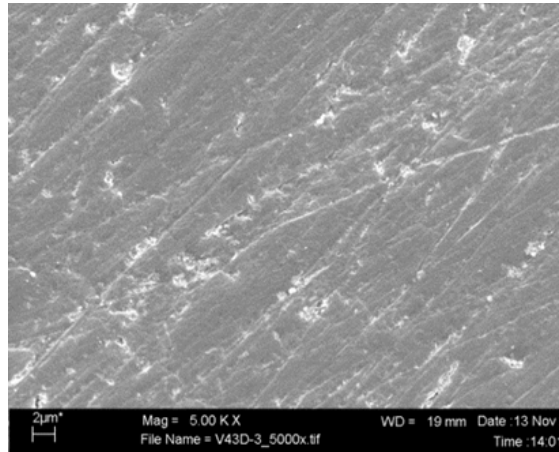
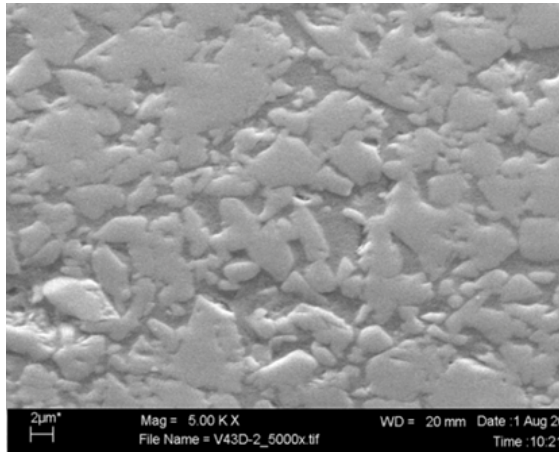
Tabelle 35 **REM der Probe V43D, Vita Enamic glasiert.** Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Depurdent.

Vita Enamic, glasiert; Intervention: Depurdent

(Probe: V43D)

Vor Intervention

Nach Intervention



Abgebildet ist eine inhomogene graue Oberfläche mit der typischen REM-Struktur von Vita Enamic [24]. Es zeigen sich Vertiefungen im Bereich der dunkelgrauen Bereiche (Polymermatrix).

Im linken unteren Bildbereich sind weißliche Partikel erkennbar.

Dies ist der Ausgangszustand der Probe V43D nach der Reinigung mit Elmex und vor der Reinigung mit Depurdent.

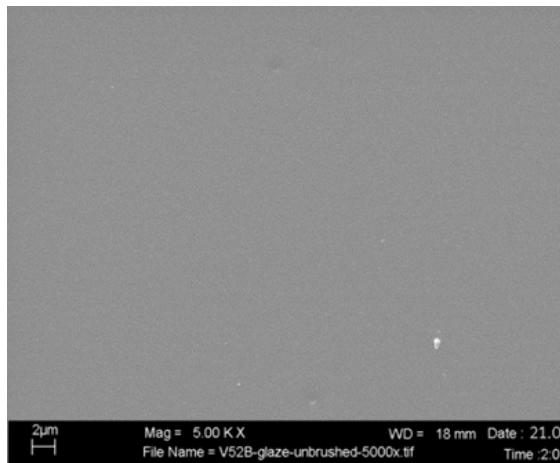
Die abgebildete Oberfläche ist inhomogen mit disseminierten Kratzern und Rillen. Die Grundstruktur weist keine hell- und dunkelgrauen Bereiche auf, daher ist die keramische Matrix morphologisch nicht von der Kunststoffmatrix unterscheidbar.

Tabelle 36 **REM der Probe V52B, Vita Enamic glasiert.** Auf der linken Seite vor und rechts nach Intervention mit Black is White.

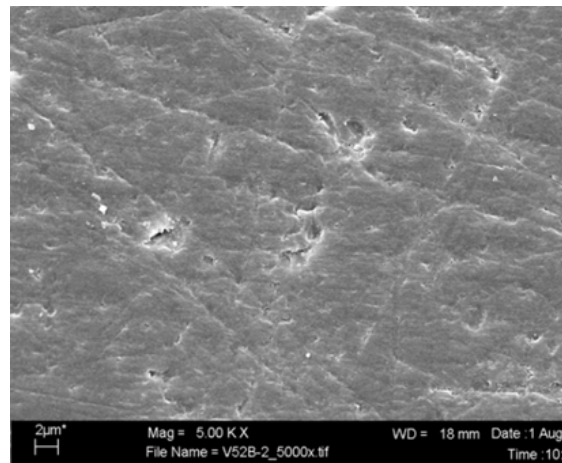
Vita Enamic, glasiert; Intervention: Black is White

(Probe: V52B)

Vor Intervention



Nach Intervention



Abgebildet ist eine homogene graue Oberfläche im Sinne der lighthärtenden Komposit-Glasurmasse. Die keramische Matrix ist morphologisch nicht von der Kompositmatrix zu unterscheiden.

Die abgebildete Oberfläche ist inhomogen mit disseminierten Kratzern und Rillen. Die Grundstruktur weist keine hell- und dunkelgrauen Bereiche auf, daher ist die keramische Matrix morphologisch nicht von der Kunststoffmatrix unterscheidbar. Bis zu 2 μm große weißlich umrandete Vertiefungen sind erkennbar.

3.5 REM-Auswertung der genutzten Zahnpasten

Tabelle 37 REM-Aufnahmen der Zahnpasta Depurdent in 1000-facher und 5000-facher Vergrößerung

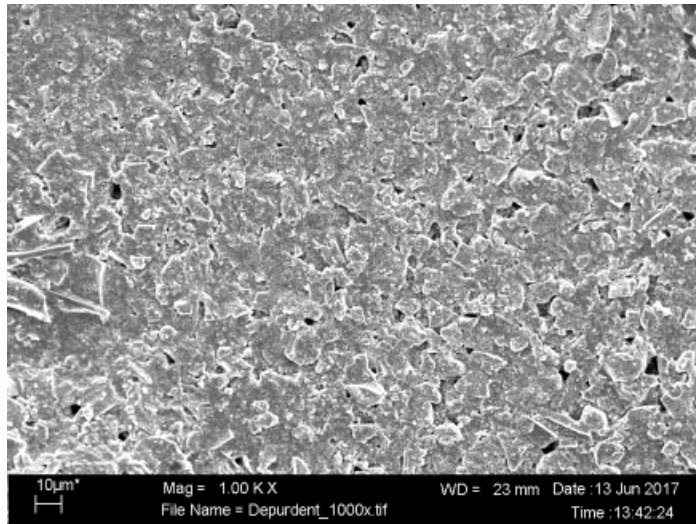


Abbildung 36 REM-Aufnahme in 1000facher Vergrößerung der Zahnpasta Depurdent

- Inhomogene Oberfläche
- unterschiedliche Größe der abrasiven Partikel
- spitze und scharfkantige Oberfläche der abrasiven Partikel
- hohe Anzahl an abrasiven Partikeln

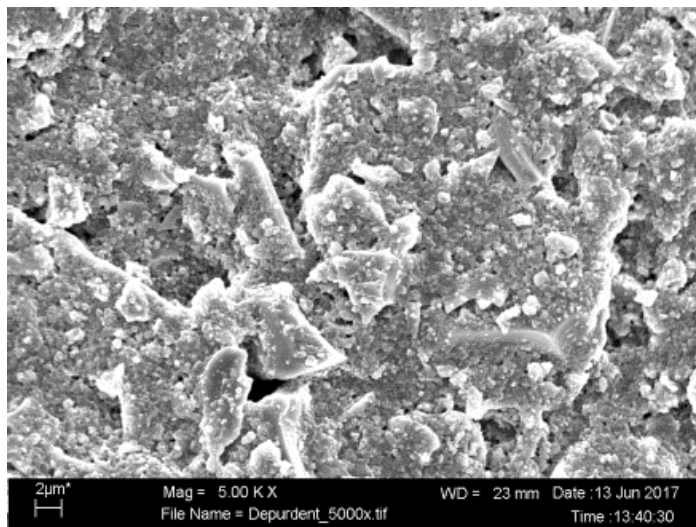
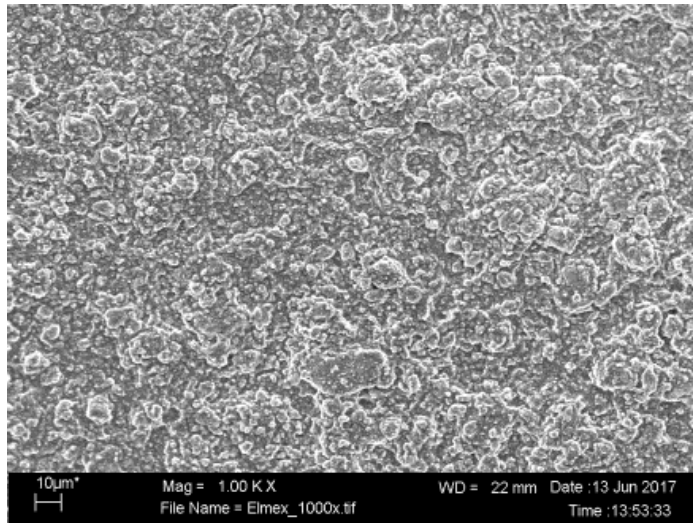


Abbildung 37 REM-Aufnahme in 5000facher Vergrößerung der Zahnpasta Depurdent

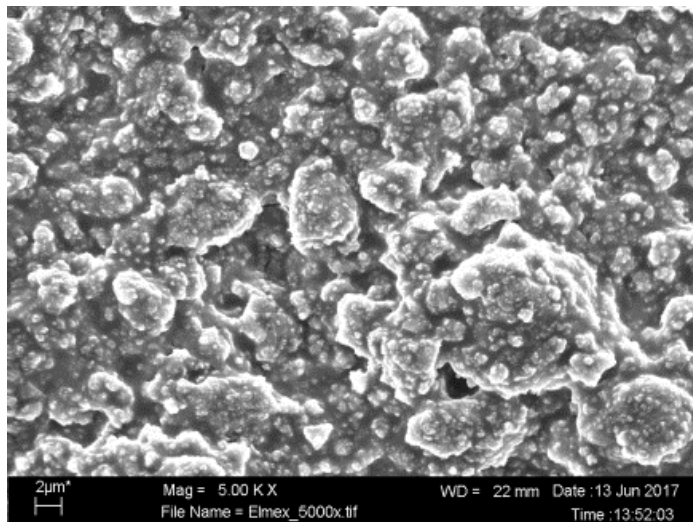
- Spitze und scharfkantige Oberfläche der abrasiven Partikel
- die abrasiven Partikel variieren an Größe

Tabelle 38 REM-Aufnahmen der Zahnpasta Elmex in 1000-facher und 5000-facher Vergrößerung



- unruhige Oberfläche
- abrasive Partikel in der Größe homogen
- eher rundliche Oberfläche der abrasiven Partikel

Abbildung 38 REM-Aufnahme in 1000facher Vergrößerung der Zahnpasta Elmex



- In stärkerer Vergrößerung rundliche Oberfläche der abrasiven Partikel
- Unterschiedliche Größe der abrasiven Partikel

Abbildung 39 REM-Aufnahme in 5000-facher Vergrößerung der Zahnpasta Elmex

Tabelle 39 REM-Aufnahmen der Zahnpasta Signal White now in 1000-facher und 5000-facher Vergrößerung

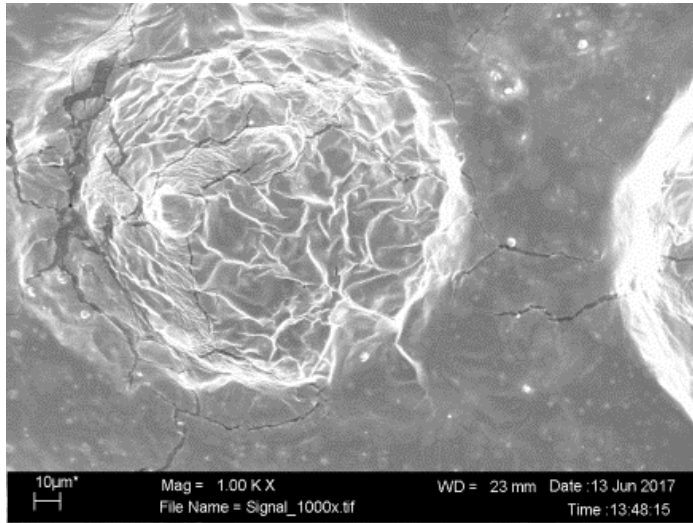


Abbildung 40 REM-Aufnahme in 1000-facher Vergrößerung der Zahnpasta Signal White now

- glatte Oberfläche
- erhabene Struktur
- leichte Einrisse
- keine Partikel zu erkennen
- keine abrasiven Partikel erkennbar

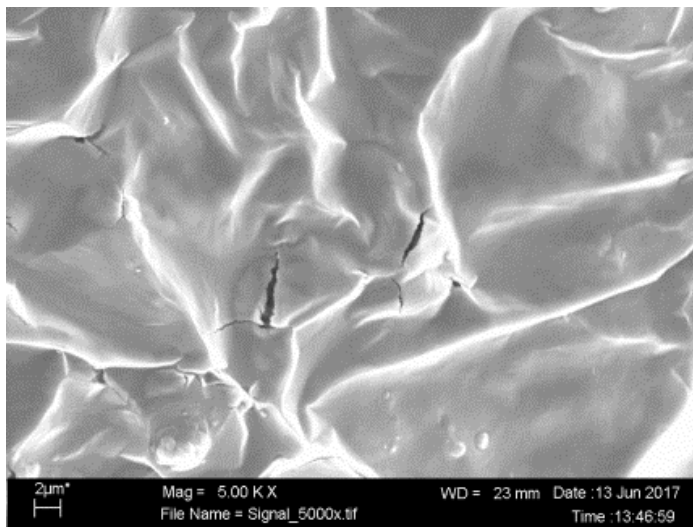
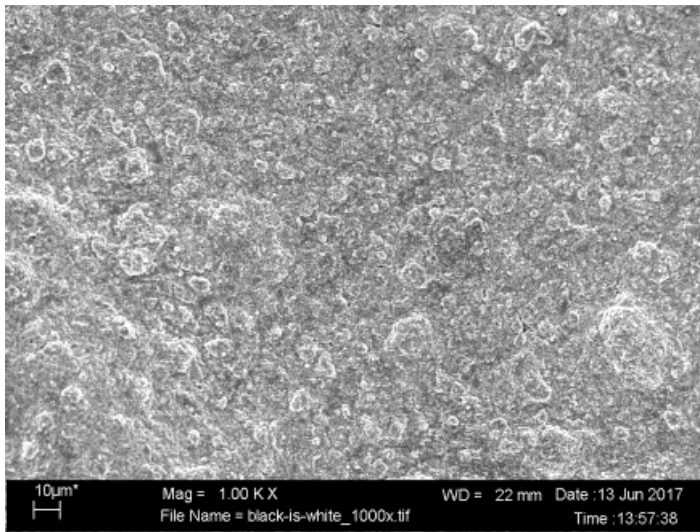


Abbildung 41 REM-Aufnahme in 5000-facher Vergrößerung der Zahnpasta Signal White now

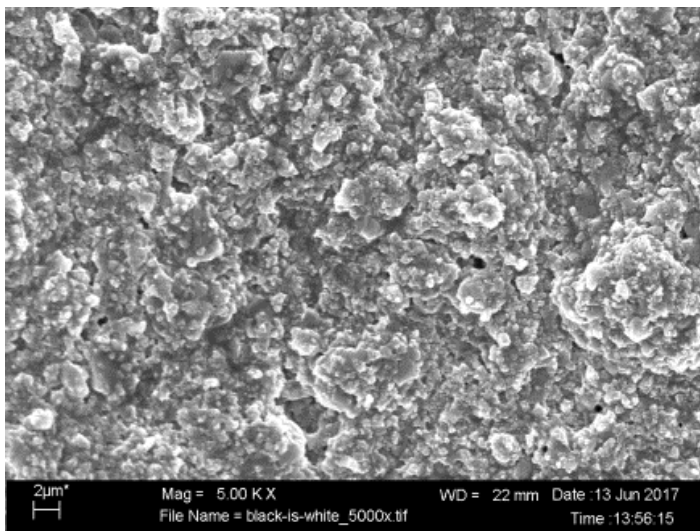
- homogene aber deutlich faltige Oberfläche
- keine abrasiven Partikel sichtbar
- leichte Einrisse der Oberfläche

Tabelle 40 REM-Aufnahmen der Zahnpasta Black is White in 1000-facher und 5000-facher Vergrößerung



- leicht unruhige Oberfläche
- abrasive Partikel noch nicht eindeutig erkennbar

Abbildung 42 REM-Aufnahme in 1000-facher Vergrößerung der Zahnpasta Black is White



- Rundliche, abrasive Partikel
- abrasive Partikel scheinen eher klein
- kaum spitze oder scharf-kantige Oberfläche

Abbildung 43 REM-Aufnahme in 5000-facher Vergrößerung der Zahnpasta Black is White

4 Diskussion

4.1 Methodenkritik

4.1.1 Probekörperherstellung

Bei der Herstellung der Probekörper wurden die Proben von CAD/CAM Blöcken abgesägt und konsekutiv den Versuchsreihen zugeordnet. Durch dieses nicht-randomisierte Vorgehen kann im Nachhinein nicht festgestellt werden, ob die Messergebnisse unabhängig oder durch eine abweichende Eigenschaft eines Blocks aus einer Charge bedingt sind. Durch die Verwendung nur einer Charge ist dies mit Rücksicht auf die industrielle Standardfertigung eher unwahrscheinlich. Allerdings können studienbedingte Prozesse ebenso zur Verfälschung von Messergebnissen führen. So musste etwa die Probe C135S und drei Perthometerlinien der Probe C133S aufgrund der großen, über eine Messstreuung nicht zu erklärende Diskrepanz zu den restlichen Daten von der Auswertung ausgeschlossen werden.

Daher ist es generell empfehlenswert, wie bei Schweitzer et al. beschrieben, Proben bei Versuchsreihen randomisiert gleichhäufig auf die verschiedenen Messreihen aufzuteilen [151].

Das Einbettverfahren der Proben in Palavit G[®] mit anschließender Glättung der Oberfläche und Vergütung konnte nicht bei allen Proben gleichartig durchgeführt werden. Die Proben von Celtra Duo mit der glasierten Oberfläche mussten vor dem Einbetten einen Glasurbrand mit Glasurmasse bei 1400°C erhalten. Die Glasurmasse der Celtra Duo Proben kann, laut Hersteller, zur Strukturierung der Oberfläche genutzt werden. Die Oberflächenglasur wurde, wie in der Anleitung des Herstellers empfohlen, aufgetragen. Allerdings führte das Fließverhalten der Masse im Schlickerzustand nach dem ersten und zweiten Glasurbrand zu einer makroskopischen Struktur, die das Einbetten der Proben auf andere Art erforderten. Hieraus resultierte ein nicht einheitlicher und häufig unebener Übergang von Polymereinbettung (Palavit G[®]) zur Keramik-Probe. Die später verfügbaren Glasurmassen (Markteinführung laut Dentsply Sirona: 12.03.2021) Dentsply Sirona Universal Spray Glaze und Dentsply Sirona Universal Spray Glaze Fluo hätten gegebenenfalls in einer glatteren Oberfläche resultiert.

Der Übergang wurde manuell mit dem Handstück und einem weißen Polierer mit eingelagerten Diamantpartikeln im Kunststoffbereich geglättet. Es ist nicht davon auszugehen, dass dies zu einer Alteration der Keramikoberfläche führte.

Die Proben der Gruppen „poliert“ (Vita Enamic und Celtra Duo) sowie Vita Enamic glasiert wurden nach dem Einbetten in Palavit G® mit manuellem Druck an einer rotierenden Scheibe bis zur Körnung von 6000er Körnung geglättet. Dadurch kann eine approximativ gleichmäßige Politur der Oberflächen gewährleistet werden. In der zahnärztlichen wie auch zahntechnischen Praxis ist eine solche standardisierte Politur der Materialien nicht möglich; man muss hier von einem best-case Szenario ausgehen.

4.1.2 Qualitative und Quantitative Oberflächenmessverfahren

Rauigkeitsmessung

Bei der Oberflächenanalyse kann durch taktile oder optische Abtastung der Oberfläche mittels Perthometer die Oberfläche linienförmig erfasst werden [182]. In dieser Studie wurde ein Perthometer der Firma Mahr mit einer Messnadel unter direktem Kontakt der Probe, wie bereits in vorausgegangenen Studien [57, 121, 152, 162, 169], verwendet. Aus dem Oberflächenprofil können mittels Software verschiedene Rauigkeitsparameter errechnet werden; vorliegend Ra und Rz. Der Rauigkeitswert Ra beschreibt den arithmetischen Mittelwert der zweidimensionalen Oberflächenrauigkeit in der vertikalen Ebene. [136]. Der arithmetische Mittelrauigkeitswert Ra ist stabil gegenüber Ausreißern und wird in vielen Arbeiten als alleiniger Indikator für die Oberflächenrauigkeit verwendet [85, 95, 121, 152]. Ra kann aber nicht zwischen Auf- und Abtrag unterscheiden wohingegen Rz bei Oberflächenveränderungen sehr sensibel im Sinne von positiven und negativen Peaks reagiert und daher oft ergänzend zu Ra hinzugezogen wird [57, 91, 162]. Gelegentlich wird auch Rz als alleiniger Rauigkeitsparameter für die Oberflächenrauigkeit herangezogen [40, 169].

Bei Okamura et al. wurden zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit die Werte Ra, Rz und Sa verwendet [126].

Zur Oberflächenmessung (Perthen, Mahr) mussten die Proben über einen Stempel waagrecht auf eine Glasplatte gepresst werden.

Dadurch sollte gewährleistet sein, dass die Messnadel des Profilometers ausschließlich die Abweichungen des Profils vor und nach der Putzintervention misst. Da dies manuell durchgeführt wurde, konnte nur eine annähernd gleiche Kraft angewendet werden, und die horizontale Ausrichtung planparallel zur Messebene war nicht voll kontrollierbar.

Die resultierenden zweidimensionalen Messlinien der Perthometermessung können in einer Reihung zusammengesetzt dreidimensionale Abbilder der Oberflächen erzeugen. Hier werden diese Ausrichtungsfehler der Proben sichtbar (s. Abbildung 15 auf Seite 49, Abbildung 16 und Abbildung 17 auf Seite 49).

Der durch die manuelle Einbettmethode unebene Übergang von Keramik-Probe zur PMMA-Oberfläche ließ keine Messung vom ungeputzten in den geputzten Bereich zu. Die Länge der Profillinien musste daher anhand der kleinstmöglichen Feldgröße um -2 mm/ -3 mm auf 12-13 mm angepasst werden.

In diesem Fall wäre eine kontaktlose Profilometrie mittels Laser von Vorteil. Beim Vergleich der kontaktlosen Profilometrie mit Kontaktprofilometrie konnten ähnliche Ergebnisse für die Werte von Ra auf dentalen Geweben und Restaurationsmaterialien gemessen werden [182], wobei der Wert Ra aber nicht als alleiniger Wert für die Feststellung der Oberflächenrauigkeit empfohlen wird [182].

Glanzmessung

Der Glanz einer Restauration kann durch den Patienten, den Zahntechniker und Zahnarzt subjektiv beurteilt werden. Die technische Glanzmessung ist ein objektives und reproduzierbares Messverfahren. Es wird die Reflexionsfähigkeit der Oberfläche durch einen Lichtstrahl mit definiertem Messwinkel gemessen. Das Glossometer misst die Reflektion des im 60° einfallenden Lichtstrahls mittels einen optischen Sensors. Je höher die Streuung des zurückgeworfenen Lichtes, desto niedriger der Glanzwert in GU. Der Lichtreflex auf der zu messenden

Oberfläche wird mit dem Standardwert eines schwarzen Glases (= 100 Glossunits) verglichen. Der angegebene Wert wird in Prozent angegeben.²¹

Je matter oder unebener die zu messende Oberfläche, desto geringer ist der resultierende Glanzwert, da mehr Licht auf der Oberfläche gestreut wird [125]. Es resultiert ein Glanzwert, welcher prozentual in Glossunits (GU) angegeben wird. Gloss Units (GU) stellen so ein Maß für die Ebenheit einer Oberfläche dar, welche so nicht nur subjektiv beurteilt werden, sondern auch objektiv gemessen werden kann. Die Glanzmessung wird in vielen Abrasionsstudien zusätzlich zur Rauigkeitsmessung eingesetzt [85, 91, 95, 126, 152].

Die technische Anforderung (plane Oberfläche) an die Glanzmessung ist für konvexe und konkave Geometrien der Zahnformen nicht anwendbar und daher in der klinischen und zahntechnischen Routine zur Qualitätssicherung derzeit noch nicht einsetzbar. Allerdings wurde bereits untersucht, dass für das menschliche Auge ab einem Glanzwert von circa 70 GU keine weiteren Abstufungen des Glanzes zu höheren Werten unterscheidbar sind [165]. Da die Oberfläche von Celtra Duo durch die Glasurmasse eine unebene Struktur erhalten hat, wirkt sich dies auch auf die Glanzwertmessung aus. Die Glanzwerte waren hier bereits vor der Putzintervention deutlich niedriger als die der anderen Gruppen. Die Differenzen lagen zwischen - 34,09 GU zu Vita Enamic poliert und - 62,16 GU zu Celtra Duo poliert.

21 http://www.zehntner.com/download/prospekt_intro_gloss_d_e.pfd (Zehntner. Glanzmessung Einleitung)

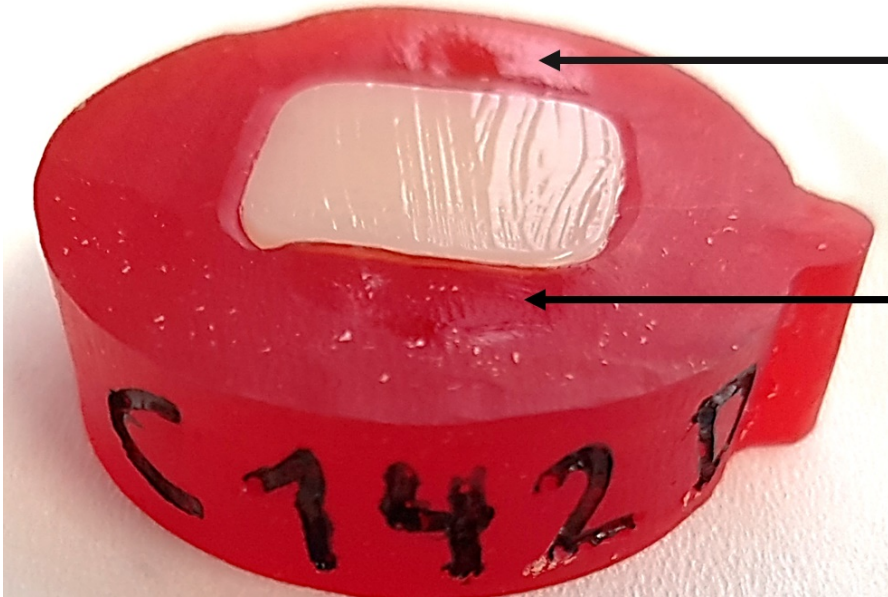


Abbildung 44 Celtra Duo glasiert Probe C142E nach der 1-jährigen Reinigung mit der Zahnpasta Elmex. Bei der Keramikprobe fällt die wellenförmig, makroskopisch strukturierte Oberfläche der Glasurmasse auf. Weiter befand sich zwischen den Pfeilspitzen die Bewegung des Bürstenkopfes und man sieht den Abtrag von Palavit G® außerhalb der Keramikprobe in Form einer Mulde im Probenkörper.

Die Glanzmessung kann daher für die Probenoberflächen Celtra Duo „glasiert“ keine eindeutige Aussage über Veränderung des Glanzwertes und Abtrag nach der Putzintervention geben. Durch die unebene Oberfläche wurde der einfallende Lichtstrahl bereits vor der Putzintervention stark gestreut. Dieses Problem der Oberflächenwelligkeit wird auch bei der Beurteilung des Abtrags durch abrasive Partikel einschlägig (s. Abrasionsfestigkeit der Materialien auf Seite 119). Dass die optischen Eigenschaften von CAD/CAM-Materialien von der Art der Oberflächenbearbeitung abhängen, haben Kilinc & Turgut in ihrer Studie untersucht. Für Vita Enamic konnten sie, im Sinne der Verfärbungsresistenz und Farbstabilität, die Verwendung der Glasurmasse empfehlen, während für Lava Ultimate und Cerasmart die Politur die Vergütung der Wahl darstellt [89]. Die Beständigkeit der Glanzwerte einer Restauration nach der Zahnbürstenabrasion ist außerdem abhängig von der Polymermatrix, der Größe der Füllkörper, der Form der Füllkörper und der Art der Silanisierung [91].

Weiter bedingt die Zusammensetzung der Materialien das Ausmaß des Glanzpotentials.

Bei Kompositen scheinen der prozentuale Anteil und die Größe der Füller einen Einfluss auf den Glanz zu haben. Denn, in einer Studie von Campbell PM et al. wird dies mit der Lichtbrechung an der Grenze der Matrix zu den Füllern erklärt; woraus sie folgern: Je geringer der Anteil an Quarz, desto höher ist der Glanz [30].

Wie in einer weiteren Untersuchung bereits durchgeführt [120], wurde in dieser Arbeit eine dreifache Messung des Glanzwertes auf jeder Probe an jeweils drei Stellen durchgeführt.

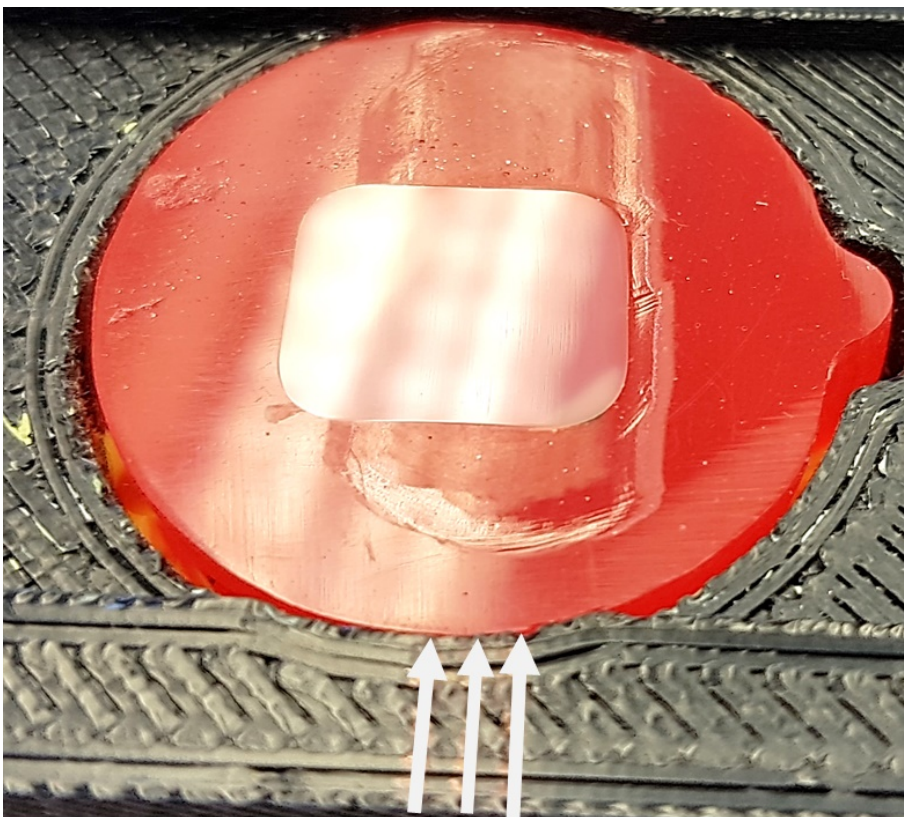


Abbildung 45 Vita Enamic Probe poliert nach der simulierten Putzintervention. Durch den Lichteinfall ist zentral das Putzfenster zu erkennen. Die weißen Pfeile deuten auf die drei Messlinien zur reproduzierbaren Positionierung des Glossometers

Bereits bei Vormessungen wurden ansteigende Werte des Glossometers auf der gleichen Probenoberfläche bei Messwiederholung festgestellt. Daher wurde das Glanzmessgerät nach der Messung einer jeden Probe kalibriert, bevor die nächste Probe gemessen wurde. Dennoch sind ansteigende Werte innerhalb der durchgeführten Messreihen bei jeder Probe im Ergebnis sichtbar, die außerhalb eines statistischen Zufalls liegen und ein geräteimmanentes Problem darstellen können. Diese Abweichung ist mit 2 GU absolutem Anstieg und somit etwa 1 GU Messunsicherheit zu bewerten. Statistisch dürften die Messungen im Mittelwert an den drei Stellen und bei der dreifachen Wiederholung diesen Wert nicht überschreiten sowie auch im Mittelwert der Messwertbreite (range) keine darüber hinausgehenden Schwankungen aufweisen (s. Abbildung 46 und Abbildung 47).

Label ● L1 ● L2 ● L3 ● M1 ● M2 ● M3 ● R1 ● R2 ● R3

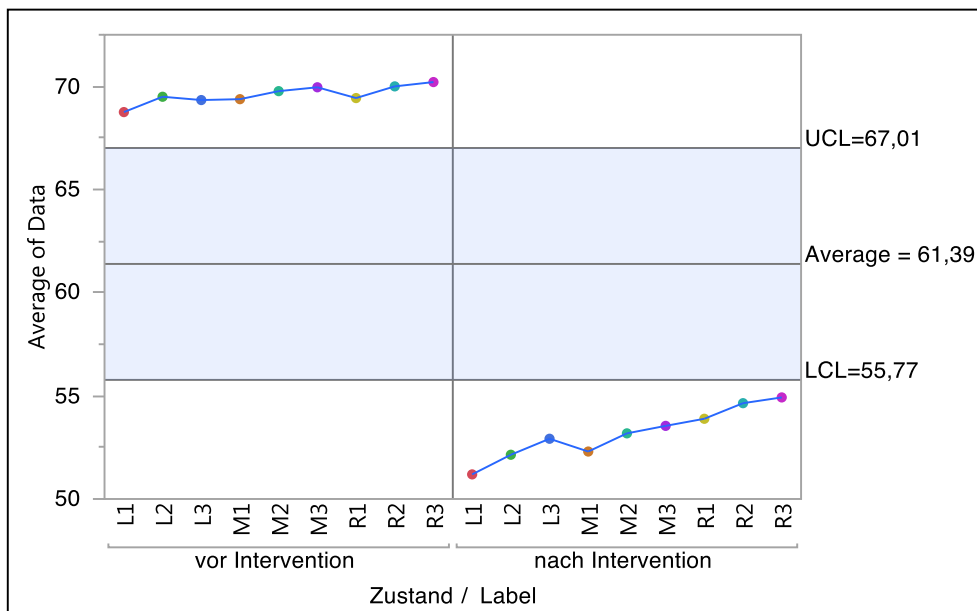


Abbildung 46 Im Mittelwert ansteigende Glanzwerte von allen durchgeführten Messungen auf allen Proben mit je 9 Messwerten von jeweils 3 Messungen an den drei Messpositionen (L, M, R).

Label ● L1 ● L2 ● L3 ● M1 ● M2 ● M3 ● R1 ● R2 ● R3

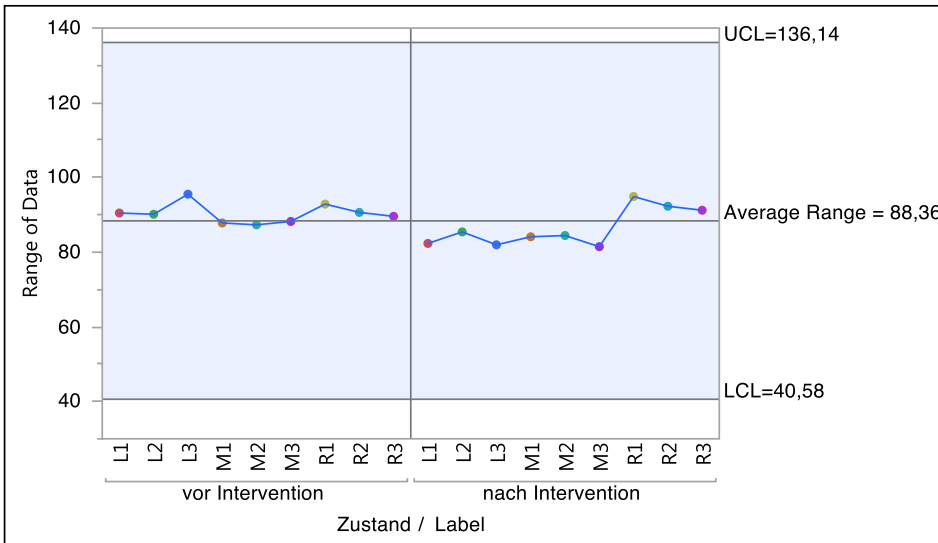


Abbildung 47 Variation der Oberflächenglanzwerte bei allen durchgeführten Messungen. Es wurden je drei Messungen pro Position erhoben. L bezeichnet die linke, „M“ die mittlere und „R“ die rechte Messposition jeweils im Abstand von 1 mm.

REM-Aufnahmen

Bei der REM-Messung wurden pro Probenreihe vor der Putzintervention eine von neun Proben zufällig ausgewählt, welche vor und nach der Putzintervention mittels Raster-Elektronen-Mikroskopie in mehreren Vergrößerungen fotografiert wurde. Vorgelegt wurden in dieser Arbeit nur die Aufnahmen in 5000-facher Vergrößerung, da hier die wesentlichen qualitativen Merkmale sichtbar wurden. Die Region of Interest (ROI) lag zentral auf der Materialprobe um im Putzfenster zu liegen. An jeder Probenseite im Bereich des PalavitG® auf halber Distanz wurden Punkte eingraviert. Mithilfe dieser Orientierungspunkte konnten die Aufnahmen in der Probenmitte durchgeführt werden, da anhand der Punkte die Mitte der Proben angesteuert werden konnte. Somit war zudem eine hohe Wahrscheinlichkeit gegeben, den vergleichbaren Zielkorridor in der Zweitmessung wieder aufzufinden und abzubilden. Die Nutzung von REM/ SEM-Aufnahmen zur Bewertung der Oberflächen ist in vielen Studien zusätzlich zur Rauigkeitsmessung oder Glanzmessung beschrieben worden [40, 85, 121, 152, 162, 169].

4.1.3 Rahmenbedingungen der Putzintervention

Putzdauer

Da die tägliche Zahnputzzeit von zwei mal zwei Minuten durch in elektrischen Zahnbürsten eingebauten Timern festgelegt ist, wurde bei diesem Versuchsaufbau von der Verwendung von Zyklen abgesehen.

Würde man die Putzzeit mit zweimal täglich zwei Minuten gleichmäßig auf alle Zahnflächen verteilen, so kommt man bei 72 Zahnflächen (2 Frontzahnflächen, 3 Seitenzahnflächen) auf 3,3 Sekunden pro Fläche pro Tag. In der Dissertationsschrift von Bösch führte diese Kalkulation ohne Berücksichtigung einer längeren Putzzeit der Frontzähne zu einer simulierten Putzintervention von 2 Jahren durch eine Putzzeit von 40 Minuten und 30 Sekunden [27]. Auch Koizumi et al. berechnet eine simulierte Putzdauer von 2 Jahren mit 40,5 Minuten [91].

Bei der Berücksichtigung einer verlängerten Putzdauer in ästhetisch wichtigen und für die Patienten einfach zu reinigenden Flächen, kann für die simulierte Putzintervention von einem Jahr eine längere Putzdauer veranschlagt werden.

Anhand der Daten aus Harnacke et. al [67] wurden die Proben in der vorliegenden Arbeit für eine Dauer von je 49 Minuten (vergleichbar mit der Zahnbürsteneinwirkung über ein Jahr) geputzt. Zum Zeitpunkt der Studienplanung und auch Schriftlegung lagen keine anderen empirischen Erkenntnisse zur Putzdauer im Sextant der Oberkieferfront vor. Da es sich bei der zugrunde liegenden Untersuchung um ein videobasiertes Tracking handelt, würdigten die Autoren die erhobenen Putzzeiten und das Putzverhalten in Folge sozialer Erwünschtheit bei manchen Teilnehmern als etwas überschätzt. Allerdings wurde bereits in anderen Studien festgestellt, dass das Verhalten und insbesondere das Putzverhalten durch Beobachtung nicht beeinflusst wird [108, 186, 187].

Laut Koizumi et al. entspricht eine simulierte Putzintervention von 120 Minuten ca. 20.000 Zyklen einer Putzdauer von 5 Jahren [91].

Würde man diese simulierte Zeit auf die Werte von Saxer et al. umrechnen, entsprächen die 120 Minuten einer Dauer von 7 Jahren [91].

Bis zu diesem Zeitpunkt fehlten Langzeitstudien zur Abrasion bei Verwendung einer elektrischen Zahnbürste [115].

Bei Verwendung einer elektrischen Zahnbürste 2x täglich für 3 min über 3 Monate kommt man auf eine maximale (vom Hersteller empfohlene) Verwendungsdauer von 9 Stunden. Da die Bürstenköpfe bereits nach 6 Stunden ausgetauscht wurden besteht hier die Sicherheit, dass die Bürstenköpfe zu keinem Zeitpunkt zu stark abgenutzt waren.

Anpressdruck

Der auch in dieser Studie angewandte Anpressdruck von 150 g (1,5 N) beim Abrasionsversuch liegt unter dem maximal empfohlenen Anpressdruck von 2 N (200 g) und wurde auch in anderen Studien verwendet [111, 114]. Der Anpressdruck in anderen Studien variiert zwischen 0,8 und 2,5 Newton (80-250 g) wobei laut McCracken et al. die Plaquereduktion bei Überschreiten von 1,5 N nicht weiter erhöht wird [33, 114].

Verwendete Zahnbürsten und Bewegungsablauf

Durch die rotierende und oszillierende Bürste der elektrischen Zahnbürste Oral B 500 mit ca. 7.600 Rotationen und 20.000 Pulsationen pro Minute kann klinisch bereits ein guter Reinigungseffekt erzielt werden; obgleich sie Vorgänger der „aktuell“ noch am häufigsten genutzten elektrischen Zahnbürste ist [88]. Die Art der Putzbewegung scheint einen Einfluss auf den Substanzabtrag bei der Abrasion zu haben. Gleitbewegungen und reziproke Bewegungen können zu einer Akkumulation der abrasiven Partikel und zu einem geringeren Substanzabtrag führen. Kreuzbewegungen und Zick-Zack-Bewegungen sowie rotierende und pulsierende Bewegung führen zu einer verringerten Akkumulation der abrasiven Partikel [48].

Nach der Empfehlung der American Dental Association wurden die Bürstenköpfe so gewechselt, dass eine maximale Anwendungsdauer von 3-4 Monaten²² nicht überschritten wurde (s. auch erstes Unterkapitel Putzdauer).

²²<https://www.ada.org/en/member-center/oral-health-topics/toothbrushes> (letzter Zugriff: 07.11.2021)

Laut einer Umfrage benutzen im Jahr 2020 etwa die Hälfte (55,5%) der befragten eine Handzahnbürste anstelle einer elektrischen Zahnbürste. Eine elektrische Zahnbürste von Oral-B wird unter den Befragten mit 21,6% am häufigsten genutzt.²³

4.1.4 Abrasionsfestigkeit der Materialien

Bei der Abrasion führen Bewegungen von „härteren“ Grundkörpern zum Verschleiß einer „weicheren“ Oberfläche im Sinne von Ritzungen. Da die Abrasivität einer Polyamid-basierten Zahnbürste ohne vorhandene Abrasivstoffe zu vernachlässigen ist, stellt das Zwischenmedium mit seinen abrasiven Partikeln den wesentlichen Faktor der Abrasivität auf die Oberflächen dar [185].

Es liegen bereits Studienergebnisse über das Abrasionsverhalten von verschiedenen aber zu dieser Studie unterschiedlichen „neuen“ CAD/CAM Materialien vor: Bei polymerinfiltrierten Keramiken wurde beobachtet, dass durch die Putzintervention die weicheren Polymeranteile herausgelöst werden, wobei die härteren keramischen Bestandteile bestehen bleiben [123].

Bei der Bürstenabrasion bewegt sich das Zwischenmedium mit seinen abrasiven Partikeln durch die Zahnbürste angetrieben über die zu prüfende Oberfläche [48]. Die Kontaktfläche zwischen Oberfläche und Abrasivum wird durch Oberflächenrauigkeiten verkleinert. Denn bei einer „unebenen“ Oberflächenmorphologie ergibt sich dadurch eine kleinere reelle Kontaktfläche. Zudem kann es zu einer Einlagerung von abrasiven Partikeln in die Vertiefungen und (Mikro-)Rauigkeiten kommen, dem sogenannten Mikro - und Makroschlupf. Infolgedessen werden die abrasiven Bestandteile der Zahnpasta über diese Schicht bewegt und können keinen oder einen verringerten Verschleiß erzeugen [27, 48].

²³<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/171577/umfrage/verwendete-marken-von-elektrischen-zahnbuersten/> (letzter Zugriff 30.05.2021)

Wenn eine Oberflächenzerrüttung im Sinne von mikrostrukturellen Veränderungen den maßgeblichen Verschleißmechanismus darstellt, tritt der messbare Verschleiß erst nach einer bestimmten Zeit auf [48].

Materialbestandteile

Die mechanischen und physikalischen Eigenschaften von Kompositen werden stark durch die organische Matrix beeinflusst [154]. Bei dem Vergleich von fünf direkten Restaurationsmaterialien war die Oberflächenrauigkeit nach der simulierten Zahnbürstenabrasion auf dem Hybridkomposit und dem mikrogefüllten Komposit erhöht [123].

Bei einer Polymermatrix und „harten“ Fillern eines Kompositmaterials können größere Mengen an Matrix herausgelöst werden. Das führt zu verringerten Glanzwerten und einer erhöhten Oberflächenrauigkeit [91]. Aber auch die Größe der Füllkörper spielt bei der Abnutzung durch Zwei-Körper-Abrieb eine Rolle. Die größeren Füllkörper neigen dazu, bei der mechanischen Belastung durch den Antagonisten durch Lockerung verloren zu gehen [170], während bei kleinen Füllkörpern eine Verdichtung erreicht werden kann [163, 170]. In der folgenden Abbildung 48 auf Seite 121 ist die Probe Celtra Duo poliert nach der einjährigen simulierten Putzintervention mit Elmex und der Reinigungspasta Depurdent zu sehen. Die PMMA-Oberfläche aus Palavit G® ist vertieft, während keine Oberflächenveränderung auf Celtra Duo mit bloßem Auge erkennbar ist.



Abbildung 48 polierte Celtra Duo Oberfläche nach der simulierten einjährigen Putzintervention mit der Reinigungszahnpasta Depurdent. Der Abrasive Verlust des PMMA ist am Übergang zur Keramikprobe sichtbar.

4.1.5 Einfluss des Zwischenmediums

In der vorliegenden Studie wurden Zahnpasten mit vergleichsweise hohem RDA-Wert eingesetzt, um ein „worst-case Scenario“ für die Restaurationen im ästhetischen Bereich zu simulieren. Als handelsübliche Standard-Zahnpasta zum Vergleich wurde die margenstarke Marke „Elmex“ verwendet. Die Einflüsse des RDA-Wertes, welcher nur eine Referenz zur Abrasivität darstellen kann, auf die Abrasion wird, wie in den folgenden Studien dargestellt, kontrovers diskutiert. Heintze et al. konnte eine starke Zunahme der Oberflächenrauigkeit bei Verwendung einer Zahnpasta mit einer hohen Anzahl an Schleifkörpern nachweisen [71].

Je höher der RDA einer Zahnpasta, desto höher die Abnutzung und die Oberflächenrauigkeit der dentalen Materialien [113].

Scherge et al. stellte beim Vergleich dreier Produkte mit RDA-Werten von 30, 75 und 165 einen linearen Zusammenhang zum Substanzabtrag fest [147].

Im Gegensatz dazu beschreibt eine andere Studie, dass eine Zahnpasta mit einem hohen RDA-Wert nicht zwangsläufig zu einer raueren Oberfläche führt [77] und damit einen schlechten Indikator für die Abrasivität einer Zahnpasta darstelle [81].

Zusammenfassend kommt Bösch in seiner Dissertation zu dem Schluss, dass Produkte im RDA-Bereich zwischen 30-100 den Substanzabtrag nur unwesentlich verändern und der Substanzabtrag unabhängig von der Größe und Form der abrasiven Partikel; aber durchaus abhängig von der Konzentration der enthaltenen abrasiven Partikel ist [27, 52].

Da die Proben vor der Putzintervention trocken gelagert wurden, kann dies einen Einfluss auf die Abrasionsfestigkeit des Materials haben. Bei einigen Studien wurden die Proben vor dem Putzversuch in entionisiertem, 37 °C-temperierten Wasser gelagert [87]. Bei Lagerung in künstlichem Speichel konnte ein signifikant erhöhter Abtrag von Schmelz boviner Frontzähnen festgestellt werden [7].

Die Konzentration von Zahnpasta zu Speichel in vitro kann kaum nachgeahmt werden. Die Speichelflussrate führt im Verlauf des Putzvorganges zu einer fortwährenden Verdünnung der Zahnpastakonzentration und mindert so in vivo die Abrasion der Zahnpasta mit der Dauer der Anwendung.

Das Mischungsverhältnis des Slurrys wurde in Anlehnung an die ISO-Norm bei Abrasionsversuchen und wie bereits in vorhergegangenen Studien angewendet [31, 166, 178]. Lussi et al. sieht keinen Einfluss durch den pH-Wertes des Slurrys auf die Substanzverluste durch Abrasion [106].

Bei den Zahnpasten mit Natriumlaurylsulfat als Schaumbildner zeigte sich eine geringere Abrasion auf Dentin [118].

Abrasive Partikel

Je nach Härte und Geometrie der abrasiven Körper im Vergleich zum zu prüfenden Material wird bei dem Zwischenmedium zwischen weich und hart unterschieden.

Die Art der Putzkörper in Zahnflegeteprodukten variiert. Häufig sind Silica (Kieselerde) und Kalziumkarbonat enthalten. Auch abrasive Partikel aus Polyethylen werden in neueren Produkten eingesetzt. Partikel wie Aluminiumoxid und Perlite sind aufgrund ihrer hohen Abrasivität nur in geringen Mengen von 1-2 Gew.-% beigefügt [79, 104].

Zahnpasta mit Siliziumdioxid als Schleifkörper scheinen einen kleineren Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit zu haben als Zahnpasten mit Natriumhydrogenkarbonat [153]. Wegen der geringen Abrasivität von Natriumhydrogenkarbonat ist es häufig in höherer Konzentration (~ 50 Gew.-%) beigefügt [104].

Größe und Konzentration der Abrasiva

Bei der Größe der abrasiven Partikel scheint es eine kritische Partikelgröße (**Critical Particle Size**) zwischen 30-100 µm zu geben. Besonders kleine Partikel bis 20 µm führten zu einem größeren Abtrag [35]. Auch die Menge der Abrasiva scheint einen Einfluss auf den Substanzabtrag zu haben.

Ab einer Konzentration von 33 Gew.-% der abrasiven Partikel (RDA 90 und 200) konnte ein signifikanter Abtrag von Dentin verzeichnet werden. Beim Zahnschmelz führt auch eine Erhöhung der Putzkörperkonzentration auf bis zu 80 Gew.-% nicht zu einem erhöhten Abtrag [61].

Dieses Ergebnis korreliert mit dem linearen Anstieg des RDA-Wertes bei Siliziumdioxid-Konzentrationen von 5-10% und weiteren Studienergebnissen zur Beziehung von Putzkörperanteil und Substanzabtrag [27, 62].

4.1.6 Grenzen der vorliegenden Untersuchung

Bei dem Test auf Normalverteilung mittels Shapiro Wilk Tests und der deskriptiven Darstellung der Rohdaten wurden bei den Ra-Werten der Proben C133S und C135S eine starke Abweichungen zu den Werten der restlichen Proben festgestellt (s. Abbildung 49). Unter Annahme von Prozess-, Mess- oder Softwarefehlern bei der Berechnung, die mit Rücksicht auf die Außergewöhnlichkeit und qualitativen Unerklärbarkeit bei retrospektiver Ursachensuche geschlossen wurde, folgte der Ausschluss dieser Messwerte von Probe (C135S komplett und C133S bei den Messlinien 9, 10 und 11) (s. Abbildung 50). Dadurch konnte eine Normalverteilung erreicht und ein Bias der Rohdaten in den weiteren Auswertungen ausgeschlossen werden (s. Abbildung 50).

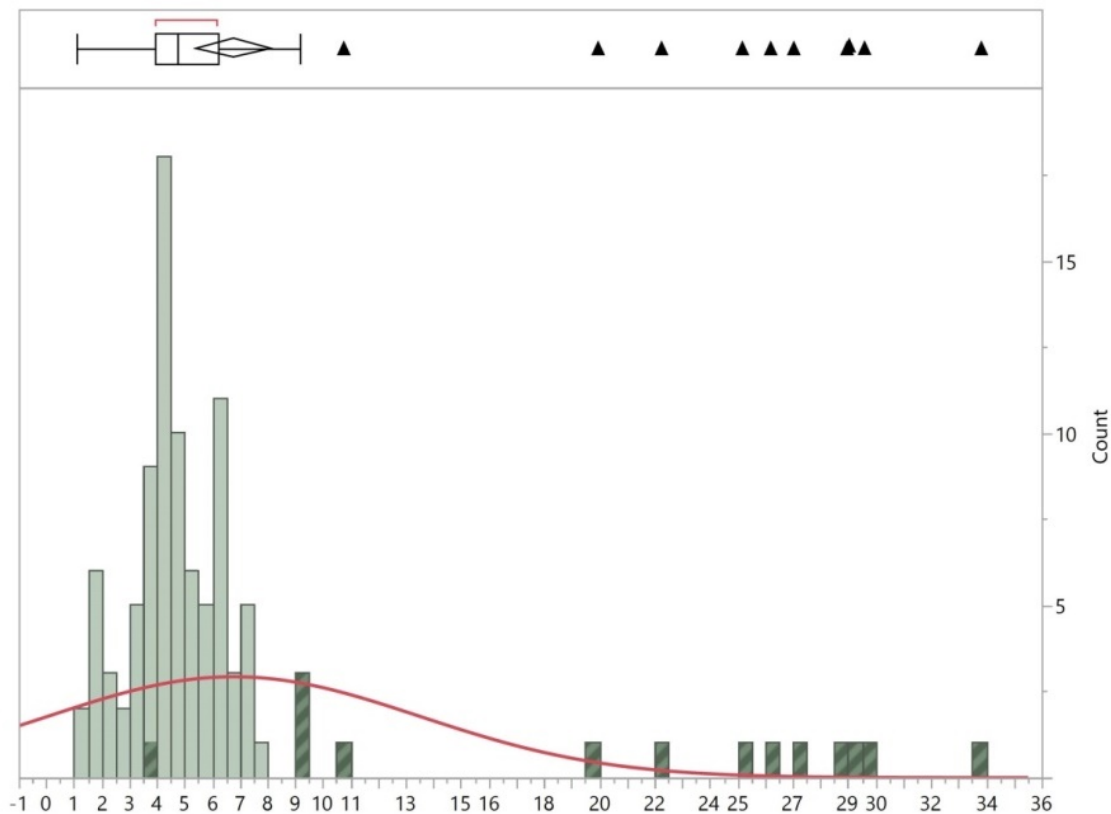


Abbildung 49 Darstellung der Normalverteilung des Ra-Wertes aller Proben Celtra Duo glasiert. Die dunkelgrün schattierten Säulen im rechten Bildbereich liegen weit außerhalb des oben dargestellten Boxplots. Sie stellen die Ausreißer der Proben C135S und C133S dar, welche im weiteren Verlauf der Auswertung ausgeklammert werden. Es wird von einem Mess- Prozess- oder Softwarefehler ausgegangen, da retrospektiv keine qualitative Erklärung möglich war.

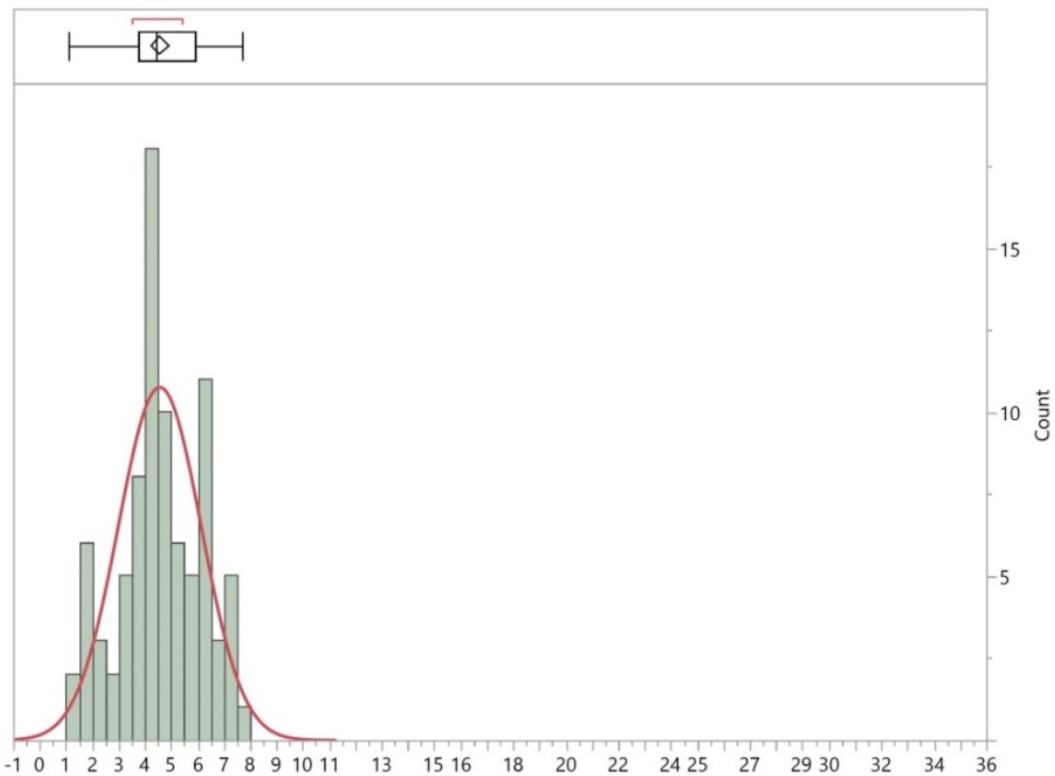


Abbildung 50 Grafik der Normalverteilung des Ra-Wertes aller Celtra Duo Proben glasiert unter Ausschluss der Ausreißer (C135S:1-11, C133S:9-11)

Im weiteren Verlauf der Auswertung fiel die Probe C115 D auf, (Abbildung 51, S. 126 und im Ergebnisteil Abbildung 25, Abbildung 26 auf Seite 61f) welche ebenfalls nach der Putzintervention mit Elmex und Depurdent abweichende Werte aller Perthometerlinien aufwies. Nach Putzintervention mit Elmex sind die Werte der Probe C115 D in der Abbildung 51 auf Seite 126 mit einem Stern “*” markiert, nach Putzintervention mit Depurdent ist die gleiche Probe C115 D mit einem „C „ markiert. Diese Probe wurde aufgrund der bereits weiter fortgeschrittenen Auswertung nicht mehr aus den Ergebnissen herausgenommen.

Dieses Vorgehen kann empirisch kritisiert werden, jedoch ist der Einschluss einer offensichtlichen Fehlmessungen, die sich in der Datenanalyse offenlegt ebenso kritisch zu betrachten und würde die Verlässlichkeit von Schlussfolgerungen weit mehr beeinflussen, als deren Berücksichtigung in den Rechnungen. [47]

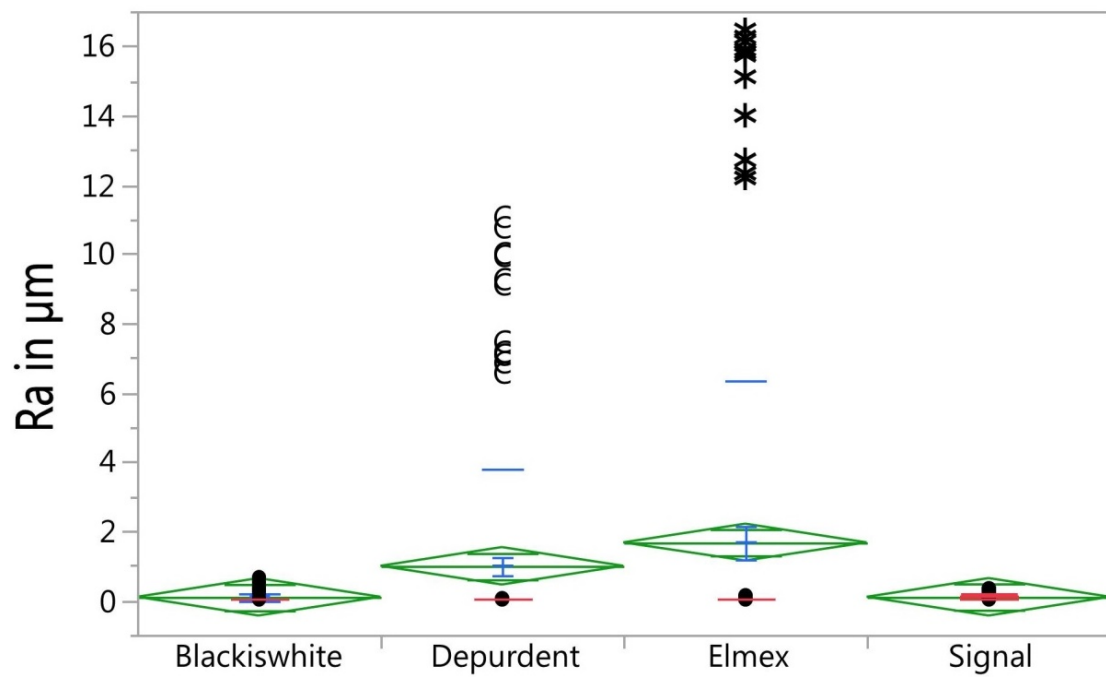


Abbildung 51 Verteilungen der Ra Werte von Celtra Duo, poliert nach Putzintervention. Der Ausreißer C115 D in der Abbildung markiert mit dem Symbol „*“ nach Putzintervention mit Elmex und mit dem Symbol „C“ nach der Putzintervention mit Depurdent.

4.2 Interpretation der Ergebnisse

4.2.1 Zustände und Veränderung der Oberflächentopographie

Da die Oberflächenrauigkeit für die intraorale Beständigkeit der Restaurationen und die Mundgesundheit eine entscheidende Rolle spielt, wurde, wie bereits auf Seite 110 in Absatz 4.1.2 beschrieben, zur Auswertung der Oberflächenrauigkeit der arithmetische Rauigkeitswert Ra und Rz herangezogen. In der Prüf-Norm DIN EN ISO 4287 wird zur Bestimmung der Oberflächenrauigkeit die Erhebung der Oberflächenparameter Ra, Rt und Rz empfohlen [27]. In vorangegangenen Studien wird häufig der arithmetische Mittelrauigkeitswert Ra als Maß für die Oberflächenrauigkeit gewählt [85, 95, 121, 152], in dieser Studie wurde ergänzend Rz hinzugezogen [57, 91, 162].

Taktil ist es für Patienten möglich die Veränderung der Oberflächenrauigkeit zwischen Ra-Werten von 0,25 µm bis 0,5 µm mit der Zunge zu unterscheiden [83].

Laut Bollen et al. wird ein Ra-Wert von > 0,2 µm als kritisch angesehen, da die Plaqueakkumulation ansteigt [26]. Auch laut Quirynen et al. geht eine um 0,2 µm (Ra betreffend) erhöhte Oberflächenrauigkeit mit einer nachweisbar erhöhten Plaqueanlagerung einher [25].

Visuell erscheint eine Oberfläche glatt, wenn die arithmetische Rautiefe Ra < 1 µm ist [34].

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der Versuchsreihen diskutiert und mit verfügbaren Ergebnissen anderer Studien verglichen.

In der Literatur gibt es aktuell noch wenige Ergebnisse zur Abrasionsfestigkeit von Celtra Duo. Da es sich bei Vita Surprinity um ein ähnlich aufgebautes ZLS-CAD/CAM-Material handelt, werden im Folgenden auch Ergebnisse dieses Materials zum Vergleich herangezogen. Erschwerend kommt hinzu, dass die Verschleißtests von Celtra Duo und Vita Surprinity zudem häufig im Kausimulator stattgefunden haben [44, 103]

Ausgangszustand der polierten Oberflächen beider Materialien

Beim Vergleich der Ausgangszustände erfolgt keine Zuordnung zu den Zahnpasta-Gruppen, da die Putzintervention noch nicht erfolgt ist. Bei der Gruppe „Depurdent“ bezieht sich der Ausgangswert daher ebenso auf den

Zustand vor der Intervention mit Elmex. Die Darstellung der Ra-Ausgangswerte aller Probenkörper findet sich auf Seite 131 in Abbildung 52 und auf Seite 131 auf Abbildung 53.

Celtra Duo poliert weist durchschnittliche Rauigkeitswerte von Ra: $0,09 \mu\text{m}$ (SD = $0,16$) und Rz: $1,14 \mu\text{m}$ (SD = $2,24$) auf.

Diese mittelwertigen Rauigkeitsparameter sowie die Streubreite der Parameter sind im Vergleich niedriger als die der polierten Oberflächen von Vita Enamic.

Nach der Vorpolitur hatte Celtra Duo in einer Studie von Matzinger et al. einen durchschnittlichen arithmetischen Rauigkeitsparameter Ra von $0,35 \mu\text{m} \pm 0,05$ [110]. Hiernach schloss sich noch eine Hochglanzpolitur an bei welcher Celtra Duo mit einem durchschnittlichen Rauigkeitsparameter Ra von $0,02 \mu\text{m} \pm 0,02$ im Vergleich zu Vita Surprinity und Vita Enamic den niedrigsten Ra-Wert aufwies. In einer anderen Studie konnte nach der Hochglanzpolitur von Vita Surprinity ein durchschnittlicher Rauigkeitsparameter Ra = $0,95 \mu\text{m} \pm 0,17$ gemessen werden [28]. Die unbearbeitete Oberfläche von Celtra Duo im Vergleich zur polierten oder glasierten Oberfläche wies in einer anderen Studie eine größere Anhaftung von Biofilm und eine geringere Biegefestigkeit auf [155].

Vita Enamic poliert weist vor der Putzintervention gegenüber Celtra Duo poliert deutlich höhere durchschnittliche Werte auf. Ra: $0,85 \mu\text{m}$ (SD = $0,70$) und Rz: $3,68 \mu\text{m}$ (SD = $3,49$). Die Oberflächen von poliertem Celtra Duo sind vor der Putzintervention glatter als die Oberflächen von poliertem Vita Enamic.

In anderen Studien ist der mittelwertige Rauigkeitsparameter von Vita Enamic poliert nach der Politur mit einer Körnung von P4000 mit MW Ra = $0,06 \mu\text{m}$ (SD = $0,008$) deutlich niedriger [85], bei Sen et al. nach Politur (P4000) mit MW: Ra= $0,697 \mu\text{m}$ in einem ähnlichen Bereich [152]. Bei einer anderen Arbeit konnte nach der Hochglanzpolitur von Vita Enamic ebenfalls eine glattere Oberfläche mit einem durchschnittlichen Ra-Wert von $0,26 \mu\text{m} \pm 0,08$ erzielt werden [28].

Vita Enamic hatte nach Oberflächenvergütung mittels Hochglanzpolitur bei der Arbeit von Matzinger et al. mit einem durchschnittlichen Rauigkeitsparameter von Ra = $1,5 \mu\text{m}$ und einer gemittelten Rautiefe von Rz = $2,3 \mu\text{m}$ höhere Werte als in der vorliegenden Arbeit [110].

Ausgangszustand der glasierten Oberflächen beider Materialien

Beim Vergleich der Ausgangszustände erfolgt keine Zuordnung zu den Zahnpasta-Gruppen, da die Putzintervention noch nicht erfolgt ist. Bei der Gruppe „Depurdent“ bezieht sich der Ausgangswert daher ebenso auf den Zustand vor der Intervention mit Elmex. Die Darstellung der Ra-Ausgangswerte aller Probenkörper findet sich auf Seite 131 in Abbildung 52 und Seite 131 auf Abbildung 53.

Die Rauigkeitsparameter der Oberflächen von Celtra Duo glasiert betragen vor Putzintervention im Mittelwert Ra: 3,72 μm (SD = 1,32) und Rz: 19,71 μm (SD = 9,91).

Der durchschnittliche Rauigkeitsparameter Ra von Celtra Duo glasiert ist höher als die in der Literatur häufig beschriebenen Empfehlung von Ra < 0,5 μm .

Eine klinisch erhöhte Plaqueanlagerung wäre demnach nach der Oberflächenglasur bei Celtra Duo zu erwarten.

In der Dissertation von Bösch hatte Vita Surprinity mit Glasurbrand und zusätzlicher Hochglanzpolitur vor der simulierten Putzintervention einen durchschnittlichen Ra-Wert von 0,49 μm und lag so knapp unter der Empfehlung von 0,5 μm [27]. Bei der Untersuchung von Siam et al. lag der durchschnittliche Rauigkeitsparameter Ra von Celtra Duo poliert mit 0,26 μm (SD=0,00) geringfügig höher als der von glasiertem Celtra Duo mit Ra= 0,25 μm (SD=0,01) [157]. Die in dieser Studie verwendete Glasurmasse oder das Brennprogramm sind nicht bekannt.

Die Oberflächen der glasierten Celtra Duo Proben in der vorliegenden Studie stellen sich in der qualitativen Oberflächenuntersuchung mittels REM homogen und glatt dar. Die Werte der Profilometrie (Ra und Rz) sind dagegen hoch und weisen damit auf eine raue und inhomogene Oberfläche hin. Diesen Werten entsprechend sind die gemessenen Glanzwerte in GU von Celtra Duo glasiert vor Putzintervention niedrig. Diese Diskrepanzen der glasierten Oberflächen von Celtra Duo zwischen den Rasterelektronenmikroskopie-Aufnahmen und den erhobenen Rauigkeitsparametern bei der Profilometrie wurde in einer anderen Studie bereits beschrieben [58].

Die Rauigkeitsparameter der Oberflächen von Vita Enamic glasiert betragen vor Putzintervention im Mittelwert Ra: 1,13 μm (SD = 0,62) und Rz: 5,69 μm (SD = 3,38).

Die Oberflächen von Vita Enamic glasiert weisen bei den Rauigkeitsparametern Ra und Rz im Durchschnitt deutlich niedrigere Werte auf als die Werte der glasierten Oberflächen von Celtra Duo.

Die Streuung der Werte ist bei Vita Enamic glasiert, im Vergleich zu Celtra Duo glasiert ebenfalls geringer.

Zusammenfassend ist Vita Enamic nach der Oberflächenvergütung durch die UV-lichthärtende Glasurmasse „glatter“ als Celtra Duo nach dem Glanzbrand mit Glasurmasse.

Für Vita Enamic konnte im Sinne der Oberflächenvergütung nach UV-Alterung und Messung der Farbparameter die Verwendung der entsprechenden Glasurmasse empfohlen werden [89].

Im Vergleich zu den polierten Oberflächen beider Materialien sind die glasierten Oberflächen rauer.

Statistische Betrachtung zum Ausgangszustand der Oberflächen beider Materialien

Die auf Seite 131 dargestellten Diagramme zeigen die Streuung der Ausgangswerte und lassen damit eine Aussage zur generellen Reproduzierbarkeit der Prüfkörper zu.

Zwar kann in Mittelwertvergleichen ein Effekt der Putzintervention generalisierbar ausgedrückt werden. Allerdings besteht bei hoher Streuung der Daten auch die Gefahr, dass Grenzwerteffekte „überblendet“ werden, weshalb der Vor- und Nachinterventions-Gruppenvergleich auf Basis individueller Differenzbildung im Matched-Pair-Verfahren Vorteile bei der Beurteilung zulässt [2, 3, 21, 23].

Daher wurde zusätzlich die Differenz untersucht (s. Kapitel 3.2.3 ab Seite 72) und im Weiteren in den Unterkapiteln ab Seite 132 diskutiert.

Vita Enamic

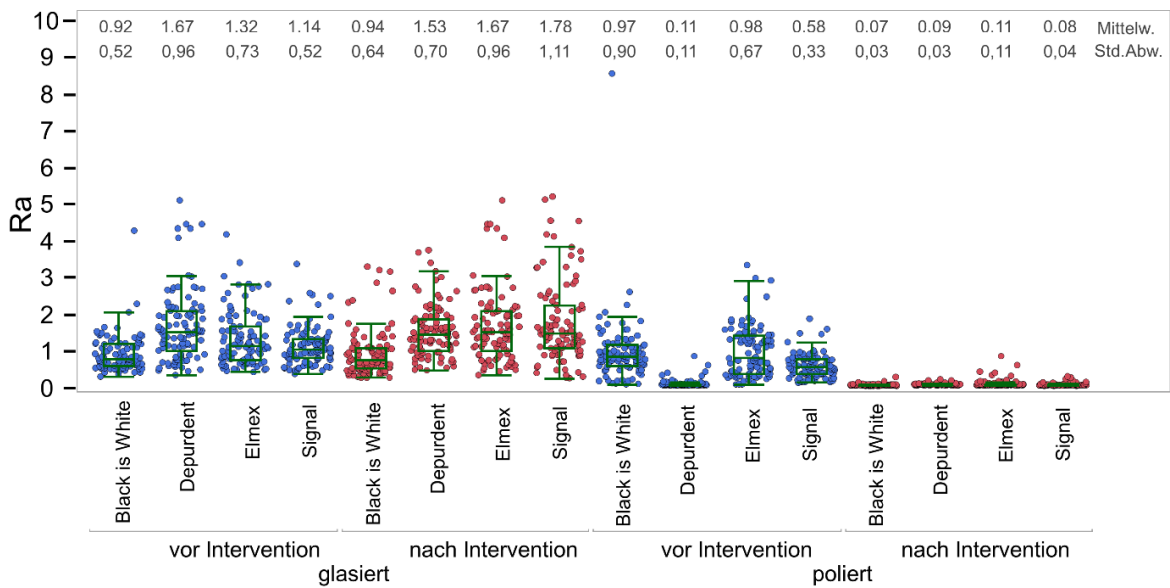


Abbildung 52 Darstellung der Oberflächenrauigkeit von Vita Enamic (mittels arithmetischem Mittelrauigkeitswert Ra in μm) auf der y-Achse. Auf der x-Achse werden die Variablen wie Oberflächenvergütung (Glaser und Politur), der Zustand (vor und nach Putzintervention) und die entsprechenden Zahnpasten aufgeführt.

Celtra Duo

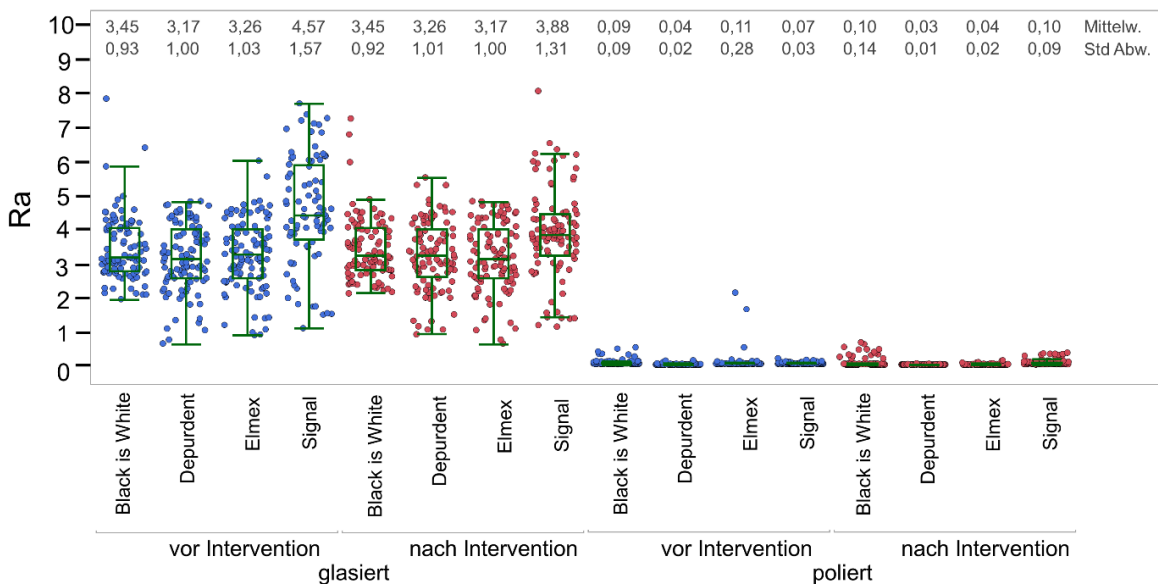


Abbildung 53 Darstellung der Oberflächenrauigkeit von Celtra Duo (mittels arithmetischem Mittelrauigkeitswert Ra in μm) auf der y-Achse. Auf der x-Achse werden die Variablen wie Oberflächenvergütung (Glaser und Politur), der Zustand (vor und nach Putzintervention) und die entsprechenden Zahnpasten aufgeführt. Die Probe C115 D wurde aufgrund starker Abweichung von den restlichen Ergebnissen ausgeschlossen.

Auswirkung der Interventionen auf poliertes Vita Enamic

Die durchschnittlichen Werte der Oberflächenparameter Ra und Rz werden durch Putzintervention mit den in dieser Studie genutzten Zahnpasten verringert. Daher scheint die Oberflächenrauigkeit durch die simulierte einjährige Putzintervention mit Black is White, Elmex, Depurdent und Signal abzunehmen. Auf Vita Enamic poliert wird bei den Rauigkeitsparametern Ra und Rz durch Putzintervention mit Depurdent die geringste Veränderung hervorgerufen. Signal White now verringert die mittelwertigen Rauigkeitsparameter um Ra -87,93 %; und Rz um- 49,82 %. Die größte Abnahme der Oberflächenrauigkeit von Ra resultiert durch die Zahnpasta Black is White mit -92,78% von Ra = 0,97 μm (SD = 0,9) auf 0,07 μm (SD = 0,03) und Elmex mit einer Abnahme von Ra um -88,78%.

Depurdent verändert die Oberfläche mit einer Verringerung um -27,27%.

Elmex verursacht die größte Abnahme des Parameter Rz - 65,87 % während Black is White den Rauigkeitsparameter Ra um -92,78 % bei den polierten Vita Enamic Oberflächen am meisten verringert.

Die Veränderungen der Oberflächenstruktur im Sinne einer Verminderung der erhobenen Rauigkeitsparameter ist nach Putzintervention mit allen Zahnpasten in den Daten erkennbar. Eine Erklärung für die verringerten Kenngrößen der Oberflächenrauigkeiten ist das „Verschmieren“ von Anteilen der Kompositmatrix über die keramische Matrix. Eine „Einlagerung“ von (abrasiven) Partikeln der verwendeten Zahnpasta in Lakunen des Keramikgitters können ebenfalls zu einem solchen Ergebnis führen. Nach der Putzintervention liegen die durchschnittlichen Ra-Werte aller Gruppen zwischen MW = 0,07 μm (SD = 0,03, Black is White) und MW = 0,11 μm (SD = 0,27, Elmex).

Der für den Patienten in der Literatur angegebene kritische Wert von 0,5 μm wird nach der Putzintervention nicht erreicht. Bei einer in-vitro-Studie der Vita Zahnfabrik Bad Säckingen wurden 5 Proben mit einer handelsüblichen Zahnpasta für 32 Stunden und einem Anpressdruck von 1 N gebürstet. Hierbei zeigte sich ein Abrasionsverhalten ähnlich dem der VITABLOCKS-Feldspatkeramik (interne Untersuchung, VITA F&E, Bericht 03/16). Durch das niedrige Elastizitätsmodul von Vita Enamic (30GPa) sollen auftretende Kräfte auf

eine größere Fläche verteilt und somit punktuelle Überbelastungen vermieden werden. Das soll das Entstehungsrisiko von Rissen vermindern ²⁴. Da das Elastizitätsmodul im Bereich von natürlichem Dentin liegt, kann die Abreibung des Antagonisten (Attrition) vermieden werden. Bei anderen Studien bestätigte sich die hohe Festigkeit von Vita Enamic im Vergleich zu anderen getesteten Materialien [98]. Wie die folgende Grafik in Abbildung 54 auf Seite 133 zeigt, scheint die Abnutzung von Vita Enamic im Vergleich zu reinen Kompositen (Sinfony, Tetric Evo Ceram) dennoch stark verringert.

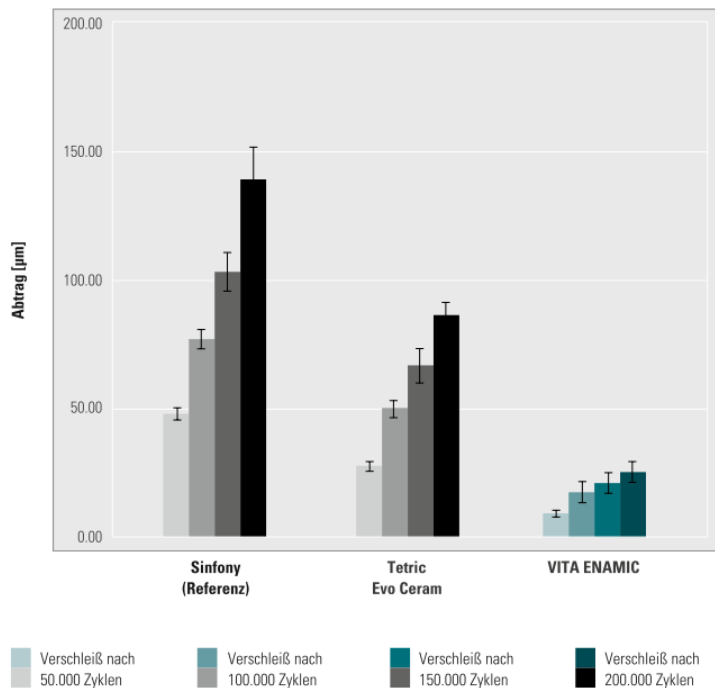


Abbildung 54 Vergleich der Festigkeit von Vita Enamic im Vergleich zu den Kompositen Sinfony und Tetric Evo Ceram. (Abbildung aus: *Enamic „wissenschaftliche Dokumentation“ Broschüre #10025D – 1118 (0.2) S – Version 06, Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland - mit freundlichen Genehmigung.*)

In vorhergegangenen Studien zeigte Vita Enamic keine signifikanten Unterschiede in der Oberflächenrauigkeit nach simulierter 6-monatiger Putzdauer (Lagerung in Wasser, Zahnpasta: RDA 70) welche mit 3000 Zyklen bemessen wurde [57]. Labban et al. stellte dagegen nach 3650 Zyklen Zahnbürstenabrasion (Lagerung in Wasser, RDA 100) bei Vita Enamic poliert

24 <https://www.Vita-zahnfabrik.com/de/VITA-ENAMIC-24969.html>

eine signifikante Rauigkeitszunahme fest [95]. Die Oberflächenparameter Ra und Rz waren in der Studie von Koizumi auf poliertem Vita Enamic nach der Bürstenabrasion mit einer Handzahnbürste (3,4 N, RDA 136, 120 Minuten) signifikant erhöht. Der mittelwertige Ra-Wert wurde dort von 0,029 µm; SD = 0,003 auf 0,073 µm; SD = 0,018 erhöht und der mittelwertige Rz-Wert von 0,04 µm; SD = 0,01 auf 0,90 µm SD = 0,34. [91]

In der Studie von Mörmann et al. lag der durchschnittliche Ra-Wert von Vita Enamic nach der Politur (P4000) bei 0,027 µm (SD = 0,009) und wurde durch die Putzintervention mit 1500 Bürstenstrichen (25 min) einer manuellen Zahnbürste unter der Nutzung der Reinigungspaste Depurdent (2,5 N) auf 0,05 µm (SD = 0,007) erhöht [121].

Die REM-Bilder dieser Studie, welche in Kapitel 4.2.3 besprochen werden, folgen qualitativ diesem Ergebnis. Die vor der Putzintervention in der Grundstruktur homogenen/ ebenmäßigen Oberflächen mit den hell- und dunkelgrauen Anteilen der Polymermatrix und der feldspatkeramischen Matrix, sind nach Putzintervention mit den Zahnpasten Elmex, Signal und auch Depurdent inhomogen verändert. Bei den Proben, welche mit der Zahnpasta Black is White geputzt wurden ist die Oberfläche homogen grau und zeigt nicht die bereits beschriebene REM-Struktur von Vita Enamic [24, 188]^{25 26}.

Korrespondierend zu den Rauigkeitsparametern verringert die laut RDA abrasivste Zahnpasta Depurdent den Glanzwert mit -2,59 GU am wenigsten.

Die Glanzwerte stützen die bei den Rauigkeitsparametern aufgetretenen Oberflächenveränderung. Die Zahnpasten können also die Oberflächenrauigkeit verringern, was der Mundgesundheit zuträglich ist.

Allerdings ist die große Veränderung nach bereits einem simulierten Jahr Putzintervention und die starke Abnahme der Glanzwerte ein Nachteil, der im

25 <https://mam.vita->

[zahnfabrik.com/portal/ecms_mdb_download.php?id=82333&sprache=de&fallback=&cls_session_id=&neuste_version=1](https://mam.vita-zahnfabrik.com/portal/ecms_mdb_download.php?id=82333&sprache=de&fallback=&cls_session_id=&neuste_version=1) (letzter Zugriff: 08.04.2022)

26 https://www1.dental-visionist.com/portal/pics/2_16/Conejo/Conejo2_Bild1_zoom.jpg (letzter Zugriff: 28.11.2021)

klinischen Langzeitverlauf zu ästhetischen (matte Oberfläche, Einlagerung von Farbstoffen) und auch funktionellen (Plaqueakkumulation) Nachteilen führen kann.

Obwohl Vita Enamic eine dem Schmelz ähnliche Härte aufweisen soll, wurde im Vergleich mit Celtra Duo nach 1,2 Millionen Zyklen und 49 N im Kausimulator und einer simulierten Alterung im Thermocycler ein höherer Abtrag an der antagonistischen Zahnhartsubstanz festgestellt [191]. Der Einsatz von Vita Enamic wurde von den Autoren bei bereits vorhandenem Zahnersatz im Gegenkiefer empfohlen. Bei dem Vergleich des Materialverschleiß und dem Abtrag an den antagonistischen Zähnen wies Vita Enamic nach 1,2 Millionen Kauzyklen ebenfalls geringeren Materialverschleißes bei größerem Abtrag an den Antagonisten auf [149].

Auch Schmeißer empfiehlt Vita Enamic als Restaurationsmaterial nur, wenn der Verschleiß der antagonistischen Bezahnung keine Rolle spiele. Die nach der Belastung im Kausimulator entstandenen Schliiffacetten ohne Rissbildung deuten laut Schmeißer auf eine erhöhte Widerstandsfähigkeit gegen Lateralbewegungen hin [149].

Bei dem Alterungsversuch im Kausimulator für 400.000 Zyklen hatte Vita Enamic in polierter Form einen geringeren Volumenverlust als die partikelgefüllten Komposite und die ungefüllten PMMA-Materialien [66]. Grau schlussfolgert, „dass das Material mit dem niedrigsten Füllergehalt auch den höchsten Volumenverlust habe“.

Auswirkung der Intervention auf glasiertes Vita Enamic

Die hier verwendeten, täglich anwendbaren Zahnpasten Signal White Now, Black is White und Elmex erhöhen die Rauigkeitsparameter Ra und Rz. Allein die im Anschluss an Elmex angewandte Reinigungspaste Depurdent verringerte die beiden Rauigkeitsparameter Ra und Rz im Mittelwert. Signal White Now vergrößert die mittelwertigen Oberflächenparameter im Sinne einer Zunahme der Werte Ra und Rz am meisten. Nach der Putzintervention mit Signal White now ist der arithmetische Rauigkeitsparameter Ra von 1,14 μm (SD = 0,52) um +56,14 % auf 1,78 μm (SD = 1,11) erhöht und Rz erhöht sich von 5,52 μm (SD =

2,6) um +47,10 % auf $R_z = 8,12 \mu\text{m}$ ($SD = 5$). Die zweitgrößte Veränderung der Rauigkeitsparameter von Vita Enamic glasiert wird durch Putzintervention mit Elmex hervorgerufen. R_a erhöht sich im Mittel um +26,52 %, und R_z um +20,58 %. Black is White vergrößert R_a um +1,09 % und R_z um +25,52 %. Alle Rauigkeitsparameter werden durch Putzintervention mit Depurdent verringert. ($R_a -8,38\%$, $R_z -7,67\%$).

Nach der Putzintervention liegen die durchschnittlichen arithmetischen Rauigkeitsparameter R_a zwischen $0,94 \mu\text{m}$ (Black is White; $SD = 0,64$) und $1,78 \mu\text{m}$ (Signal; $SD = 1,11$).

Die Oberflächenrauigkeit wird durch Putzintervention mit Elmex und Signal erhöht und durch Depurdent leicht verringert. Black is White erhöht die Rauigkeitsparameter R_a und R_z nur geringfügig.

Die Putzintervention mit Elmex geht mit deutlich erhöhten Rauigkeitsparametern einher. Nach der Verwendung der Reinigungszahnpasta Depurdent ist die Oberfläche wieder „glatter“.

Das partielle Lösen von Glasurmasse von der Polymermatrix durch die Putzintervention mit Elmex könnte eine Erklärung für diesen Effekt sein.

Die abrasiven Partikel der Reinigungszahnpasta Depurdent könnten die Glasurmasse danach wieder gleichmäßig „verschmieren/ verteilen“. Dafür spricht auch die Glättung der zuvor raueren Probenoberfläche durch Depurdent. Auch der Glanz nimmt mit Anwendung von Depurdent am stärksten ab. Die REM-Bilder mit den partiellen Vertiefungen in den Bereichen der Polymermatrix der Oberfläche entsprechen diesem Ergebnis und stützen diese Annahme. Die Putzintervention scheint einen deutlichen Einfluss auf die lichthärtende Glasurmasse zu haben. Deren Langlebigkeit muss mit längeren Versuchen in vitro oder die klinische Relevanz in vivo weiter geprüft werden. Die Verwendung der lichthärtenden Glasurmasse führt bei Vita Enamic vor und nach der Putzintervention zu einer raueren Oberfläche im Vergleich zur polierten Oberfläche.

So kommt Labban et al. ebenfalls zu dem Schluss, dass die Glasur bei Vita Enamic im Ausgangszustand zu einer raueren Oberfläche führe als bei Vita

Enamic poliert und auch die Glanzreduktion durch Zahnbürstenabrasion auf glasiertem Vita Enamic größer ausfallen [95].

Tribst et al. sieht den Vorteil der Glasurschicht bei Vita Enamic in der möglichen klinischen Nachapplizierung nach einer Verweildauer von ca. 5 Jahren, da in seiner Studie die Glasurschicht nach 150.000 Zyklen (2,45 N) entfernt wurde [169]. So kommt Dal Piva et al. ebenfalls zu dem Schluss, dass die Glasurschicht von Vita Enamic glasiert nach simulierten 15 Jahren Zahnbürstenabrasion entfernt wird [40]

Auswirkung der Intervention auf poliertes Celtra Duo

Die Rauigkeitsparameter von Celtra Duo poliert werden durch die hier verwendeten, täglich anwendbaren Zahnpasten im Mittel leicht erhöht. Die Reinigungspaste Depurdent verringert die beiden mittelwertigen Rauigkeitsparameter Ra und Rz.

Auf Celtra Duo poliert ruft die Putzintervention mit Elmex die größte Veränderung der Oberflächenrauigkeit nach einem simulierten Jahr hervor. Nach der Putzintervention sind die zu Beginn niedrigen Rauigkeitsparameter Ra = 0,11 µm (SD = 0,27) um +1427,27 % auf 1,68 µm (SD = 4,69) und Rz = 1,68 µm (SD = 3,64) um +139,29 % auf 4,01 µm (SD = 10,22) deutlich erhöht.

Signal erhöht den arithmetischen Rauigkeitsparameter Ra um +42,86 % sowie die gemittelte Rautiefe um +143,75 % (Rz). Auch wenn die prozentuale Veränderung groß erscheint, so wird beispielsweise der Ra-Wert durch Signal nur um +0,03 µm (SD = 0,07) und durch Black is White +0,00 µm (SD = 0,08) nur gering verändert.

Durch Putzintervention mit Black is White nimmt die gemittelte Rautiefe ab (Rz: -32,43 %).

Die Ra-Werte nach der einjährigen simulierten Putzintervention liegen zwischen 0,10 µm (Black is White SD = 0,08, Signal SD = 0,09) und 1,68 µm (Elmex SD = 4,69).

Da die Werte vor der Putzintervention sehr gering sind, bedeutet eine geringe Veränderung der Oberflächenrauigkeit im µm-Bereich bereits eine große prozentuale Veränderung.

Die Zahnpasta Depurdent verringerte die Werte aller Parameter nach der simulierten Putzintervention

(Ra: -40,48 %; Rz -39,40 %) Hierbei ist nochmal hervorzuheben, dass dieser Effekt nach nur 7 Minuten Intervention (man berücksichtige die Berechnungsgrundlage: 2 Mal wöchentlich oder simuliert 104 Anwendungen - statt 730 Anwendungen bei den anderen drei Zahnpasten) eingetreten ist.

Die Oberfläche scheint nach der „kurzen“ Putzintervention mit Depurdent wieder glatter zu sein: Elmex erhöht die Oberflächenparameter im Sinne der Rauigkeit. Da der Ra-Wert durch die simulierte Putzintervention durchschnittlich um +1,57 μm erhöht wird, kann laut der Literatur davon ausgegangen werden, dass die Veränderung mit bloßem Auge sichtbar ist. Auch die weiteren Rauigkeitsparameter erhöhen sich durch Elmex deutlich. Depurdent verringert diese Parameter wieder um circa 50 % der Rauigkeitserhöhung welche durch Putzintervention mit Elmex hervorgerufen wurde.

Die „raue“ Oberfläche nach Putzintervention mit Elmex Ra: 1,68 μm (SD = 4,69) wurde durch Depurdent auf durchschnittlich Ra: 0,99 μm (SD = 2,78) verringert.

Die Zahnpasta Black is White mit ihren rundlichen und wenig abrasiven Partikeln scheint die Rauigkeitsparameter von Celtra Duo poliert kaum zu verändern, aber tendenziell eher „glatter“ zu hinterlassen als nach der Oberflächenvergütung.

Die Zahnpasta Signal verändert die Oberfläche von Celtra Duo poliert nicht in relevantem Maße.

Die Beurteilung der Rauigkeitsparameter ohne Beachtung der verwendeten Zahnpasta zeigt eine Rauigkeitszunahme (Ra MW = +0,63 μm) auf MW Ra: 0,72 μm nach der Putzintervention. Zudem ist die mittelwertige Standardabweichung nach der Putzintervention bei SD = 2,8 um 2,63 erhöht. Beurteilt man die Medianwerte, zeigt sich eine kaum verringerte Rauigkeit von Median +0,02 μm bei ZLS poliert. Wird der Ausreißer Probe C115 D aus der Auswertung der Daten herausgenommen, so liegt der durchschnittliche Rauigkeitsparameter Ra nach der Oberflächenvergütung und ohne Putzintervention bei 0,09 μm (SD = 0,17) und nach der Putzintervention bei 0,07 μm (SD = 0,09). Die Probe C 115 D wird bereits in Abbildung 51 auf Seite 126 erwähnt. Unter Ausschluss der Probe C

115 D kann also von einer gleichbleibenden Rauigkeit im Sinne von Ra bei Celtra Duo poliert ausgegangen werden.

Die glattere Oberfläche von Celtra Duo nach Oberflächenvergütung mittels Politur, im Vergleich zur Glasur konnte durch Shibasaki et al. bestätigt werden [155]. Die Oberflächenvergütung durch manuelle Politur bei Keramiken führte häufig zu glatteren Oberflächen [54, 127]. In der Arbeit von Siam et al. war dagegen die durchschnittliche Rauigkeit von Celtra Duo poliert höher als die von glasiertem Celtra Duo [157]. Im Vergleich zu Celtra Duo glasiert war Celtra Duo ohne Kristallisationsbrand nach dem Verschleißtest im Kausimulator (120.000 Zyklen, 49 N) signifikant weniger abnutzungsresistent und zeigte im Vergleich zur getesteten Goldlegierung (Aurocast 8) eine höhere Verschleißtiefe [44].

Die Vorteile von Celtra Duo liegen nach Herstellerangaben „in der kurzen Verarbeitungszeit“, da ein vergleichsweise „kurzer“ Festigungsbrand von 10-15 Minuten notwendig ist. Daher dauert der Glanzbrand nur 10-15 Minuten.

Die chemische Löslichkeit unterscheidet sich laut Hersteller je nach Oberflächenvergütung: <40 µg/cm² nach Politur, <20 µg/cm² nach Glasur.²⁷

Auswirkung der Intervention auf glasiertes Celtra Duo

Bei den glasierten Celtra Duo Proben wird die Oberflächenrauigkeit durch Putzintervention mit Depurident am stärksten erhöht. Ra wird nach der simulierten einjährigen Putzintervention mit Depurident um +2,84 % von Ra = 3,17 µm (SD =1) auf Ra = 3,26 µm (SD = 1,01) und Rz um +4,05% von Rz = 15,31 µm (SD = 4,65) auf Rz = 15,93 µm (SD = 4,89) erhöht.

Durch Putzintervention mit Black is White ist keine relevante Veränderung der Oberflächenrauigkeit zu erfassen. Ra bleibt durchschnittlich unverändert, während Rz um -1,65 % verringert wird. Auch Elmex verringert die Rauigkeitsparameter nach der simulierten einjährigen Putzintervention prozentual nur geringfügig (Ra -2,76 %, Rz -3,22 %) Die größte Abnahme der Oberflächenrauigkeit wird durch Putzintervention mit Signal hervorgerufen. Ra ist

²⁷https://www.celtra-dentsplysirona.de/doc/Download/Celtra_Duo/RES-Celtra-Duo-FactFile-Web-Flyer-DE-K79101445.pdf (letzter Zugriff: 08.04.2022)

nach der Putzintervention durchschnittlich um -14,22 % auf 3,92 μm (SD = 1,40) verringert.

Die durchschnittlichen Ra-Werte der glasierten Celtra Duo Proben liegen zwischen 3,17 μm (SD = 1,00) nach Putzintervention mit Elmex und bei 3,92 μm (SD = 1,40) nach Putzintervention mit Signal White now. Diese Werte liegen für den Patienten in einem taktil spürbar rauen Bereich. Depurdent erhöht die Oberflächenrauigkeit hinsichtlich beider Rauigkeitsparameter (Ra +2,84 % und Rz +4,05 %). In Gesamtschau verändert nur die Kurzzeitintervention mit der Reinigungszahnpasta Depurdent die Oberfläche der glasierten Celtra Duo Proben geringfügig und nicht die simulierte Jahresintervention mit den täglichen nutzbaren Zahnpasten. Nach Bürstenabrasion (2 Jahre; 40,5 min, 1,5 N) von Bösch wies die ZLS-Keramik Vita Surprinity mit Glanzbrand und zusätzlicher Hochglanzpolitur mit durchschnittlich 0,51 μm den Ra-Wert des in der Literatur kritisch beschriebenen Werts von 0,5 μm auf. Bösch kam dennoch aufgrund der geringen Veränderung (+0,02 μm) abschließend zu dem Ergebnis, dass Vita Surprinity als definitive Versorgung verwendet werden kann [27].

Es wurde zudem ein geringer Volumenverlust bei der Kausimulation (40N; 100.000 Zyklen) im Sinne des Zwei-Körper-Abriebs festgestellt [27].

Nach dem Glanzbrand von Celtra Duo sollte kein weiteres Einschleifen mehr erfolgen, da die Bruchfestigkeit hiernach verringert scheint [131].

Bei einer Literaturübersicht von 2021 wurde die Verwendung von ZLS Keramiken aufgrund Bruchfestigkeit, Biokompatibilität und geringem Randspalt empfohlen [190]. De Angelis et al. stellte bei einer Studie im Kausimulator (120.000 Zyklen) fest, dass sich die durchschnittliche Abnutzungsrate und der Volumenverlust von glasiertem Celtra Duo statistisch ähnlich zu dem der Goldlegierung Aurocast verhielt [44].

4.2.2 Veränderung des Glanzes - Bewertung mittels Glossometer

Ausgangszustand

Die durchschnittlichen Glanzwerte der verschiedenen Materialien mit ihrer jeweiligen Oberflächenvergütung betragen in der vorliegenden Studie vor der Putzintervention für Vita Enamic: poliert 78,99 GU (SD = 6,90) und glasiert 84,26

GU (SD = 5,16) wohingegen Celtra Duo poliert 98,96 GU (SD = 2,70) und glasiert 34,45 GU (SD = 13,32) erreichte.

Die mittelwertigen Glanzwerte der glasierten Oberflächen von Vita Enamic sind durch die Oberflächenvergütung mit lichthärtender Glasurmasse mit MW = +5,27 GU geringfügig höher als die der polierten Oberflächen.

Bei den Oberflächen von Celtra Duo führt die Oberflächenvergütung mittels Glanzbrand zu deutlich niedrigeren Glanzwerten von mittelwertig -64,51 GU im Vergleich zur polierten Oberfläche. Es konnten laut Kilinc H. und Turgut S. bei einer Studie über die optischen Oberflächeneigenschaften ästhetischer CAD/CAM Materialien keine Vorteile bei der Wahl zwischen manueller Politur oder der Verwendung einer Glasurmasse festgestellt werden [89]. Die Glanzwerte von Vita Enamic glasiert im Ausgangszustand lagen bei MW = 45,3 GU (SD = 2,5) und poliert bei MW = 42,5 GU (SD = 4,7) [122]. In vorhergegangenen Studien war bei Vita Enamic ein initial hoher Glanzgrad von 100 GU messbar [27]. Je nach Politur konnten bei Vita Enamic im Ausgangszustand unterschiedlich hohe Glanzwerte erzielt werden: Koizumi et al. polierte bis zu einer Körnung von P2000 und nutzte danach ein Filz mit Diamant-Polierpaste 1 µm was zu einem Glanz von MW: 82,6 GU führte [91], die Politur bis P4000 ohne zusätzliche Polierpaste führte zu Glanzwerten von 59,7 – 64 GU [85, 152].

Veränderung der Glanzwerte durch Putzintervention

Bei den Proben Vita Enamic poliert wurde durch alle drei Zahnpasten ein Glanzverlust verursacht. Die größte Abnahme des Glanzes resultierte durch Putzintervention mit Elmex mit -43,07 GU (-56,69 %) verglichen mit -31,17 GU (-36,94 %) durch Putzintervention mit Signal.

Die Reinigungspaste Depurdent führte nach Elmex noch zu einer durchschnittlichen Verringerung des Glanzes um -2,59 GU (-7,87 %).

Dies ist erklärbar mit dem Verschmieren von organischer Matrix oder der Einlagerung der abrasiven Partikel in den entstandenen Lakunen.

Außerdem könnte die Tiefe der Lakunen einen limitierenden Faktor darstellen, wenn die Borsten mit dem abrasiven Medium die Polymer-Matrix nicht mehr erreichen können.

Bei einem Putzversuch (2,5 N, 1500 manuelle Bürstenstriche) mit Vita Enamic poliert und dem natürlichen Zahnschmelz konnte nach Putzintervention eine Verringerung der Glanzwerte von Schmelz um -53 % und von Vita Enamic um -27% festgestellt werden [120].

Ähnlich wie bei der vorliegenden Studie wies Vita Enamic nach der Probenherstellung und Vergütung mittels Politur hohe Glanzwerte von durchschnittlich 82,6 GU (SD = 4,3) auf. Nach der Putzintervention mit 20.000 Zyklen (120 min) mit Crest (RDA 136) waren die Glanzwerte durchschnittlich auf 79,5 GU (SD = 1,2) verringert [91].

Mörmann berichtet von einem mittelwertigen Glanz in Höhe von 49 GU nach Politur, welcher sich nach Zahnbürstenabrasion auf nur 35 GU verringert habe und befürwortet den intraoralen Einsatz von Vita Enamic [180].

In einer weiteren Studie hatten die polierten Vita Enamic Oberflächen vor der simulierten Putzintervention einen hohen mittelwertigen Glanzwert von ca. 70-80 GU, welcher nach simulierter Putzintervention von 100.000 Bürstenstrichen bei 2 N auf ca. 30 - 40 GU reduziert wurde [43]. Durch die Bürstenabrasion scheint – wie in der vorliegenden Studie- die organische Matrix teilweise entfernt und die anorganische Feldspatkeramik frei gelegt [43].

Bei Mühlemann wurden die Glanzwerte von Vita Enamic poliert MW = 42,5 GU (SD = 4,7) nach simulierten 5 Jahren Putzintervention (7300 Zyklen, 2,5 N, 100 RDA) auf 47 GU erhöht (SD = 2,3) [122].

Nach der simulierten Belastung zum Beispiel durch einen Kausimulator (1,2 Millionen Zyklen) und 3000 Zyklen im Thermocycler (5°/ 50°) wie bei Mörmann et al. oder 10.000 - 40.000 Putzzyklen mit 2,5 N und Zahnpasta Slurry (Colgate) wie bei Kamonkhantikul et al. zeigt sich bei Vita Enamic eine deutliche Verminderung der mittelwertigen Glanzwerte [86, 121].

Bei den Proben Vita Enamic glasiert resultierte bei allen Zahnpasten eine Verminderung des mittelwertigen Glanzwertes. Die Größe der Abnahme variierte deutlich. Die geringste Abnahme des Glanzes wurde durch Putzintervention

durch Elmex mit -6,31 GU (-7,74 %) hervorgerufen; wohingegen Signal White now den Glanz um -15,11 GU (-17,80%) auf 69,75 GU und Black is White um -37,29 GU (-43,14%) auf 49,15 GU reduzierte. Hier resultierte die größte Abnahme des Glanzes aus der Putzintervention mit Depurdent -44,45 GU (-59,14 %).

Die größte Abnahme der Glanzwerte resultierte durch die Zahnpasten mit den höchsten RDA-Werten (Depurdent und Signal White now). Die abrasiven Partikel scheinen einen Einfluss auf die Glanzwerte der glasierten Oberfläche von Vita Enamic zu haben.

Die lichthärtende Kompositglasur veränderte sich bereits nach einem simulierten Jahr Putzintervention deutlich. Die Zahnpasta Elmex, mit einem mittleren RDA von 60-70 verändert den Glanz am geringsten.

Die große Abnahme des Glanzes durch Black is White könnte durch eine aufgelagerte, nicht reflektierende Schicht aus Fluorapatit entstehen. Zur Untersuchung dieser Schicht könnten die in Kapitel 4.3 (Untersuchungsmethoden zu Präzipitaten) auf Seite 151 besprochenen Untersuchungsmethoden angewendet werden. Hier besteht weiterer Untersuchungsbedarf. Methodisch kann für diese Hypothese die angewendete Nachreinigung mit drucklosem Wasser als nachteilig angeführt werden. Es ist allerdings auch zu berücksichtigen dass die Reibung der Borsten eine solche Schichtbildung nicht ermöglichen könnte.

Die initialen Glanzwerte von Vita Enamic glasiert von MW = 45,3 GU (SD = 2,5) wurden in einer Studie nach simulierten 5 Jahren Bürstenabrasion (7300 Zyklen, 2,5 N, 100 RDA) auf MW = 35 GU (SD = 4,3) verringert [122].

Bei den Proben Celtra Duo poliert wurde der Glanz durch alle Zahnpasten, außer durch Depurdent, annähernd gleich zwischen -13,6%; -13,40 GU (Elmex) und -16,5%; -16,55 GU (Signal) verringert. Ein Zugewinn um +6,7 GU(+7,86 %) wurde durch Depurdent verursacht. Black is White verringerte den Glanz um -15,14 GU (-15,49%).

Die polierte Oberfläche von Celtra Duo scheint stabiler gegenüber abrasiver Einflüsse auf den Glanz. Die leicht erhöhten Glanzwerte durch Depurdent könnten durch die hohe Abrasivität (RDA 200) und auf ein Einebnen der zuvor leicht aufgerauten Oberfläche nach Putzintervention mit Elmex für ein simuliertes Jahr zurückzuführen sein.

Bei den Proben Celtra Duo glasiert erzielten allen Zahnpasten einen geringeren Glanzverlust (in GU) als bei Celtra Duo poliert. Die prozentuale Veränderung (-14% Elmex, -18% Signal) des Glanzes unterscheidet sich aber nur unwesentlich von denen der polierten Oberflächen. Ebenso erhöhte Depurdent den Glanzwert durchschnittlich um 14,74% (+4,45GU). Der Glanzbrand bei Celtra Duo reduziert den messbaren Glanz der Prüfkörper vor Intervention aus o.g. Gründen (Seite 109, Probekörperherstellung und Abbildung 44 auf Seite 113), zeigt jedoch bei der Glanzmasse eine vergleichbare Beständigkeit des Glanzes nach der Putzintervention.

Wie bei der polierten Oberfläche von Celtra Duo reduziert auch die Zahnpasta Elmex den Glanz durch die Putzintervention leicht und Depurdent erhöht den mittelwertigen Glanz wieder. Die stark abrasive Reinigungspaste Depurdent scheint die aufgeraute Oberfläche durch die Putzintervention ebenfalls wieder leicht einzuebnen.

4.2.3 Qualitative Veränderung der Oberflächen-Beurteilung mittels REM

Durch die REM-Aufnahmen kann zusätzlich zu den beiden oben beschriebenen Verfahren die Oberfläche subjektiv beurteilt werden. Die Nutzung von REM-Aufnahmen wurde bei einigen Studien zu diesem Zwecke angewendet [32, 94, 97]. Es wurde die Grundstruktur und Homogenität der Oberfläche der REM-Aufnahme im Ausgangszustand mit der REM-Aufnahme nach einem Jahr simulierter Putzintervention verglichen.

Vita Enamic poliert

Die Oberfläche weist vor der Putzintervention die typische Struktur mit ca. 80% hellgrauen und 20 % dunkelgrauen Anteilen auf ²⁸. Laut Literatur und Zusammensetzung von Vita Enamic können die dunkelgrauen Bereiche der Kompositmatrix und die hellgrauen Bereiche der keramischen Matrix zugeordnet werden [24, 188]²⁹.

Die Oberfläche/ Grundstruktur scheint zum größten Teil in einer Ebene zu liegen. Es sind bereits im Ausgangszustand, nach der Politur leichte Defekte im dunkelgrauen Bereich mit eingelagerten weißlichen Partikeln sichtbar.

Nach der Putzintervention mit der Zahnpasta Black is White ist eine, in Farbe und Niveau, einheitliche Oberfläche sichtbar, bei welcher keine Unterscheidung mehr zwischen keramischen Anteilen oder Kompositanteilen der Matrix möglich ist. Nach der Putzintervention mit Signal White now und Elmex erscheint die dunkelgraue Kompositmatrix ubiquitär vertieft. Der prozentual größere Anteil der feldspatkeramischen Matrix weist einen sichtbaren, positiven Höhenunterschied im Vergleich zu den dunkelgrauen Anteilen der Polymermatrix auf.

Zudem sind bei Elmex noch weißliche Ablagerungen in den Vertiefungen sichtbar. Es liegt die Vermutung nahe, dass es sich um Reste des Zahnpastaslurries oder der abrasiven Partikel handelt. Die Klärung dieser Präzipitate ist nicht erfolgt. Auf mögliche Untersuchungsverfahren wird im Kapitel 4.3 Untersuchungsmethoden zu Präzipitaten auf Seite 151 eingegangen. Wie auch bei der Zahnpasta Black is White besteht hier weiterer Klärungsbedarf im Rahmen ähnlicher Untersuchungen.

Nach der Putzintervention mit Depurdent sind diese o.g. vertieften Bereiche der Kompositmatrix, in Folge der Einwirkung von Elmex, im Vergleich zur keramischen Matrix nicht mehr so deutlich vertieft. Die Grundstruktur der

²⁸<https://mam.vita->

[zahnfabrik.com/portal/ecms_mdb_download.php?id=82333&sprache=de&fallback=&cls_session_id=&neuste_version=1](https://mam.vita-zahnfabrik.com/portal/ecms_mdb_download.php?id=82333&sprache=de&fallback=&cls_session_id=&neuste_version=1) (letzter Zugriff: 08.04.2022)

²⁹ https://www1.dental-visionist.com/portal/pics/2_16/Conejo/Conejo2_Bild1_zoom.jpg (letzter Zugriff: 08.04.2022)

Oberfläche zeigt die oben beschriebene Struktur von Vita Enamic poliert, scheint aber weniger Niveauunterschiede der beiden Netzwerkanteile aufzuweisen.

Nach der Putzintervention mit Depurdent sind die oben beschriebenen, weißlichen Präzipitate auf der gesamten Oberfläche und in den verbliebenen Vertiefungen vorhanden. Nach 400.000 Zyklen und 50 N (ca. 20 Monate) im Kausimulator zeigte Vita Enamic poliert ebenfalls eine große strukturelle Veränderung auf der Oberfläche [66].

Grau beschreibt ebenso die auch nach dem Abrasionsversuch in dieser Studie sichtbaren Oberflächeninhomogenitäten wie vertiefte Bereiche im Sinne von Gruben, Riefen und Oberflächenzerrüttung [66].

Vita Enamic glasiert

Die Oberflächen der Proben sind einheitlich grau ohne morphologisch sichtbare Unterschiede. Die Unterscheidung von Anteilen des Polymernetzwerkes zum Feldspatkeramischen Netzwerk von Vita Enamic ist nicht möglich.

Nach der Putzintervention mit Black is White ist ebenfalls keine Unterscheidung der beiden Materialanteile möglich. Es sind deutliche Putzdefekte in der Oberfläche in Form kleiner Kratzer und herausgelöster Anteile erkennbar, was zu einer inhomogenen Oberflächenbeschaffenheit führt.

Nach der Putzintervention mit Signal White now ist keine Unterscheidung der beiden Materialnetzwerke möglich. Die Oberfläche ist weniger inhomogen als nach Putzintervention mit Black is White, denn es sind weniger Kratzer aber ebenso herausgelöste Fragmente sichtbar.

Die Putzintervention mit Elmex führt zu einer inhomogenen Oberfläche mit morphologisch unterscheidbaren dunkelgrauen und hellgrauen Anteilen der Polymermatrix und des Feldspatkeramiknetzwerkes. Die dunkelgrauen Anteile sind im Vergleich zu den helleren Anteilen vertieft. Da die Glasurmasse noch visuell identifiziert werden kann, ist eine komplette Entfernung der Glasurmasse durch Elmex auszuschließen; jedoch ist die bereits erwähnte REM-Struktur von Vita Enamic vergleichbar zum polierten Zustand – trotz UV-härtender Kompositglasur - wieder sichtbar.

Die Zahnpasta Elmex scheint daher die Glasurmasse insbesondere am Interface zur Kompositmatrix abzutragen.

Nach Putzintervention mit Depurdent kann keine Unterscheidung zwischen keramischen und polymeren Bereichen getroffen werden. Die Oberfläche scheint homogen grau mit disseminierten Kratzern und herausgelösten Fragmenten.

Eine Erklärung wäre das „Verschmieren“ der noch vorhandenen Glasurmasse über die Oberfläche; wofür der verminderte Glanzwert ein Anhaltspunkt sein kann. So erscheint nach Putzintervention mit Depurdent die Oberfläche wieder einheitlich; jedoch mit vielen disseminierten Kratzern und Rillen, die das Licht diffus brechen.

Celtra Duo poliert

Die polierte ZLS-Keramik ist vor der Putzintervention einheitlich grau mit vereinzelt Kratzern als Derivate der Probenherstellung und Politur.

Die Oberflächen weisen auf manchen REM-Bildern nicht erhabene, hellere Flecken und kleine, kristalline Präzipitate auf.

Die Oberfläche scheint nach Putzintervention mit Black is White homogener und weist feine kristalline Auflagerungen mit einer Größe von bis zu 1 µm auf. Nach Putzintervention mit Signal White now und Elmex ist im Vergleich zur REM-Aufnahme vor Putzintervention keine Veränderung der Oberflächenmorphologie sichtbar. Nach Putzintervention mit Depurdent zeigen sich disseminierte Kratzer und Defekte im Sinne von herausgelösten Fragmenten bis zu 8 µm Durchmesser in der Oberfläche. Die Oberfläche ist nach der Putzintervention mit Depurdent inhomogen und weist eine eindeutige Zerrüttung der Oberflächenstruktur auf.

In der Dissertation von Matzinger waren in den REM-Aufnahmen von Celtra Duo und Vita Surprinity nach der Vorpolitur noch Kratzer und tiefe Rillen sichtbar, welche nach der Hochglanzpolitur nicht mehr vorhanden waren [111].

Celtra Duo glasiert

Die mit Silikatglas glasierte ZLS stellt sich homogen grau mit vereinzelt, aber größeren kristallinen Auflagerungen und agglomerierten Partikeln dar. Im Vergleich zu den polierten Oberflächen von Celtra Duo sind keine Kratzer in der Oberfläche sichtbar. Nach Putzintervention mit Signal White now und Elmex sind keine sichtbaren Oberflächenveränderungen in den REM-Aufnahmen erkennbar. Kleinere Präzipitate als die oben beschriebenen kristallinen Auflagerungen sind,

insbesondere nach Putzintervention mit Signal White Now, auf der gesamten Oberfläche zu erkennen.

Nach Putzintervention mit Depurdent weist die Oberfläche ebenso wie Celtra Duo poliert leichte Kratzer und Rillen in der Oberfläche auf. Kleine weißliche Präzipitate sind hier ebenfalls sichtbar.

Somit scheint die Glasurmasse aus Silikatglas, Isopropylalkohol und Isobutan, hinsichtlich der Abriebfestigkeit gegenüber den hier verwendeten Zahnpasten, der zirkonverstärkten Lithium-Silikatkeramik zumindest initial gleich zu sein.

Nach Putzintervention mit Black is White ist die Grundstruktur der Oberfläche inhomogen mit disseminierten dunkelgrauen Vertiefungen. Teilweise sind weißliche, in den Vertiefungen angereicherte Ablagerungen erkennbar. Dass die Zahnpasta Black is White mit einem sehr geringen RDA-Wert und einer so prognostisch eher geringen Abrasivität, sowie rundlich geformten abrasiven Partikeln aus Aktivkohle, die Oberflächenintegrität der glasierten ZLS-Keramik so verändern wie auf der REM-Aufnahme sichtbar, ist unwahrscheinlich. Insbesondere, da die Zahnpasta auf poliertes Celtra Duo laut REM-Bild kaum Auswirkungen hatte. Zudem bleibt der Rauigkeitswert Ra im Mittelwert vor zu nach Putzintervention unverändert und der Glanz wird nur um -4,65 GU reduziert. Eine mögliche Erklärung wären die in der Zahnpasta enthaltenen Komponenten Fluorid und Hydroxylapatit, welche sich zu Fluorapatitkristallen verbinden könnten. Die Entstehung einer solchen Schicht müsste noch durch weitere Untersuchungen geklärt werden siehe Kapitel 4.3 Untersuchungsmethoden zu Präzipitaten auf Seite 151.

4.3 Stärken und Limitationen der Untersuchung

In der durchgeführten Studie wurden Proben von zwei „neuen“ CAD/CAM-Restaurationsmaterialien für die Chair-/ Labside-Fertigung mit zwei verschiedenen Oberflächenbearbeitungen hergestellt und mit drei Zahnpasten und einer Reinigungszahnpasta für einen simulierten Zeitraum von einem Jahr geputzt.

Da durch die Oberflächenvergütung der Celtra Duo Proben mittels Glanzbrand eine inhomogene, makroskopische Oberfläche mit hohen Rauigkeitswerten (Ra

und Rz) entstand, war die Auswertung durch Oberflächentopographie und Glanzmessung bei diesen Proben anfällig für die Fehlertoleranz der Messapparatur und somit nur in der eigenen Gruppe eindeutig vergleichbar.

Das gewählte Zeitintervall von einem simulierten Jahr ist ein geringer Zeitraum, um das Ausmaß der Oberflächenveränderungen feststellen zu können. Die definitiven Versorgungen sollten bei einer angestrebten intraoralen Verweildauer von ca. 15-20 Jahren nach einem Jahr noch keine signifikanten Oberflächenveränderungen aufweisen. Wobei dies nur eine bedingte Limitation darstellt, da die Berechnungsart anderer Autoren und Studien zu kürzeren simulierten Putzintervallen für ein Jahr führen. Allerdings konnte bereits der kurzzeitige Einfluss der Zahnpasten (insbesondere bei Depurdent) auf Vita Enamic und Celtra Duo mittels der vorliegenden Studie beurteilt werden.

Es sollten dennoch weitere Untersuchungen der CAD/CAM-Materialien für einen längeren simulierten Zeitraum durchgeführt werden, um den klinischen Impact abschätzen zu können. Hier bietet sich aus den Ergebnissen der Studie der Schluss an, dass eine Untersuchung an polierten, mit Vita Enamic vergleichbaren keramischen Hybridmaterialien, zielführende Ergebnisse liefern kann.

Denn ein Einfluss auf zirkonverstärkte Lithiumsilikatkeramik kann mit dem der Feldspatkeramik - und Ähnlichen - verglichen werden. In Summe muss der Einfluss als „zu gering“ bewertet werden, als dass weitere Untersuchungen relevante Effekte zu Tage fördern würden.

Komposit-Glasuren auf keramischen Hybridmaterialien scheinen anfällig für Zahnpasta-Abrieb zu sein und werden daher bereits im mittelfristigen Verlauf von der Oberfläche abgelöst.

Für die statistische Auswertung ist eine hohe Anzahl an Prüfkörpern (hier Anzahl $n = 9$) pro Gruppe sinnvoll. Je größer die Zahl der Stichprobe ist, desto geringer ist die Schwankungsbreite. Da die Putzvorrichtung drei Zahnbürsten aufweist, mit welchen der Abrasionstest gleichzeitig durchgeführt werden kann, wurde eine durch drei teilbare Zahl ausgewählt.

Durch den Vergleich von drei täglich anwendbaren Produkten und einer professionellen Reinigungszahnpasta (Depurdent) ist eine durchschnittliche Bandbreite an Zahnpasten verwendet worden. Allerdings wurde kein

Standardabrasivum mit einem RDA von 100 (meist Kalziumcarbonat oder Kalziumpyrophosphat) und keine Kontrolle nur mit Wasser ohne Zahnpasta durchgeführt. Da die Bundeszahnärztekammer eine Zahnpasta mit RDA zwischen 30-70 für die tägliche Verwendung empfiehlt, kann Elmex in dieser Studie (RDA 77) als Vergleich im Sinne einer Standardzahnpasta angesehen werden³⁰. Erstaunlich ist dabei, dass diese einen vergleichsweise hohen Impact auf die Oberflächenparameter von Vita Enamic unabhängig von der Oberflächenvergütung und die Glanzwerte bei Vita Enamic poliert hatte. Auch der Rauigkeitsparameter Ra von Celtra Duo poliert wurde mit ca. +1400 % stark verändert. Es empfiehlt sich daher, Elmex in Zusammenhang mit dem Marktanteil für weitere Studien zu verwenden.

Die intraoral existierenden Temperaturschwankungen sind in der Studie nicht berücksichtigt worden. Das Slurry hatte durchgehend Raumtemperatur und auch die Prüfkörper wurden nicht in Wasser gelagert. Ein Quellen des polymeren Anteiles durch Wassereinlagerung/ Speichereinlagerung konnte so in dieser Studie nicht simuliert und deren Einfluss auf den Abtrag, den Glanz und die Oberflächenrauigkeit nicht geprüft werden.

Die Lagerung im Wasser könnte zu einer hydrolytischen Zersetzung des Silans führen und den Verbund zwischen Füllstoffen und organischer Matrix schwächen [101].

Das Slurry wurde mit destilliertem Wasser hergestellt. Es ist somit deutlich dünner, als der Muzin-haltige Speichel. Bei der Untersuchung von Verschleiß mittels Zahnbürstenabrasion kann die Abrasivität durch Verwendung von Muzin-haltigem künstlichen Speichel verringert werden [8]. Künstliche Muzine sind unter dem Namen Glandosane® erhältlich. Da die Oberflächen von CAD/CAM Materialien getestet wurden und kein Dentin oder Schmelz in der Studie untersucht wurde, ist die remineralisierende Eigenschaft von Speichel zu vernachlässigen. Die Speichelflussrate wurde bei diesem in-vitro-Versuch nicht nachgeahmt. Die Konzentration von Speichel zu Zahnpasta wird während des

30 [Bundeszahnärztekammer und Bundesvereinigung 2009/2010]

Putzvorgangs in vivo intraoral zunehmend verdünnt. Daher kann der erzeugte Effekt auch überschätzt werden.

Eine Stärke der Untersuchung ist die Verwendung von elektrischen Zahnbürsten, da die Putzdauer und der maximale Anpressdruck durch integrierte Timer und Warnfunktion sowohl im Versuchsaufbau als auch bei den Patienten einheitliche Voraussetzungen bietet. Durch die oszillierende Rotation ist klinisch bei den Patienten als auch in vitro ein sehr guter Reinigungseffekt ohne Akkumulation von Putzkörpern erreichbar. Die Ergebnisse des in-vitro-Versuches sind infolgedessen auch mit den klinischen Putzverhalten der Patienten besser vergleichbar.

Da vor und nach der Putzintervention das Gewicht und die Gesamtoberflächengeometrie der Prüfkörper nicht gemessen wurde, konnte der Abtrag von Volumen respektive das Gewichtsprozent nicht quantifiziert werden. Diese Quantifizierung hätte bei der Perthometermessung über das Putzprofil hinaus zumindest approximiert werden können; allerdings ließ das mögliche Messfenster dies technisch nicht zu. Grau beschreibt in seiner Dissertation die Messung des Volumenverlustes nach Alterung der Prüfkörper im Kausimulator für 400.000 Zyklen und Thermolastwechsel mittels optischen Laserscanner (SDM) und einem konfokalen Laserscanning Mikroskop LSM [66]. Eine solche Untersuchung könnte bei vorhandener Technik allerdings noch nachgezogen werden.

Untersuchungsmethoden zu Präzipitaten

Die in den REM-Aufnahmen abgebildeten Präzipitate und kristalline Strukturen auf den Probenoberflächen sind in dieser Studie nicht untersucht worden. Dies ließe sich beispielsweise mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) durchführen, bei welcher die Atome an der Oberfläche bzw. die Präzipitate mit Elektronen oder Röntgenstrahlung (Röntgenfluoreszenz) angeregt werden. Durch die Emission von charakteristischen Röntgenstrahlen können die, in der obersten Schicht (bei Nutzung von Elektronenstrahlung ca. 1 μm , Röntgenfluoreszenz bis in den cm-Bereich), enthaltenen Elemente in Qualität und Quantität bestimmt werden. Die Darstellung erfolgt in Form von EDX-Spektren mit elementspezifischen Peaks [16].

Eine weitere Möglichkeit für die oberflächenanalytische Bestimmung (3-10 nm) der Elementzusammensetzung ist die Röntgen-Photoelektronen-Spektroskopie (XPS) mit welcher sich die obersten Nanometer untersuchen lassen. Hierbei werden durch Röntgenstrahlung Elektronen aus der Atomhülle gelöst und anschließend die Bindungsenergie gemessen ³¹. Die Differenz der Energie der monochromatischen Röntgenstrahlung und der Elektronenbindungsenergie ist elementcharakteristisch und liefert so einen eindeutigen Nachweis für die entsprechenden Elemente ³².

Zur reinen Untersuchung der Kristallstruktur gäbe es noch die Möglichkeit der Röntgendiffraktometrie (XRD). Die Untersuchung bedarf ebenfalls die Anwendung von Röntgenstrahlung, welche dann in einem Röntgenspektrum wiedergegeben werden ³³. Die Untersuchungsmethode kann an flachen oder gewölbten Strukturen durchgeführt werden und liefert je nach Einfallswinkel, Wellenlänge und Gitterebenenabstand unterschiedliche Peaks im Röntgenspektrum ³⁴.

31 <https://www.tu-braunschweig.de/iot/forschung/analytik/xps-roentgen-photoelektronenspektroskopie> (letzter Zugriff 17.10.2022)

32 https://www.uni-muenster.de/imperia/md/content/physikalische_chemie/app_xps.pdf (letzter Zugriff: 21.10.2022)

33 <https://www.tu-braunschweig.de/iot/forschung/analytik/xrd-roentgendiffraktometrie> (letzter Zugriff: 17.10.2022)

34 <https://www.uni-due.de/materials/roetgendiffractometrie.shtml> (letzter Zugriff: 21.10.2022)

4.4 Klinische Übertragbarkeit und Implikationen

In-vivo-Verfahren, um die Abriebbeständigkeit von Zahnersatzmaterialien festzustellen, sind vom Beurteilenden abhängig, zeitaufwändig und teuer. Zudem besteht auch ein größerer organisatorischer Aufwand [93] bei gleichzeitiger Unsicherheit bedingt durch das Verhalten der Studienteilnehmer und der Wahl geeigneter Auswertemethoden. Durch nicht reproduzierbare Einflussfaktoren in der Mundhöhle, unter anderem dem Speichelfluss, dem wechselnden pH-Wert und der Temperaturschwankung sind die Verfahren nicht mit in-vitro-Verfahren vergleichbar – ggf. durch deren vielfältige Reproduktionsmöglichkeit sogar unterlegen. Selbiger Aspekt begrenzt aber auch die Aussagefähigkeit von in-vivo-Versuchen, da eben diese und andere, etwa ernährungsbedingte Einflüsse – nicht kontrolliert und somit der einzelne Effekt per se nicht untersucht werden kann. So könnten Variationen der oben genannten Parameter, beispielsweise der Dicke des Speisebreis, zu unterschiedlichen Abnutzungsraten von Restauration und Antagonisten führen [129].

Auch das sich intraoral bildende Pellicle ist in Bezug auf Abrasionsversuche in vitro nicht ausreichend nachahmbar. Dieses bildet sich innerhalb von Sekunden und stellt einen natürlichen Schutz vor oberflächlicher Abnutzung dar [82].

Daher gibt es in der Literatur häufiger in-vitro-Versuche, um die Abriebbeständigkeit der Materialien zu testen (International Organization for Standardization: ISO/TR 14569-1:2007). Besondere Vorteile, das Verschleißverhalten mit in-vitro-Abrasionsversuchen zu erproben, sind die Standardisierung der Prüfkörper und des Versuchsaufbaus. Daher dienen in-vitro-Untersuchungen, wie die vorliegende, ein besseres Verständnis von in vivo beobachteten Effekten zu erhalten. Dazu sind zwei- und drei- Körper-Abrasionsversuche die Gebräuchlichsten, um das Verschleißverhalten von Restaurationmaterialien festzustellen [49, 150].

In-vitro-Studien zur Putzabrasion können mechanisch als ein „worst-case Szenario“ verstanden werden, da das Material ohne Karenz und mit zeitlicher Stringenz gestresst wird. Das bedingt, dass nur leichte Abweichungen des Versuchsaufbaus zu differierenden Ergebnissen führen können.

Als klinisch relevant kann - in Ergänzung zu den Limitationen – auch die Verfärbungstendenz durch Nahrungsmittel angeführt werden. Eine solche kann artifiziell bei Prüfkörper, etwa durch Kaffee, Tee, Tabak, oder Rotweinemulsion, im Rahmen der Untersuchung herbeigeführt werden. Bei der Lagerung von verschiedenen CAD/CAM Materialien in Rotwein konnte in anderen Untersuchungen bei allen Materialien eine Verfärbungstendenz festgestellt werden: Vita Enamic hatte im Vergleich zu den anderen Materialien (Shofu Block, Cerasmart, IPS Empress CAD, LAVA Ultimate, IPS e.max CAD, zwei versch. CAD/CAM-Komposite) nach 14 tägiger Lagerung in Kresselösung zusammen mit einem CAD/CAM Komposit die höchste Verfärbungstendenz [161]. Die Biegefestigkeit von Vita Enamic war im Vergleich zu den o.g. Materialien am geringsten und der größte Abtrag nach Belastung im Kausimulator (1,2 Millionen Zyklen, 50 N) an den antagonistischen Zähnen wurde durch Vita Enamic und die beiden Glaskeramiken verursacht [161]. Der Substanzverlust von Vita Enamic und den Kompositmaterialien war am geringsten [161]. Die quantitative Auswertung des Abtrages erfolgte nach der Belastung im Kausimulator mittels eines 3D-matchings [161].

Es bleibt also offen, inwieweit die in der vorliegenden Untersuchung beobachteten Oberflächenveränderungen an Vita Enamic einen vergleichsweise „positiven“ Effekt auf dessen Verfärbungstendenz im klinischen Setting haben. Im Vergleich zu Lava Ultimate konnte in einer anderen Studie bei Vita Enamic eine geringere Verfärbungstendenz gemessen werden [100]. Die Verfärbungstendenzen waren bei Lagerung in 55°C temperierten Medien größer als in den 37°C temperierten Medien [100]. Hinsichtlich ästhetischer Eigenschaften nach der Oberflächenvergütung und der Farbbeständigkeit nach UV-Alterung konnte für Vita Enamic die Verwendung der Glasurmasse und für Vita Surprinity die Politur empfohlen werden [89].

Die Oberflächenvergütung der Materialien Vita Enamic und Celtra Duo hat einen Einfluss auf den Glanz und die Oberflächentopographie der Materialien.

Das bedeutet zuvorderst für das Einsetzen von Restaurationen, dass Folgendes zu erwarten ist:

Celtra Duo hat nach der Oberflächenvergütung mittels Politur einen sehr hohen Glanz von durchschnittlich ~99 GU. Vita Enamic steht diesem Wert mit ~79 GU etwas nach, liegt aber glasiert mit durchschnittlich ~84 GU auch im oberen Bereich, in dem keine weitere Differenzierung mehr durch das menschliche Auge möglich ist. Die Rauigkeit der glasierten Vita Enamic Oberflächen liegt dabei mit im Mittel $R_a +0,28 \mu\text{m}$ irrelevant höher als die der polierten Vita Enamic Oberflächen. Der Glanz von glasiertem Celtra Duo kann mit ~34 GU und erhöhter Streuung ($SD = 13,32$) als im Vergleich nicht verwertbare Messung in Folge der Oberflächentopographie eingeordnet werden. Es ist mit Rücksicht auf die Abweichung des R_a Wertes von $+3,63 \mu\text{m}$ zum polierten Zustand jedoch nicht von einem klinisch relevanten Unterschied auszugehen. Bereits nach einem Jahr Nutzung einer zahnaufhellenden - aber auch handelsüblichen Zahnpasta - muss bei RIC-Materialien klinisch mit Veränderungen der Oberfläche gerechnet werden: Insbesondere bei Versorgungen im ästhetisch sichtbaren Bereich bei ansonsten unversorgtem Gebiss ist eine Verwendung von höher abrasiven Zahnpasten – konkret für das Hybrid-Material Vita Enamic - nicht zu empfehlen. Denn, alle Zahnpasten verringern die Glanzwerte der Vita Enamic Proben unabhängig von der Oberflächenvergütung. Wohingegen bei poliertem Vita Enamic die mittelwertigen Rauigkeitsparameter nach simulierter einjähriger Putzintervention durch alle Zahnpasten verringert wurden und so klinisch eine geringere Tendenz zur Einlagerung von Farbstoffen respektive deren einfachere oberflächliche Entfernung bedeuten könnte. Bei der mittels Kompositversiegelung vergüteten Oberfläche, von Vita Enamic glasiert, verringert Depurdent beide Rauigkeitsparameter (R_a und R_z), während Signal, Elmex und Black is White die o.g. Rauigkeitsparameter erhöht. In diesem Fall wäre die regelmäßige, in Intervallen angewendete Zahnpasta mit hohem RDA Wert als „Oberflächenversiegelung“ in Folge des Verschmierens der Kompositmatrix in die Lakunen des Keramikgitters hilfsweise zu erwägen. Auch bei Celtra Duo werden die Glanzwerte bei den Proben durch Putzintervention mit Elmex, Signal White now und Black is White verringert. Depurdent führt zur Erhöhung der Glanzwerte von Celtra Duo Proben in dem simulierten, vergleichsweise kurzen Zeitraum. Somit scheinen hier polierte, nicht

glasierte (also auch nicht bemalte) Restaurationen aus Celtra Duo von abrasiven Zahnpasten hinsichtlich des Glanzes und der Oberflächenparameter eher zu profitieren. Depurdent konnte die raueren Oberflächen oder die durch Elmex bereits aufgerauten Oberflächen häufig wieder „glätten“ (Surrogat: reduzierter Ra-Wert). Auf den REM-Aufnahmen und in den Glanzmessungen wurde jedoch bei Depurdent häufig elektronenmikroskopisch sichtbare Defekte in der Oberfläche und eine starke Abnahme der Glanzwerte bei Vita Enamic beobachtet. Daher kann die Zahnpasta Depurdent aus ästhetischen Gründen nicht bei Frontzahnrestaurationen aus ZLS und auch aus kariesprophylaktischen Gründen nicht empfohlen werden.

5 Zusammenfassung

Aufgrund neu verfügbarer CAD/CAM Materialien für die Chair- und Labside Fertigung von zahnärztlichen Restaurationen sowie eines breiteren Angebots an Zahnpasten mit zahnaufhellender Funktion im freien Handel untersuchte diese in-vitro-Studie die Wirkung des Zähneputzens auf die Oberflächen von zwei neuen Restormaterialien:

Bei der Zirkonoxid-infiltrierten Lithiumsilikatkeramik (ZLS) „Celtra Duo“ die polierte wie auch die keramisch glasierte Oberfläche und bei der Kunststoff-infiltrierten Keramik (RIC) „Vita Enamic“ ebenso die polierte wie auch eine Glasur mittels lichthärtendem Komposits als Oberfläche. Diese vier Oberflächen wurden mittels elektrischer Handzahnbürste (Oral-B Rundkopf-Zahnbürste) mit drei Zahnpasten mit zahnaufhellendem Effekt (Black is White, Signal White now, Depurdent) simulierte 12 Monate bearbeitet; wobei durch Herstellereinschränkung auf „2x wöchentlich“ bei Depurdent, eine Putzintervention mit einer Standardzahnpasta, „Elmex“, für die reguläre Interventionszeit vorangestellt wurde. Dazu vergleichbare Untersuchungen lagen zu Studienbeginn und auch bei Schrifterstellung in der Literatur nicht vor.

Insgesamt wurden bei 108 Proben hergestellt und vor sowie nach der Putzintervention hinsichtlich Glanz (in GU) und Oberflächentopographie (anhand von: Ra, und Rz) vermessen. Diese Daten wurden ergänzt durch Rasterelektronenmikroskopaufnahmen (bis zu 5000x Vergrößerung) jeweils einer Probe pro Zustand. Die Ergebnisse der Studie lassen nach deren Diskussion zu, die aufgestellten Forschungsfragen wie folgt zu beantworten:

1.) Oberflächengüten im Ausgangszustand der beiden Materialien

- i. Beim ZLS zeigte sich die Gruppe der glasierten Celtra Duo Proben durch deren Oberflächenprofil hinsichtlich Glanz und Rauigkeit nicht mit den polierten Gruppen vergleichbar. Die polierte Oberfläche von Celtra Duo wies sehr niedrige Rauigkeitsparameter und sehr hohe Glanzwerte im Ausgangszustand auf, die auch durch die REM-Bildgebung qualitativ

- bestätigt werden konnten. Die glasierte Gruppe beeinträchtigt die valide Vermessung von Glanz durch das Wellenprofil der Glasurmasse. Die erste Nullhypothese muss für ZLS abgelehnt werden, da die Art der Oberflächenvergütung einen Einfluss auf die topografischen und optischen Eigenschaften hat.
- ii. Bei RIC führte die Kompositglasur im Vergleich zu polierten Oberflächen zu durchschnittlich nur marginal höheren Glanzwerten und leicht erhöhten Rauigkeitsparametern mit einer größeren Streuung. Allerdings kann kein signifikanter Unterschied festgestellt werden, womit die erste Nullhypothese für RIC angenommen werden kann.
 - iii. Beim Vergleich von ZLS und RIC im polierten Ausgangszustand besteht kein statistisch signifikanter Unterschied bei einer Differenz der Mittelwerte von 19,97 GU und Ra 0,76 µm, bei höherem Glanz und niedrigerer Rauheit für ZLS. Die erste Nullhypothese kann in Bezug auf die polierten Oberflächen der beiden Materialklassen angenommen werden.
 - iv. Im Ergebnis von i. muss die erste Nullhypothese auch für den Vergleich der Oberflächen-vergüteten Materialien ZLS und RIC abgelehnt werden.

2.) Einfluss der Zahnpasten auf optische und topographische Eigenschaften

- i. Alle Zahnpasten haben unabhängig von der Oberflächenvergütung einen Glanzverlust in der Gruppe RIC verursacht, welcher auch mit bloßem Auge erkennbar ist. Bei den polierten Oberflächen von RIC wurden die Rauigkeitsparameter verringert und die Oberfläche somit glatter. Bei den glasierten Oberflächen erhöhten sich die Rauigkeitsparameter durch die täglich anwendbaren Zahnpasten. Die zweite Nullhypothese muss für RIC poliert und glasiert abgelehnt werden
- ii. Die Glanzwerte von ZLS poliert und glasiert wurden durch Putzintervention mit den täglich anwendbaren Zahnpasten nur

geringfügig verringert. Der Glanzverlust war bei beiden Oberflächenvergütungen mit bloßem Auge nicht erkennbar.

Die Rauigkeitsparameter der polierten Oberflächen von ZLS wurden durch die täglich anwendbaren Zahnpasten in einem geringen Ausmaß leicht erhöht. Die Rauigkeitsparameter der glasierten Oberflächen von ZLS wurden durch die täglich anwendbaren Zahnpasten nur geringfügig verändert. Nach einem Jahr simulierter Putzintervention mit den verwendeten Zahnpasten ist keine statistisch signifikante Auswirkung auf poliertes ZLS wie auch glasiertes ZLS festzustellen.

Die zweite Nullhypothese kann für ZLS poliert und glasiert angenommen werden.

- iii. Bei ZLS und RIC konnte die Oberflächenvergütung (Glasure) das Ausmaß des Glanzverlustes reduzieren.
- iv. In Anerkennung von 2.i. und 2.ii. sind RIC und ZLS in ihrer Oberflächenstabilität gegenüber der hier simulierten Einwirkungen nicht gleichwertig zu betrachten.

3.) Klinische Einordnung

Beim direkten Vergleich der beiden Materialien kann für die intraorale Anwendung im ästhetischen Bereich (insbesondere der Oberkieferfront) das Material ZLS unabhängig von der Oberflächenvergütung bevorzugt empfohlen werden, da RIC eine hohe Suszeptibilität zur Oberflächenveränderung durch Zahnpasten mit zahnaufhellendem Effekt aufweist. Neben eines hier nicht quantifizierten, aber qualitativ sichtbaren Volumenverlust erhöht eine vergleichsweise kurze Putzinterventionsdauer die Rauigkeitsparameter und damit die Tendenz zu Anlagerung von Biofilm und/oder Einlagerung von Verfärbungen, die nur durch erneute abrasive Maßnahmen entfernt werden können. Langfristig ist somit das ästhetische Outcome mit RIC Restaurationen im Vergleich zu ZLS als unsicher zu bewerten.

Die Untersuchung liefert darüber hinaus neue Forschungsfragen für weitere Untersuchungen zu Präzipitatsbildung von Zahnpasten auf den keramischen Oberflächen sowie die Quantifizierung des abgetragenen Volumens in Abhängigkeit zur Abrasionseinwirkung.

6 Literaturverzeichnis

1. Ainamo, J., Q. Xie, A. Ainamo, and P. Kallio (1997) *Assessment of the effect of an oscillating/rotating electric toothbrush on oral health A 12-month longitudinal study*. Journal of clinical periodontology 24 (1): p. 28-33.
2. Altman, D.G. and J.M. Bland (1983) *Measurement in medicine: the analysis of method comparison studies*. Journal of the Royal Statistical Society: Series D (The Statistician) 32 (3): p. 307-317.
3. Altman, D.G. and J.M. Bland (1999) *Statistics notes Variables and parameters*. Bmj 318 (7199): p. 1667.
4. Amaral, C.M., J.A. Rodrigues, M.C. Erhardt, M.W. Araujo, G.M. Marchi, H.O. Heymann, and L.A. Pimenta (2006) *Effect of whitening dentifrices on the superficial roughness of esthetic restorative materials*. J Esthet Restor Dent 18 (2): p. 102-8; discussion 109.
5. Amer, R., D. Kurklu, E. Kateeb, and R.R. Seghi (2014) *Three-body wear potential of dental yttrium-stabilized zirconia ceramic after grinding, polishing, and glazing treatments*. J Prosthet Dent 112 (5): p. 1151-5. DOI: 10.1016/j.prosdent.2013.12.021
6. Asmussen, E. (1985) *Clinical relevance of physical, chemical, and bonding properties of composite resins*. Oper Dent 10 (2): p. 61-73.
7. Attin, T., W. Buchalla, M. Gollner, and E. Hellwig (2000) *Use of variable remineralization periods to improve the abrasion resistance of previously eroded enamel*. Caries research 34 (1): p. 48-52.
8. Attin, T., W. Buchalla, and B. Putz (2001) *In vitro evaluation of different remineralization periods in improving the resistance of previously eroded bovine dentine against tooth-brushing abrasion*. Archives of oral biology 46 (9): p. 871-874.
9. Ausiello, P., S. Rengo, C.L. Davidson, and D.C. Watts (2004) *Stress distributions in adhesively cemented ceramic and resin-composite Class II inlay restorations: a 3D-FEA study*. Dent Mater 20 (9): p. 862-72. DOI: 10.1016/j.dental.2004.05.001
10. Awada, A. and D. Nathanson (2015) *Mechanical properties of resin-ceramic CAD/CAM restorative materials*. J Prosthet Dent 114 (4): p. 587-93. DOI: 10.1016/j.prosdent.2015.04.016
11. Barbieri, G.M., E.G. Mota, S.A. Rodrigues-Junior, and L.H. Burnett, Jr. (2011) *Effect of whitening dentifrices on the surface roughness of commercial composites*. J Esthet Restor Dent 23 (5): p. 338-45. DOI: 10.1111/j.1708-8240.2011.00426.x
12. Barbour, M.E. and G.D. Rees (2006) *The role of erosion, abrasion and attrition in tooth wear*. J Clin Dent 17 (4): p. 88-93.
13. Barnes, C.M., T.W. Weatherford, 3rd, and L. Menaker (1993) *A comparison of the Braun Oral-B Plaque Remover (D5) electric and a manual toothbrush in affecting gingivitis*. J Clin Dent 4 (2): p. 48-51.
14. Baroudi, K. and S.N. Ibraheem (2015) *Assessment of chair-side computer-aided design and computer-aided manufacturing restorations: a review of the literature*. Journal of international oral health: JIOH 7 (4): p. 96.

15. Bartlett, D.W., B.G. Smith, and R.F. Wilson (1994) *Comparison of the effect of fluoride and non-fluoride toothpaste on tooth wear in vitro and the influence of enamel fluoride concentration and hardness of enamel*. Br Dent J 176 (9): p. 346-8. DOI: 10.1038/sj.bdj.4808450
16. Bauch, J. and R. Rosenkranz (2017) *REM-Rasterelektronenmikroskopie, in Physikalische Werkstoffdiagnostik*, Springer. p. 6-7.
17. Belli, R., M. Wendler, D. de Ligny, M.R. Cicconi, A. Petschelt, H. Peterlik, and U. Lohbauer (2017) *Chairside CAD/CAM materials. Part 1: Measurement of elastic constants and microstructural characterization*. Dental Materials 33 (1): p. 84-98.
18. Bentley, E.M., R.P. Ellwood, and R.M. Davies (1999) *Fluoride ingestion from toothpaste by young children*. Br Dent J 186 (9): p. 460-2. DOI: 10.1038/sj.bdj.4800140
19. Bergstrom, J. and S. Lavstedt (1979) *An epidemiologic approach to toothbrushing and dental abrasion*. Community Dent Oral Epidemiol 7 (1): p. 57-64. DOI: 10.1111/j.1600-0528.1979.tb01186.x
20. Bewertung, Z.C.W.Z.-e. (2006) *der Weissmacher Zahnpasten*. Zahnaerztl Mitt.
21. Bland, J.M. and D. Altman (1986) *Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement*. The lancet 327 (8476): p. 307-310.
22. Bland, J.M. and D.G. Altman (1995) *Comparing methods of measurement: why plotting difference against standard method is misleading*. The lancet 346 (8982): p. 1085-1087.
23. Bland, J.M. and D.G. Altman (2007) *Agreement between methods of measurement with multiple observations per individual*. Journal of biopharmaceutical statistics 17 (4): p. 571-582.
24. Bojemüller, E., B. Just, and J. Fischer (2014) *Eine neue Werkstoffklasse mit dualer Netzwerkstruktur*. Quintessenz Zahntech 40: p. 622-629.
25. Bollen, C.M., P. Lambrechts, and M. Quirynen (1997) *Comparison of surface roughness of oral hard materials to the threshold surface roughness for bacterial plaque retention: a review of the literature*. Dent Mater 13 (4): p. 258-69.
26. Bollen, C.M., W. Papaioanno, J. Van Eldere, E. Schepers, M. Quirynen, and D. Van Steenberghe (1996) *The influence of abutment surface roughness on plaque accumulation and peri-implant mucositis*. Clinical oral implants research 7 (3): p. 201-211.
27. Bösch, J. (2020) *Neue CAD/CAM-fähige Kunststoff-, Keramik- und Hybridmaterialien im Vergleich—eine in-vitro-Studie*.
28. Çakmak, G., M.G. Subaşı, M. Sert, and B. Yilmaz (2021) *Effect of surface treatments on wear and surface properties of different CAD-CAM materials and their enamel antagonists*. The journal of prosthetic dentistry.
29. Camargo, I.M., M. Saiki, M.B. Vasconcellos, and D.M. Avila (2001) *Abrasiveness evaluation of silica and calcium carbonate used in the production of dentifrices*. J Cosmet Sci 52 (3): p. 163-7.

30. Campbell, P.M., W.M. Johnston, and W.J. O'Brien (1986) *Light scattering and gloss of an experimental quartz-filled composite*. J Dent Res 65 (6): p. 892-4. DOI: 10.1177/00220345860650060501
31. Cavalcante, L.M., K. Masouras, D.C. Watts, L.A. Pimenta, and N. Silikas (2009) *Effect of nanofillers' size on surface properties after toothbrush abrasion*. Am J Dent 22 (1): p. 60-4.
32. Chatzivasileiou, K., I. Emmanouil, E. Kotsiomiti, and A. Pissiotis (2013) *Polishing of denture base acrylic resin with chairside polishing kits: an SEM and surface roughness study*. International Journal of Prosthodontics 26 (1).
33. Cho, L.R., Y.J. Yi, and S.J. Heo (2002) *Effect of tooth brushing and thermal cycling on a surface change of ceromers finished with different methods*. J Oral Rehabil 29 (9): p. 816-22.
34. Chung, K.H. (1994) *Effects of finishing and polishing procedures on the surface texture of resin composites*. Dent Mater 10 (5): p. 325-30.
35. Cong, W.L., P.F. Zhang, and Z.J. Pei (2009) *Experimental investigations on material removal rate and surface roughness in lapping of substrate wafers: a literature review*. in *Key Engineering Materials*. Trans Tech Publ.
36. Conrad, H.J., W.J. Seong, and I.J. Pesun (2007) *Current ceramic materials and systems with clinical recommendations: a systematic review*. J Prosthet Dent 98 (5): p. 389-404. DOI: 10.1016/S0022-3913(07)60124-3
37. Craig, G., K. Powell, and M. Cooper (1981) *Caries progression in primary molars: 24-month results from a minimal treatment programme*. Community dentistry and oral epidemiology 9 (6): p. 260-265.
38. Crawford, A., L. McAllan, J. Murray, and A. Brook (1975) *Oral hygiene instruction and motivation in children using manual and electric toothbrushes*. Community dentistry and oral epidemiology 3 (6): p. 257-261.
39. da Costa, J., A. Adams-Belusko, K. Riley, and J.L. Ferracane (2010) *The effect of various dentifrices on surface roughness and gloss of resin composites*. J Dent 38 Suppl 2: p. e123-8. DOI: 10.1016/j.jdent.2010.02.005
40. Dal Piva, A.M.d.O., M.A. Bottino, L.C. Anami, A. Werner, C.J. Kleverlaan, R. Lo Giudice, F. Famà, L.R.d. Silva-Concilio, and J.P.M. Tribst (2021) *Toothbrushing Wear Resistance of Stained CAD/CAM Ceramics*. Coatings 11 (2): p. 224.
41. Davidson, C.L. and A.J. de Gee (1996) *Verschleissverhalten Dentaler Composite-Materialien*. Phillip Journal 13: p. 171 - 177. DOI: urn:nbn:nl:ui:29-17414
42. Davies, R., C. Scully, and A.J. Preston (2010) *Dentifrices--an update*. Med Oral Patol Oral Cir Bucal 15 (6): p. e976-82. DOI: 10.4317/medoral.15.e976
43. de Andrade, G.S., M.G. Augusto, B.V. Simões, C. Pagani, G.d.S.F.A. Saavedra, and E. Bresciani (2021) *Impact of simulated toothbrushing on surface properties of chairside CAD-CAM materials: An in vitro study*. The Journal of Prosthetic Dentistry 125 (3): p. 469. e1-469. e6.
44. De Angelis, F., C. D'Arcangelo, N. Malíšková, L. Vanini, and M. Vadini (2020) *Wear properties of different additive restorative materials used for onlay/overlay posterior restorations*. Operative Dentistry 45 (3): p. E156-E166.

45. de Fucio, S.B., R.M. Puppini-Rontani, F.G. de Carvalho, O. Mattos-Graner Rde, L. Correr-Sobrinho, and F. Garcia-Godoy (2009) *Analyses of biofilms accumulated on dental restorative materials*. Am J Dent 22 (3): p. 131-6.
46. De Menezes, M., C.P. Turssi, A.T. Hara, D.C. Messias, and M.C. Serra (2004) *Abrasion of eroded root dentine brushed with different toothpastes*. Clin Oral Investig 8 (3): p. 151-5. DOI: 10.1007/s00784-004-0262-7
47. DeSimone, J.A., P.D. Harms, and A.J. DeSimone (2015) *Best practice recommendations for data screening*. Journal of organizational behavior 36 (2): p. 171-181. DOI: 10.1002/job.1962
48. Deters, L. (2004) *Grundsätzliches zu Reibung und Verschleiß in der technischen Anwendung*. Magdeburger Wissenschaftsjournal online (1): p. 16-26.
49. Dörfer, C.E. (2010) *Methods to determine dentifrice abrasiveness*. Professional Audience Communications.
50. Dyer, D., M. Addy, and R.G. Newcombe (2000) *Studies in vitro of abrasion by different manual toothbrush heads and a standard toothpaste*. J Clin Periodontol 27 (2): p. 99-103. DOI: 10.1034/j.1600-051x.2000.027002099.x
51. Esteves-Oliveira, M., N. Santos, H. Meyer-Lückel, R. Wierichs, and J. Rodrigues (2017) *Caries-preventive effect of anti-erosive and nano-hydroxyapatite-containing toothpastes in vitro*. Clinical oral investigations 21 (1): p. 291-300.
52. Evans, C., E. Paul, D. Dornfeld, D. Lucca, G. Byrne, M. Tricard, F. Klocke, O. Dambon, and B. Mullany (2003) *Material removal mechanisms in lapping and polishing*. CIRP annals 52 (2): p. 611-633.
53. Fasbinder, D.J. (2010) *Materials for chairside CAD/CAM restorations*. Compend Contin Educ Dent 31 (9): p. 702-4, 706, 708-9.
54. Fasbinder, D.J. and G.F. Neiva (2016) *Surface evaluation of polishing techniques for new resilient CAD/CAM restorative materials*. Journal of Esthetic and Restorative Dentistry 28 (1): p. 56-66.
55. Featherstone, J.D. (2008) *Dental caries: a dynamic disease process*. Aust Dent J 53 (3): p. 286-91. DOI: 10.1111/j.1834-7819.2008.00064.x
56. Ferracane, J.L., J.C. Mitchem, J.R. Condon, and R. Todd (1997) *Wear and marginal breakdown of composites with various degrees of cure*. J Dent Res 76 (8): p. 1508-16. DOI: 10.1177/00220345970760081401
57. Flury, S., E. Diebold, A. Peutzfeldt, and A. Lussi (2017) *Effect of artificial toothbrushing and water storage on the surface roughness and micromechanical properties of tooth-colored CAD-CAM materials*. The Journal of prosthetic dentistry 117 (6): p. 767-774.
58. Flury, S., A. Lussi, and B. Zimmerli (2010) *Performance of different polishing techniques for direct CAD/CAM ceramic restorations*. Operative dentistry 35 (4): p. 470-481.
59. Francolini, I., A. Piozzi, and G. Donelli (2018) *Usnic acid: potential role in management of wound infections*. Advances in Microbiology, Infectious Diseases and Public Health: p. 31-41.
60. Frandsen, A. (1986) *Dental plaque control measures and oral hygiene practices*. Mechanical oral hygiene practices: p. 9-11.

61. Franzò, D., C.J. Philpotts, T.F. Cox, and A. Joiner (2010) *The effect of toothpaste concentration on enamel and dentine wear in vitro*. Journal of dentistry 38 (12): p. 974-979.
62. Ganss, C., M. Möllers, and N. Schlueter (2017) *Do abrasives play a role in toothpaste efficacy against erosion/abrasion?* Caries research 51 (1): p. 52-57.
63. Gebisszustand, M., T. Jaeggi, M. Schaffner, W. Bürgin, and A. Lussi (1999) *Erosionen und keilförmige Defekte bei Rekruten der Schweizer Armee*. Schweiz Monatsschr Zahnmed 109 (11): p. 1171.
64. Glendor, U. (2008) *Epidemiology of traumatic dental injuries--a 12 year review of the literature*. Dent Traumatol 24 (6): p. 603-11. DOI: 10.1111/j.1600-9657.2008.00696.x
65. Gorman, W.J. (1967) *Prevalence and etiology of gingival recession*. J Periodontol 38 (4): p. 316-22. DOI: 10.1902/jop.1967.38.4.316
66. Grau, A. (2018) *Abrasionsbeständigkeit verschiedener CAD/CAM-Materialien sowie die Zuverlässigkeit der Volumenverlustquantifizierung*. Imu.
67. Harnacke, D., T. Winterfeld, J. Erhardt, N. Schlueter, C. Ganss, J. Margraf-Stiksrud, and R. Deinzer (2015) *What is the best predictor for oral cleanliness after brushing? Results from an observational cohort study*. J Periodontol 86 (1): p. 101-7. DOI: 10.1902/jop.2014.140152
68. Hawkins, B.F., F.J. Kohout, P.A. Lanson, and A. Heckert (1986) *Duration of toothbrushing for effective plaque control*. Quintessence Int 17 (6): p. 361-5.
69. He, L.H., D. Purton, and M. Swain (2011) *A novel polymer infiltrated ceramic for dental simulation*. J Mater Sci Mater Med 22 (7): p. 1639-43. DOI: 10.1007/s10856-011-4350-3
70. Heger, R. (2008) *Abrasions-und Attritionserscheinungen im Gebiss-eine bevölkerungsrepräsentative Studie im Stadtgebiet Halle (Saale) und Leipzig*.
71. Heintze, S.D., M. Forjanic, K. Ohmiti, and V. Rousson (2010) *Surface deterioration of dental materials after simulated toothbrushing in relation to brushing time and load*. Dent Mater 26 (4): p. 306-19. DOI: 10.1016/j.dental.2009.11.152
72. Holand, W., M. Schweiger, R. Watzke, A. Peschke, and H. Kappert (2008) *Ceramics as biomaterials for dental restoration*. Expert Rev Med Devices 5 (6): p. 729-45. DOI: 10.1586/17434440.5.6.729
73. Huang, S., S. Gao, L. Cheng, and H. Yu (2011) *Remineralization potential of nano-hydroxyapatite on initial enamel lesions: an in vitro study*. Caries research 45 (5): p. 460-468.
74. Ikeda, M., K. Matin, T. Nikaido, R.M. Foxton, and J. Tagami (2007) *Effect of surface characteristics on adherence of S. mutans biofilms to indirect resin composites*. Dent Mater J 26 (6): p. 915-23.
75. Ilie, N., M. Rosentritt, and U. Lohbauer (2016) *Update Materialforschung – direkte kunststoffbasierte Komposite*. ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt 125 (03): p. 2-7. DOI: 10.1055/s-0042-102608
76. Jaeggi, T. and A. Lussi (1999) *Toothbrush abrasion of erosively altered enamel after intraoral exposure to saliva: an in situ study*. Caries Res 33 (6): p. 455-61. DOI: 10.1159/000016551

77. Johannsen, G., G. Tellefsen, A. Johannsen, and A. Liljeborg (2013) *The importance of measuring toothpaste abrasivity in both a quantitative and qualitative way.* Acta Odontol Scand 71 (3-4): p. 508-17. DOI: 10.3109/00016357.2012.696693
78. Joiner, A. (2006) *Review of the extrinsic stain removal and enamel/dentine abrasion by a calcium carbonate and perlite containing whitening toothpaste.* Int Dent J 56 (4): p. 175-80.
79. Joiner, A. (2010) *Whitening toothpastes: a review of the literature.* J Dent 38 Suppl 2: p. e17-24. DOI: 10.1016/j.jdent.2010.05.017
80. Joiner, A., M.J. Pickles, S. Lynch, and T.F. Cox (2008) *The measurement of enamel wear by four toothpastes.* Int Dent J 58 (1): p. 23-8.
81. Joiner, A., M.J. Pickles, C. Tanner, E. Weader, and P. Doyle (2004) *An in situ model to study the toothpaste abrasion of enamel.* J Clin Periodontol 31 (6): p. 434-8. DOI: 10.1111/j.1600-051X.2004.00497.x
82. Joiner, A., A. Schwarz, C.J. Philpotts, T.F. Cox, K. Huber, and M. Hannig (2008) *The protective nature of pellicle towards toothpaste abrasion on enamel and dentine.* J Dent 36 (5): p. 360-8. DOI: 10.1016/j.jdent.2008.01.010
83. Jones, C.S., R.W. Billington, and G.J. Pearson (2004) *The in vivo perception of roughness of restorations.* Br Dent J 196 (1): p. 42-5; discussion 31. DOI: 10.1038/sj.bdj.4810881
84. Jordan, A.R. and W. Micheelis (2016) *Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie- (DMS IV).* Deutscher Zahnärzte Verlag DÄV.
85. Kamonkhantikul, K., M. Arksornnukit, S. Lauvahutanon, and H. Takahashi (2016) *Toothbrushing alters the surface roughness and gloss of composite resin CAD/CAM blocks.* Dent Mater J 35 (2): p. 225-32. DOI: 10.4012/dmj.2015-228
86. Kamonkhantikul, K., M. Arksornnukit, S. Lauvahutanon, and H. Takahashi (2016) *Toothbrushing alters the surface roughness and gloss of composite resin CAD/CAM blocks.* Dental materials journal 35 (2): p. 225-232.
87. Kamonkhantikul, K., M. Arksornnukit, H. Takahashi, M. Kanehira, and W.J. Finger (2014) *Polishing and toothbrushing alters the surface roughness and gloss of composite resins.* Dent Mater J 33 (5): p. 599-606. DOI: 10.4012/dmj.2014-111
88. Kaup, M., J. Niermann, and K. Ott (1999) *REINIGUNGSFAHIGKEIT ELEKTRISCHER ZAHNBURSTEN BEI NICHT-EUGNATHER ZAHNSTELLUNG.* Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 54 (2): p. 103-107.
89. Kilinc, H. and S. Turgut (2018) *Optical behaviors of esthetic CAD-CAM restorations after different surface finishing and polishing procedures and UV aging: An in vitro study.* J Prosthet Dent 120 (1): p. 107-113. DOI: 10.1016/j.prosdent.2017.09.019
90. Kodaka, T., M. Kuroiwa, M. Kuroiwa, J. Okumura, R. Mori, S. Hirasawa, and M. Kobori (2001) *Effects of brushing with a dentifrice for sensitive teeth on tubule occlusion and abrasion of dentin.* J Electron Microsc (Tokyo) 50 (1): p. 57-64. DOI: 10.1093/jmicro/50.1.57
91. Koizumi, H., O. Saiki, H. Nogawa, H. Hiraba, T. Okazaki, and H. Matsumura (2015) *Surface roughness and gloss of current CAD/CAM resin composites before and after toothbrush abrasion.* Dent Mater J 34 (6): p. 881-7. DOI: 10.4012/dmj.2015-177

92. Koke U, D.J., Rammelsberg P, Gilde H, (2003) <Untersuchung zur Zwei-Medien-Abrasion von Titanverblendkeramiken.PDF>. Deutsche Zahnärztliche Zeitung 58 (6): p. 343-346.
93. Krejci, I. and F. Lutz (1986) *Seitenzahn-Composite Warum (noch) nicht*. Phillip Journal 1: p. 5-12.
94. Kwon, S.R., S.R. Kurti, U. Oyoyo, and Y. Li (2015) *Effect of various tooth whitening modalities on microhardness, surface roughness and surface morphology of the enamel*. Odontology 103 (3): p. 274-279.
95. Labban, N., M.D. Al Amri, S.M. Alnafaiy, S.M. Alhijji, M.A. Alenizy, M. Iskandar, and S. Feitosa (2021) *Influence of Toothbrush Abrasion and Surface Treatments on Roughness and Gloss of Polymer-Infiltrated Ceramics*. Polymers (Basel) 13 (21). DOI: 10.3390/polym13213694
96. Lauer, H. and P. Weigl (2005) *Vollkeramische Kronen und Brücken-Potential zur Routinetherapie*. Deutscher Zahnärztlicher Kalender: p. 179-193.
97. Lauvahutanon, S., H. Takahashi, M. Oki, M. Arksornnukit, M. Kanehira, and W.J. Finger (2015) *In vitro evaluation of the wear resistance of composite resin blocks for CAD/CAM*. Dental materials journal 34 (4): p. 495-502.
98. Lauvahutanon, S., H. Takahashi, M. Shiozawa, N. Iwasaki, Y. Asakawa, M. Oki, W.J. Finger, and M. Arksornnukit (2014) *Mechanical properties of composite resin blocks for CAD/CAM*. Dent Mater J 33 (5): p. 705-10. DOI: 10.4012/dmj.2014-208
99. Lelli, M., A. Putignano, M. Marchetti, I. Foltran, F. Mangani, M. Procaccini, N. Roveri, and G. Orsini (2014) *Remineralization and repair of enamel surface by biomimetic Zn-carbonate hydroxyapatite containing toothpaste: a comparative in vivo study*. Frontiers in physiology 5: p. 333.
100. Liebermann, A., D. Vehling, M. Eichberger, and B. Stawarczyk (2019) *Impact of storage media and temperature on color stability of tooth-colored CAD/CAM materials for final restorations*. Journal of applied biomaterials & functional materials 17 (4): p. 2280800019836832.
101. Liebermann, A., T. Wimmer, P.R. Schmidlin, H. Scherer, P. Löffler, M. Roos, and B. Stawarczyk (2016) *Physicomechanical characterization of polyetheretherketone and current esthetic dental CAD/CAM polymers after aging in different storage media*. The Journal of prosthetic dentistry 115 (3): p. 321-328. e2.
102. Liljeborg, A., G. Tellefsen, and G. Johannsen (2010) *The use of a profilometer for both quantitative and qualitative measurements of toothpaste abrasivity*. Int J Dent Hyg 8 (3): p. 237-43. DOI: 10.1111/j.1601-5037.2009.00433.x
103. Lima, C.M., N.R.D. Silva, J.D. Martins, J.S. Miranda, R. Tanaka, R. Souza, and F.P.P. Leite (2021) *Effect of different surface treatments on the biaxial flexure strength, Weibull characteristics, roughness, and surface topography of bonded CAD/CAM silica-based ceramics*. Dent Mater 37 (3): p. e151-e161. DOI: 10.1016/j.dental.2020.11.009
104. Lippert, F. (2013) *An introduction to toothpaste - its purpose, history and ingredients*. Monogr Oral Sci 23: p. 1-14. DOI: 10.1159/000350456

105. Loe, H., E. Theilade, and S.B. Jensen (1965) *Experimental Gingivitis in Man*. J Periodontol 36: p. 177-87. DOI: 10.1902/jop.1965.36.3.177
106. Lussi, A., B. Megert, D. Eggenberger, and T. Jäggi (2008) *Impact of different toothpastes on the prevention of erosion*. Caries research 42 (1): p. 62-67.
107. Macdonald, E., A. North, B. Maggio, F. Sufi, S. Mason, C. Moore, M. Addy, and N.X. West (2010) *Clinical study investigating abrasive effects of three toothpastes and water in an in situ model*. J Dent 38 (6): p. 509-16. DOI: 10.1016/j.jdent.2010.03.007
108. Macgregor, I.D. and A.J. Rugg-Gunn (1986) *Effect of filming on tooth brushing performance in uninstructed adults in north-east England*. Community dentistry and oral epidemiology 14 (6): p. 320-322.
109. Maldupa, I., A. Brinkmane, I. Rendeniece, and A. Mihailova (2012) *Evidence based toothpaste classification, according to certain characteristics of their chemical composition*. Stomatologija 14 (1): p. 12-22.
110. Matzinger, M., S. Hahnel, V. Preis, and M. Rosentritt (2019) *Polishing effects and wear performance of chairside CAD/CAM materials*. Clin Oral Investig 23 (2): p. 725-737. DOI: 10.1007/s00784-018-2473-3
111. Matzinger, M.D. (2018) *Poliereffekte und Verschleißverhalten von Chairside CAD/CAM-Materialien*.
112. Mc Kendrick, A., L. Barbenel, and W. Mc Hugh (1968) *A two-year comparison of hand and electric toothbrushes*. Journal of periodontal research 3 (3): p. 224-231.
113. McCabe, J., S. Molyvda, S. Rolland, S. Rusby, and T. Carrick (2002) *Two-and three-body wear of dental restorative materials*. International dental journal 52 (S5): p. 406-416.
114. McCracken, G.I., J. Janssen, M. Swan, N. Steen, M. de Jager, and P.A. Heasman (2003) *Effect of brushing force and time on plaque removal using a powered toothbrush*. J Clin Periodontol 30 (5): p. 409-13.
115. McLey, L., R.L. Boyd, and S. Sarker (1997) *Clinical and laboratory evaluation of powered electric toothbrushes: laboratory determination of relative abrasion of three powered toothbrushes*. J Clin Dent 8 (3 Spec No): p. 76-80.
116. Micheelis, W. (1999) *Dritte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS III): Ergebnisse, Trends und Problemanalysen auf der Grundlage bevölkerungsrepräsentativer Stichproben in Deutschland 1997*. Deutscher Ärzte-Verlag.
117. Monteiro, B. and A.M. Spohr (2015) *Surface Roughness of Composite Resins after Simulated Toothbrushing with Different Dentifrices*. J Int Oral Health 7 (7): p. 1-5.
118. Moore, C. and M. Addy (2005) *Wear of dentine in vitro by toothpaste abrasives and detergents alone and combined*. Journal of clinical periodontology 32 (12): p. 1242-1246.
119. Morgan, M. (2004) *Finishing and polishing of direct posterior resin restorations*. Pract Proced Aesthet Dent 16 (3): p. 211-7; quiz 218.
120. Mormann, W.H., B. Stawarczyk, A. Ender, B. Sener, T. Attin, and A. Mehl (2013) *Wear characteristics of current aesthetic dental restorative CAD/CAM materials*:

- two-body wear, gloss retention, roughness and Martens hardness.* J Mech Behav Biomed Mater 20: p. 113-25. DOI: 10.1016/j.jmbbm.2013.01.003
121. Mörmann, W.H., B. Stawarczyk, A. Ender, B. Sener, T. Attin, and A. Mehl (2013) *Wear characteristics of current aesthetic dental restorative CAD/CAM materials: two-body wear, gloss retention, roughness and Martens hardness.* Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 20: p. 113-125.
 122. Mühlemann, S., S. Stromeyer, A. Ioannidis, T. Attin, C.H. Hämmerle, and M. Özcan (2021) *Change in Color and Gloss Parameters of Stained Monolithic Resin-Ceramic CAD/CAM Materials After Simulated Aging: An In Vitro Study.* The International Journal of Prosthodontics 34 (1): p. 79-87.
 123. Neme, A.L., K.B. Frazier, L.B. Roeder, and T.L. Debner (2002) *Effect of prophylactic polishing protocols on the surface roughness of esthetic restorative materials.* Oper Dent 27 (1): p. 50-8.
 124. Nguyen, J.-F., V. Migonney, N.D. Ruse, and M. Sadoun (2012) *Resin composite blocks via high-pressure high-temperature polymerization.* Dental materials 28 (5): p. 529-534.
 125. O'Brien, W.J., W.M. Johnston, F. Fanian, and S. Lambert (1984) *The surface roughness and gloss of composites.* J Dent Res 63 (5): p. 685-8. DOI: 10.1177/00220345840630051601
 126. Okamura, K., H. Koizumi, A. Kodaira, H. Nogawa, and T. Yoneyama (2019) *Surface properties and gloss of CAD/CAM composites after toothbrush abrasion testing.* J Oral Sci 61 (2): p. 358-363. DOI: 10.2334/josnusd.18-0350
 127. Oliveira-Junior, O.B., L. Buso, F.H. Fujiy, G. Lombardo, F. Campos, H.R. Sarmiento, and R. Souza (2013) *Influence of polishing procedures on the surface roughness of dental ceramics made by different techniques.* Gen Dent 61 (1): p. e4-8.
 128. Pader, M. and M. Pader (1988) *Oral hygiene products and practice.*
 129. Pallav, P., A. De Gee, A. Werner, and C. Davidson (1993) *Influence of shearing action of food on contact stress and subsequent wear of stress-bearing composites.* Journal of dental research 72 (1): p. 56-61.
 130. Paolantonio, M., S. D'Ercole, G. Perinetti, D. Tripodi, G. Catamo, E. Serra, C. Brue, and R. Piccolomini (2004) *Clinical and microbiological effects of different restorative materials on the periodontal tissues adjacent to subgingival class V restorations.* J Clin Periodontol 31 (3): p. 200-7. DOI: 10.1111/j.0303-6979.2004.00472.x
 131. Passos, L., Y. Torrealba, B. Linke, A. Street, and S. Passos (2018) *Fracture strength of CAD/CAM posterior ceramic crowns after manual enhancement of occlusal morphology.* International journal of computerized dentistry 21 (3): p. 191-200.
 132. Peutzfeldt, A. and E. Asmussen (1996) *In vitro wear, hardness, and conversion of diacetyl-containing and propanal-containing resin materials.* Dent Mater 12 (2): p. 103-8. DOI: 10.1016/S0109-5641(96)80076-5
 133. Preber, H., V. Ylipää, J. Bergström, and H. Ryden (1991) *A comparative study of plaque removing efficiency using rotary electric and manual toothbrushes.* Swedish dental journal 15 (5): p. 229-234.

134. Priest, G. and J. Priest (2004) *Promoting esthetic procedures in the prosthodontic practice*. Journal of Prosthodontics: Implant, Esthetic and Reconstructive Dentistry 13 (2): p. 111-117.
135. Quirynen, M., C.M. Bollen, W. Papaioannou, J. Van Eldere, and D. van Steenberghe (1996) *The influence of titanium abutment surface roughness on plaque accumulation and gingivitis: short-term observations*. Int J Oral Maxillofac Implants 11 (2): p. 169-78.
136. Rashid, H. (2014) *The effect of surface roughness on ceramics used in dentistry: A review of literature*. European journal of dentistry 8 (4): p. 571.
137. Rayyan, M.M., M. Aboushelib, N.M. Sayed, A. Ibrahim, and R. Jimbo (2015) *Comparison of interim restorations fabricated by CAD/CAM with those fabricated manually*. J Prosthet Dent 114 (3): p. 414-9. DOI: 10.1016/j.prosdent.2015.03.007
138. Reis, A.F., M. Giannini, J.R. Lovadino, and G.M. Ambrosano (2003) *Effects of various finishing systems on the surface roughness and staining susceptibility of packable composite resins*. Dent Mater 19 (1): p. 12-8.
139. Robinson, P., D. Maddalozzo, and S. Breslin (1997) *A six-month clinical comparison of the efficacy of the Sonicare and the Braun Oral-B electric toothbrushes on improving periodontal health in adult periodontitis patients*. The Journal of clinical dentistry 8 (1 Spec No): p. 4-9.
140. Rodemer, T. (2021) *Einfluss von Nano-Hydroxylapatit auf die Bildung von Kalziumfluoridglobulischichten auf Schmelz- und Dentinoberflächen in vitro*.
141. Roselino, L.d.M.R., M.A. Chinelatti, C.C. Alandia-Román, and F.d.C. Pires-de-Souza (2015) *Effect of brushing time and dentifrice abrasiveness on color change and surface roughness of resin composites*. Brazilian dental journal 26 (5): p. 507-513.
142. Roselino, L.d.M.R., D.R. Cruvinel, M.A. Chinelatti, and F.d.C.P. Pires-de (2013) *Effect of brushing and accelerated ageing on color stability and surface roughness of composites*. Journal of dentistry 41: p. e54-e61.
143. Roveri, N., E. Battistella, I. Foltran, E. Foresti, M. Iafisco, M. Lelli, B. Palazzo, and L. Rimondini (2008) *Synthetic biomimetic carbonate-hydroxyapatite nanocrystals for enamel remineralization*. in *Advanced Materials Research*. Trans Tech Publ.
144. Ruse, N.D. and M.J. Sadoun (2014) *Resin-composite blocks for dental CAD/CAM applications*. J Dent Res 93 (12): p. 1232-4. DOI: 10.1177/0022034514553976
145. Sangnes, G. and P. Gjermo (1976) *Prevalence of oral soft and hard tissue lesions related to mechanical toothcleansing procedures*. Community Dent Oral Epidemiol 4 (2): p. 77-83. DOI: 10.1111/j.1600-0528.1976.tb01607.x
146. Schemehorn, B. and J. Keil (1995) *The effect of an oscillating/rotating electric toothbrush and a sonic toothbrush on removal of stain from enamel surfaces*. The Journal of clinical dentistry 6 (4): p. 194-197.
147. Scherge, M., S. Sarembe, A. Kiesow, and M. Petzold (2013) *Dental tribology at the microscale*. Wear 297 (1-2): p. 1040-1044.
148. Schlagenhauf, U., K.-H. Kunzelmann, C. Hannig, T.W. May, H. Hösl, M. Gratza, G. Viergutz, M. Nazet, S. Schamberger, and P. Proff (2018) *Microcrystalline*

- hydroxyapatite is not inferior to fluorides in clinical caries prevention: a randomized, double-blind, non-inferiority trial.* bioRxiv: p. 306423.
149. Schmeißer, J.K.L. (2016) *Abrasionsbeständigkeit verschiedener CAD/CAM-Hochleistungskunststoffe bei künstlicher Alterung in einem Kausimulator.* Imu.
 150. Schmidlin, P.R., T. Pasqualetti, T. Imfeld, M. Besek, and P. REM (2003) *Ein Modell zur Simulation des Approximalverschleisses in vitro.* SCHWEIZER MONATSSCHRIFT FÜR ZAHNMEDIZIN 113 (4): p. 427-433.
 151. Schweitzer, F., S. Spintzyk, J. Geis-Gerstorfer, and F. Huettig (2020) *Influence of minimal extended firing on dimensional, optical, and mechanical properties of crystalized zirconia-reinforced lithium silicate glass ceramic.* Journal of the mechanical behavior of biomedical materials 104: p. 103644.
 152. Sen, N., B. Tuncelli, and G. Goller (2018) *Surface deterioration of monolithic CAD/CAM restorative materials after artificial abrasive toothbrushing.* J Adv Prosthodont 10 (4): p. 271-278. DOI: 10.4047/jap.2018.10.4.271
 153. Senawongse, P. and P. Pongprueksa (2007) *Surface roughness of nanofill and nanohybrid resin composites after polishing and brushing.* J Esthet Restor Dent 19 (5): p. 265-73; discussion 274-5. DOI: 10.1111/j.1708-8240.2007.00116.x
 154. Setz, J., J. Geis-Gerstorfer, and W. Lin (1991) *[The effect of inorganic fillers on the properties of light-curing composites].* Dtsch Zahnärztl Z 46 (10): p. 657-60.
 155. Shibasaki, N., V. Cavalli, M.C. Oliveira, J.P. Barbosa, G.B. MF, and M.M. LR (2021) *Influence Of Surface Treatment On The Physical Properties And Biofilm Formation Of Zirconia-Reinforced Lithium Silicate Ceramics: In Vitro Trial.* The International Journal of Prosthodontics.
 156. Shinogaya, T., M. Bakke, C.E. Thomsen, A. Vilmann, A. Sodeyama, and M. Matsumoto (2001) *Effects of ethnicity, gender and age on clenching force and load distribution.* Clin Oral Investig 5 (1): p. 63-8.
 157. Siam, R., G. Elnaggar, and E. Hassanien (2021) *Surface roughness and translucency of glazed lithium disilicate (IPS E. Max) vs. glazed and polished" zirconia-reinforced lithium silicate"(Celtra duo)(in vitro study).*
 158. Skaare, A.B. and I. Jacobsen (2005) *Primary tooth injuries in Norwegian children (1-8 years).* Dent Traumatol 21 (6): p. 315-9. DOI: 10.1111/j.1600-9657.2005.00362.x
 159. Smith, B. and J. Knight (1984) *A comparison of patterns of tooth wear with aetiological factors.* British Dental Journal 157 (1): p. 16-19.
 160. Soares, L.E.S., J. da Silva Magalhães, F.R. Marciano, and A.O. Lobo (2018) *Surface characteristics of a modified acidulated phosphate fluoride gel with nano-hydroxyapatite coating applied on bovine enamel subjected to an erosive environment.* Microscopy research and technique 81 (12): p. 1456-1466.
 161. Stawarczyk, B., A. Liebermann, M. Eichberger, and J.-F. Güth (2016) *Evaluation of mechanical and optical behavior of current esthetic dental restorative CAD/CAM composites.* Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials 55: p. 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2015.10.004>
 162. Strasser, T., V. Preis, M. Behr, and M. Rosentritt (2018) *Roughness, surface energy, and superficial damages of CAD/CAM materials after surface treatment.* Clin Oral Investig 22 (8): p. 2787-2797. DOI: 10.1007/s00784-018-2365-6

163. Sumino, N., K. Tsubota, T. Takamizawa, K. Shiratsuchi, M. Miyazaki, and M.A. Latta (2013) *Comparison of the wear and flexural characteristics of flowable resin composites for posterior lesions*. Acta Odontologica Scandinavica 71 (3-4): p. 820-827.
164. Suzuki, T., H. Kyoizumi, W.J. Finger, M. Kanehira, T. Endo, A. Utterodt, H. Hisamitsu, and M. Komatsu (2009) *Resistance of nanofill and nanohybrid resin composites to toothbrush abrasion with calcium carbonate slurry*. Dent Mater J 28 (6): p. 708-16.
165. Takahashi, R., J. Jin, T. Nikaido, J. Tagami, R. Hickel, and K.-H. Kunzelmann (2013) *Surface characterization of current composites after toothbrush abrasion*. Dental materials journal 32 (1): p. 75-82.
166. Teixeira, E.C., J.L. Thompson, J.R. Piascik, and J.Y. Thompson (2005) *In vitro toothbrush-dentifrice abrasion of two restorative composites*. J Esthet Restor Dent 17 (3): p. 172-80; discussion 181-2.
167. ten Cate, J.M. (2013) *Contemporary perspective on the use of fluoride products in caries prevention*. Br Dent J 214 (4): p. 161-7. DOI: 10.1038/sj.bdj.2013.162
168. Theobald, A.H., B.K. Wong, A. Quick, and W. Thomson (2006) *The impact of the popular media on cosmetic dentistry*. New Zealand Dental Journal 102 (3): p. 58.
169. Tribst, J.P.M., A. Maria de Oliveira Dal Piva, A. Werner, L.T. Sampaio Silva, L.C. Anami, M.A. Bottino, and C.J. Kleverlaan (2021) *Effect of surface treatment and glaze application on shade characterized resin-modified ceramic after toothbrushing*. J Prosthet Dent 125 (4): p. 691 e1-691 e7. DOI: 10.1016/j.prosdent.2020.12.040
170. Tsujimoto, A., W.W. Barkmeier, T. Takamizawa, M.A. Latta, and M. Miyazaki (2017) *Influence of thermal cycling on flexural properties and simulated wear of computer-aided design/computer-aided manufacturing resin composites*. Operative dentistry 42 (1): p. 101-110.
171. Twetman, S., S. Axelsson, H. Dahlgren, A.K. Holm, C. Kallestal, F. Lagerlof, P. Lingstrom, I. Mejare, G. Nordenram, A. Norlund, L.G. Petersson, and B. Soder (2003) *Caries-preventive effect of fluoride toothpaste: a systematic review*. Acta Odontol Scand 61 (6): p. 347-55. DOI: 10.1080/00016350310007590
172. Van der Weijden, F., M. Timmerman, M. Piscaer, Y. IJzerman, P. Warren, and U. Van der Velden (1998) *A comparison of the efficacy of a novel electric toothbrush and a manual toothbrush in the treatment of gingivitis*. American Journal of Dentistry 11 (Spec No): p. S23-8.
173. Van der Weijden, G., M. Timmerman, E. Reijerse, M. Mantel, and U. Van der Velden (1995) *The effectiveness of an electronic toothbrush in the removal of established plaque and treatment of gingivitis*. Journal of Clinical Periodontology 22 (2): p. 179-182.
174. van der Weijden, G.A., M.F. Timmerman, E. Reijerse, M.M. Danser, M.S. Mantel, A. Nijboer, and U. van der Velden (1994) *The long-term effect of an oscillating/rotating electric toothbrush on gingivitis. An 8-month clinical study*. J Clin Periodontol 21 (2): p. 139-45. DOI: 10.1111/j.1600-051x.1994.tb00292.x
175. van Dijken, J.W., S. Sjostrom, and K. Wing (1987) *The effect of different types of composite resin fillings on marginal gingiva*. J Clin Periodontol 14 (4): p. 185-9.

176. Vicentini, B.C., S.R. Braga, and M.A. Sobral (2007) *The measurement in vitro of dentine abrasion by toothpastes*. Int Dent J 57 (5): p. 314-8.
177. Vieira, A., E. Overweg, J. Ruben, and M. Huysmans (2006) *Toothbrush abrasion, simulated tongue friction and attrition of eroded bovine enamel in vitro*. Journal of dentistry 34 (5): p. 336-342.
178. Waheeb, N., N. Silikas, and D. Watts (2012) *Initial polishing time affects gloss retention in resin composites*. Am J Dent 25 (5): p. 303-6.
179. Wegehaupt, F.J., V.G.M. Hoegger, and T. Attin (2017) *Abrasion of eroded and sound enamel by a dentifrice containing diamond abrasive particles*. Swiss Dent J 127 (7-8): p. 634-639.
180. Werner, H.) *VITA ENAMIC—die Hybridkeramik der Zukunft?*
181. White, D.J. (2001) *Development of an improved whitening dentifrice based upon "stain-specific soft silica" technology*. J Clin Dent 12 (2): p. 25-9.
182. Whitehead, S.A., A.C. Shearer, D.C. Watts, and N.H. Wilson (1999) *Comparison of two stylus methods for measuring surface texture*. Dent Mater 15 (2): p. 79-86.
183. Wiegand, A., M. Begic, and T. Attin (2006) *In vitro evaluation of abrasion of eroded enamel by different manual, power and sonic toothbrushes*. Caries research 40 (1): p. 60-65.
184. Wiegand, A. and N. Schlueter (2014) *The role of oral hygiene: does toothbrushing harm?* Monogr Oral Sci 25: p. 215-9. DOI: 10.1159/000360379
185. Wiegand, A., M. Schwerzmann, B. Sener, A. Carolina Magalhães, M. Roos, D. Ziebolz, T. Imfeld, and T. Attin (2008) *Impact of toothpaste slurry abrasivity and toothbrush filament stiffness on abrasion of eroded enamel—an in vitro study*. Acta Odontologica Scandinavica 66 (4): p. 231-235.
186. Winterfeld, T., N. Schlueter, D. Harnacke, J. Illig, J. Margraf-Stiksrud, R. Deinzer, and C. Ganss (2015) *Toothbrushing and flossing behaviour in young adults—a video observation*. Clinical oral investigations 19 (4): p. 851-858.
187. Yoder, P. and F. Symons (2010) *Observational measurement of behavior*. Springer Publishing Company.
188. Zahnfabrik, V.) *Vita Enamic technisch-wissenschaftliche Dokumentation*, V. Zahnfabrik, Editor. Vita Zahnfabrik.
189. Zahnfabrik, V. (2016) *Vita Enamic Technisch-Wissenschaftliche Dokumentation*, V. Zahnfabrik, Editor.
190. Zarone, F., G. Ruggiero, R. Leone, L. Breschi, S. Leuci, and R. Sorrentino (2021) *Zirconia-Reinforced Lithium Silicate (ZLS) mechanical and biological properties: a literature review*. Journal of Dentistry: p. 103661.
191. Zierden, K., J. Acar, P. Rehmann, and B. Wostmann (2018) *Wear and Fracture Strength of New Ceramic Resins for Chairside Milling*. Int J Prosthodont 31 (1): p. 74-76. DOI: 10.11607/ijp.5492
192. Zimmermann, M., A. Mehl, and S. Reich (2013) *New CAD/CAM materials and blocks for chairside procedures*. Int J Comput Dent 16 (2): p. 173-81.

7 Erklärung zum Eigenanteil

Die Arbeit wurde in der Eberhard-Karls-Universität Tübingen unter der anfänglichen Betreuung von Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Ing. Jürgen Geis-Gerstorfer und im Weiteren durch die Betreuung von Herrn Prof. Dr. Fabian Hüttig durchgeführt.

Die Konzeption der Studie erfolgte durch mich, nach der Überlassung des Dissertationsthemas auf Anregung von Herrn Prof. Dr. Fabian Hüttig durch Prof. Dr.rer.nat. Dipl.-Ing. Jürgen Geis-Gerstorfer. Die Herstellung der Probekörper sowie die Planung des gesamten Versuchsaufbaus mit Vorversuchen erfolgte durch mich.

Die Bedienung der verwendeten Prüfstände (außer REM) und damit aller durchgeführten Untersuchungen erfolgte, nach Einweisung durch Herrn Sebastian Spintzyk, M.Sc. sowie Frau Christine Schille, MTA, für die Perthometererfassung, durch mich selbst – und damit ebenso die gesamte Erhebung und Zusammenstellung der Daten. Die statistische Auswertung erfolgte nach Empfehlungen von Herrn Prof. Dr. Fabian Hüttig zum Tabellendesign und der Auswertungsstrategie, ebenfalls durch mich – inkl. der Anfertigung und Finalisierung der Abbildungen und Tabellen.

Die Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen wurden alle, teilweise in meiner Anwesenheit, durch Herrn Ernst Schweizer nach meiner Definition der Region of Interest und deren Vergrößerungen durchgeführt.

Ich versichere, das vorliegende Manuskript vollständig selbständig verfasst und nach Maßgaben des Zweitgutachters redigiert zu haben und keine weiteren, als die von mir angegebenen Quellen verwendet zu haben.

Tübingen, den 15.02.2022 sowie 15.04.2023

Verena L. Gräfenkämper (geb. Wagner)

8 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank den nachstehenden Personen entgegenbringen, ohne deren Unterstützung und Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift nicht möglich gewesen wäre:

Mein besonderer Dank gilt zunächst Herrn Prof. Dr. Fabian Hüttig, meinem Doktorvater, für die Bereitstellung des Dissertationsthemas, die außerordentliche Betreuung und Unterstützung dieser Arbeit. Trotz seiner zeitlichen Belastung konnte ich mich stets mit meinen Fragen an ihn wenden. Die Zusammenarbeit auf intellektueller und persönlicher Ebene wird mir als konstruktiver und bereichernder Austausch in Erinnerung bleiben. Unsere Dialoge und Diskussionen waren stets und werden immer eine Ermutigung und Motivation für mich sein.

Auch möchte ich mich bei den ehemaligen und derzeitigen Mitarbeitern der Sektion für Medizinische Werkstoffkunde & Technologie an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen bedanken, die mir bei Bedarf immer zur Hilfe standen.

Hierbei möchte ich Herrn Prof. Dr. Jürgen Geis-Gerstorfer, Herrn Sebastian Spintzyk, M.Sc., Frau Christine Schille, Herrn Ernst Schweizer, Herrn Günther Wedenig, Frau Ariadne Röhler, M.Sc., und Herrn Prof. Dr. Frank Rupp erwähnen. Ich bin sehr dankbar, dass ich die Dissertation in den Räumlichkeiten der Abteilung mit einem so kompetenten und freundlichen Team im Hintergrund durchführen durfte. Weiter bedanke ich mich bei Frau Prof. Dr. Renate Deinzer für die Bereitstellung der Rohdaten von Harnacke et al., um eine Simulationszeit für die Oberkiefer-Frontzähne erhalten zu können. Nicht zuletzt gilt mein Dank auch Herrn Dr. L. Hüning für die abschließende und sorgfältige Durchsicht der Arbeit.

Tief verbunden und dankbar bin ich meinen Eltern für ihre liebevolle Unterstützung. Ohne diese wäre mein Studium und mein bisheriger Lebensweg nicht möglich gewesen. Vielen Dank für Eure unentwegte Geduld, Euer Verständnis und Euren Humor, die mich durch die Zeit getragen haben.

Außerdem möchte ich mich bei meiner Schwester bedanken, die schon mein ganzes Leben lang mein größtes Vorbild und meine engste Vertraute ist.