

**Haftwertermittlung an bearbeiteten
Restaurationsmaterialoberflächen in Abhängigkeit
von Vorbehandlung und Konditionierung**

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Hohen Medizinischen Fakultät
der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Elke Clarissa Jänig, geb. Dahlhaus

aus Köln

2019

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. Matthias Frentzen
2. Gutachter: PD Dr. Dr. Istabrak Hasan

Tag der Mündlichen Prüfung: 06.05.2019

Aus der Klinik und Poliklinik für Parodontologie, Zahnerhaltung und Präventive
Zahnheilkunde
Direktor: Prof. Dr. Dr. Søren Jepsen

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungsverzeichnis	6
1.	Einleitung	7
1.1	Befestigung von Kompositen am Zahn	7
1.2	Zahnfarbene Restaurationsmaterialien für indirekte Restaurationen im CAD/CAM-Verfahren	9
1.2.1	Das CAD/CAM-Verfahren	9
1.2.2	Keramiken als Restaurationsmaterial	9
1.2.2.1	Silikatkeramiken	11
1.2.2.2	Nichtsilikatkeramiken	11
1.2.2.3	Hybridkeramiken	12
1.2.3	Komposite als Restaurationsmaterial	12
1.3	Vorbehandlungsmethoden	13
1.3.1	Reinigung mit Alkohol	13
1.3.2	Mechanische Vorbehandlung	13
1.3.3	Chemische Vorbehandlung	14
1.3.3.1	Flusssäure	14
1.3.3.2	Phosphorsäure	14
1.4	Der Verbund zur vorbehandelten Oberfläche	15
1.4.1	Adhäsiv	15
1.4.2	Silane	16
1.5	Vergleichende Bewertung der verschiedenen Befestigungstechniken für indirekte Restaurationen – eine Literaturübersicht	16
1.6	Ziel der vorliegenden Arbeit	19
2.	Material und Methodik	20
2.1	Verwendete Materialien	20
2.1.1	Cerasmart® als indirektes Restaurationsmaterial	20
2.1.2	Technovit 4004®	23
2.1.3	Adhäsivsysteme	24
2.1.3.1	Peak universal®	24

2.1.3.2	Ceramic Primer II®	24
2.1.4	Komposite	25
2.1.4.1	PermaFlo DC® als Befestigungskomposit	25
2.1.4.2	Enamel plus EF Hri function® als Füllungskomposit	25
2.2	Versuchsaufbau und -durchführung	26
2.2.1	Herstellung der Probenkörper	26
2.2.2	Vorbehandlung der Probenkörper	30
2.2.2.1	Sandstrahlen	30
2.2.2.2	Applikation der Adhäsivsysteme	30
2.2.3	Befestigung der Kunststoffknöpfe auf den Probenkörpern	30
2.2.3.1	Aufkleben der genormten Kunststoffknöpfe nach ISO Norm 29022:2013	31
2.2.3.2	Aushärten mit einer Lichtquelle	33
2.2.4	Thermocycling	34
2.2.5	Abscheren des Kompositknöpfchens mit der Scherspannungsmaschine nach ISO Norm 29022:2013	34
2.3	Codierung des Versuchs	36
2.4	Lichtmikroskopische Betrachtung und Profilometrie	38
2.4.1	Rauheit und Welligkeit	39
2.5	Statistische Auswertung	40
3.	Ergebnisse	42
3.1	Scherspannungswerte	42
3.2	Frakturzonen	50
3.2.1	Optische Auswertung der Frakturzonen	50
3.2.2	Häufigkeit der Frakturzonen	55
3.3	Rauheit	63
3.3.1	Welligkeit	70
3.4	Vergleichende Beurteilung der Ergebnisse	79
4.	Diskussion	81
4.1	Diskussion der Methodik	81
4.2	Diskussion der Vorbehandlung und Materialien	82

4.2.1	Sandstrahlen und Anätzen der Oberfläche	82
4.2.2	Adhäsivsystem	83
4.2.3	Komposite	84
4.2.4	Polymerisation	84
4.3	Diskussion möglicher Fehlerquellen	85
4.3.1	Herstellung der Probenkörper	85
4.3.2	Fehlerhafte Proben	86
4.3.3	Sägespuren	86
4.3.4	Wärmeentwicklung	87
5.	Zusammenfassung	88
6.	Anhang	89
7.	Abbildungsverzeichnis	90
8.	Tabellenverzeichnis	93
9.	Literaturverzeichnis	94
10.	Danksagung	101

Abkürzungsverzeichnis

BIS-GMA	Bisphenol-A-Diglycidylmethacrylat
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Modulation
CoCr	Cobalt-Chrom
MMA	Methacrylsäuremethylester
PMMA	Polymethylmetacrylat
TPO	Trimethylbenzylidiphenylphosphinoxid

1. Einleitung

Zahnhartsubstanzdefekte können mit diversen Materialien restauriert werden. In der Zahnheilkunde wurden Mitte der 60er Jahre des 20. Jahrhunderts zahnfarbene Komposite als Füllmaterial eingeführt. Diese stellen eine Alternative zu Silikatzementen und Methylmetacrylaten im direkten Verfahren zur Restauration von Kavitäten im Frontzahnbereich dar (Bowen, 1962, 1965). Die Nachfrage nach zahnfarbenen Füllungsmaterialien sowie nach zahnfarbenen laborgefertigten Restaurationen wird immer größer (Hahn, 2003). Neben den ästhetischen Ansprüchen muss das Restaurationsmaterial zusätzlich auch den funktionellen Ansprüchen des Kauystems genügen.

Seit der Entwicklung von Befestigungskompositen für festsitzenden Zahnersatz werden indirekte Restaurationen zunehmend mit Adhäsivtechnik am Zahn befestigt. Es konnte nachgewiesen werden, dass der adhäsive Verbund im Vergleich zu herkömmlichen Zinkphosphat-, Glasionomer- und Polycarboxylatzementen wesentlich haltbarer und höher ist (Stark, 2001). Der mechanische Verbund von Kompositen mit dem Schmelz wurde bereits durch Buonocore (Buonocore, 1997) nachgewiesen und wurde seitdem vor allem durch die von Fusayama eingeführte „Total-Etch-Technik“ an Dentin und Schmelz idealisiert (Fusayama, 1982). Die „Total-Etch-Technik“ bzw. „Etch-Rinse-Technik“ gilt heute als „State of the art“ (Pashley et al., 2011).

Es lässt sich schlussfolgern, dass das adhäsive Verkleben von Kronen und Brücken zukünftig häufiger Anwendung findet, weil sich durch adhäsive Befestigungskomposite besonders haltbare Verbundsysteme erzielen lassen und die verwendeten Werkstoffgruppen, insbesondere Keramiken, ein solches Einkleben erforderlich machen (Stark, 2001).

1.1 Befestigung von Kompositen am Zahn

Unter Kompositen werden in der Zahnmedizin Werkstoffe zusammengefasst, die sich dadurch auszeichnen, dass sie zahnfarben und plastisch sind. Nach dem Einbringen in die Kavität härten diese – durch eine chemische Reaktion – unter Energiezufuhr aus (Hellwig et al., 2009).

Bowen gelang 1962 erstmals die Komposition dieses neuartigen Werkstoffs. Das Additionsprodukt von Epoxidharz und Methylmetacrylsäure bildet ein aromatisches Dimethylacrylat und wurde mit Quarzmehl als anorganischem Füllkörper versehen. Die Füllkörper waren wiederum mit einer Silanverbindung überzogen, um eine chemische Bindung sowohl zu organischen als auch zu anorganischen Füllkörpern einzugehen und dadurch die beiden Phasen miteinander zu verbinden (Bowen, 1962; Hellwig et al., 2009).

Heute enthalten dentale Füllungskomposite Bisphenol-A-Diglycidylmethacrylat – abgekürzt BIS-GMA – sowie/oder andere flüssige organische Monomere. Daneben gehören anorganische Füllkörper und Photoinhibitoren wie Photoinhibitoren, Silanverbindungen und Stabilisatoren zu den Komponenten dieser Werkstoffe (Bowen und Marjenhoff, 1992).

Die Befestigung von Kompositfüllungen am Zahn erfolgt mithilfe der sogenannten „Etch-Rinse-Technik“ (Pashley et al., 2011), welcher das nachfolgend beschriebene Anwendungsprinzip zugrunde liegt:

Bei der von Fusayama beschriebenen „Etch-Rinse-Technik“ oder auch „Total-Etch-Technik“ zur Befestigung von Kompositen am Zahn werden Schmelz und Dentin simultan geätzt (Fusayama, 1982). Durch den niedrigen pH-Wert der verwendeten 35 bis 37 %-igen Phosphorsäure werden nicht nur die beiden Zahnhartsubstanzen geätzt und demineralisiert, sondern ebenso die verbliebenen Bakterien dieser Regionen entfernt. Der anschließend verwendete Primer sorgt mithilfe von hydrophilen Monomeren für eine Befeuchtung des Dentins und eine Expansion des Kollagengeflechts, indem er dieses infiltriert (Pashley et al., 2011). Das nachfolgend aufgebraute Adhäsiv führt zu einer sogenannten Hybridschicht als Verbundfläche zwischen Zahnhartsubstanz und Komposit. Nakabayashi et al. konnten als erstes nachweisen, dass die Adhäsivtechnik auch bei zuvor geätztem Dentin zur Ausbildung einer solchen Hybridschicht führte (Nakabayashi et al., 1982). Die Hybridschicht umfasst jeweils den Bereich des konditionierten Dentins sowie den Bereich des aufgetragenen Harzes, so dass sie eine Mischung aus beidem darstellt (Nakabayashi et al., 1991).

1.2 Zahnfarbene Restaurationsmaterialien für indirekte Restaurationen im CAD/CAM-Verfahren

Das CAD/CAM-Verfahren beschreibt einen computergestützten Herstellungsprozess für indirekte Restaurationsmaterialien. Als Restaurationsmaterialien können bei diesem Verfahren Keramiken, Hybridkeramiken und Komposite verwendet werden. Darüber hinaus können aber auch andere Materialien wie Titan, Titanlegierungen und Cobalt-Chrom-Legierungen bearbeitet werden (ZMK, 2011).

1.2.1 Das CAD/CAM-Verfahren

Sowohl die Modellierung (Computer Aided Design, kurz CAD) – also die dreidimensionale Planung – als auch die Herstellung (Computer Aided Manufacturing, kurz CAM) – also die dreidimensionale Produktion – werden beim CAD/CAM-Verfahren in digitaler Form durchgeführt.

Die Präparationen werden dreidimensional digitalisiert. Die Digitalisierung kann entweder mit einer Kamera durch einen intraoralen Scan oder das Scannen des Abdrucks oder das Wachsausschmelzverfahren bei Metallarbeiten erfolgen (Lee et al., 2018). Das Design wird virtuell am Computer bearbeitet. Anschließend werden die Daten an eine Schleifmaschine für den Fertigungsprozess übermittelt, so dass eine exakte Fertigung entsprechend der Computermodelle erfolgt.

1.2.2 Keramiken als Restaurationsmaterial

Jede Keramik hat entsprechend ihrer Zusammensetzung und Mikrostruktur unterschiedliche physikalische und mechanische Eigenschaften. Eine Gemeinsamkeit besteht in einer hohen Sprödigkeit, also einer extrem geringen Nachgiebigkeit. Zudem erlauben sie eine ansprechende ästhetische Gestaltung (Taschner und Lohbauer, 2016). Sie spiegeln die Farbe und Gestalt des natürlichen Zahnes wider und weisen in Bezug auf Herstellungsverfahren, Transluzenz und Festigkeit hohe Bandbreite auf (Giordano, 1996).

Oxidkeramiken lassen sich wie folgt grob klassifizieren (Abb. 1): Keramiken silikatischer Herkunft, nicht-silikatischer Herkunft und Verbund- sowie Hybridkeramiken (Taschner und Lohbauer, 2016).

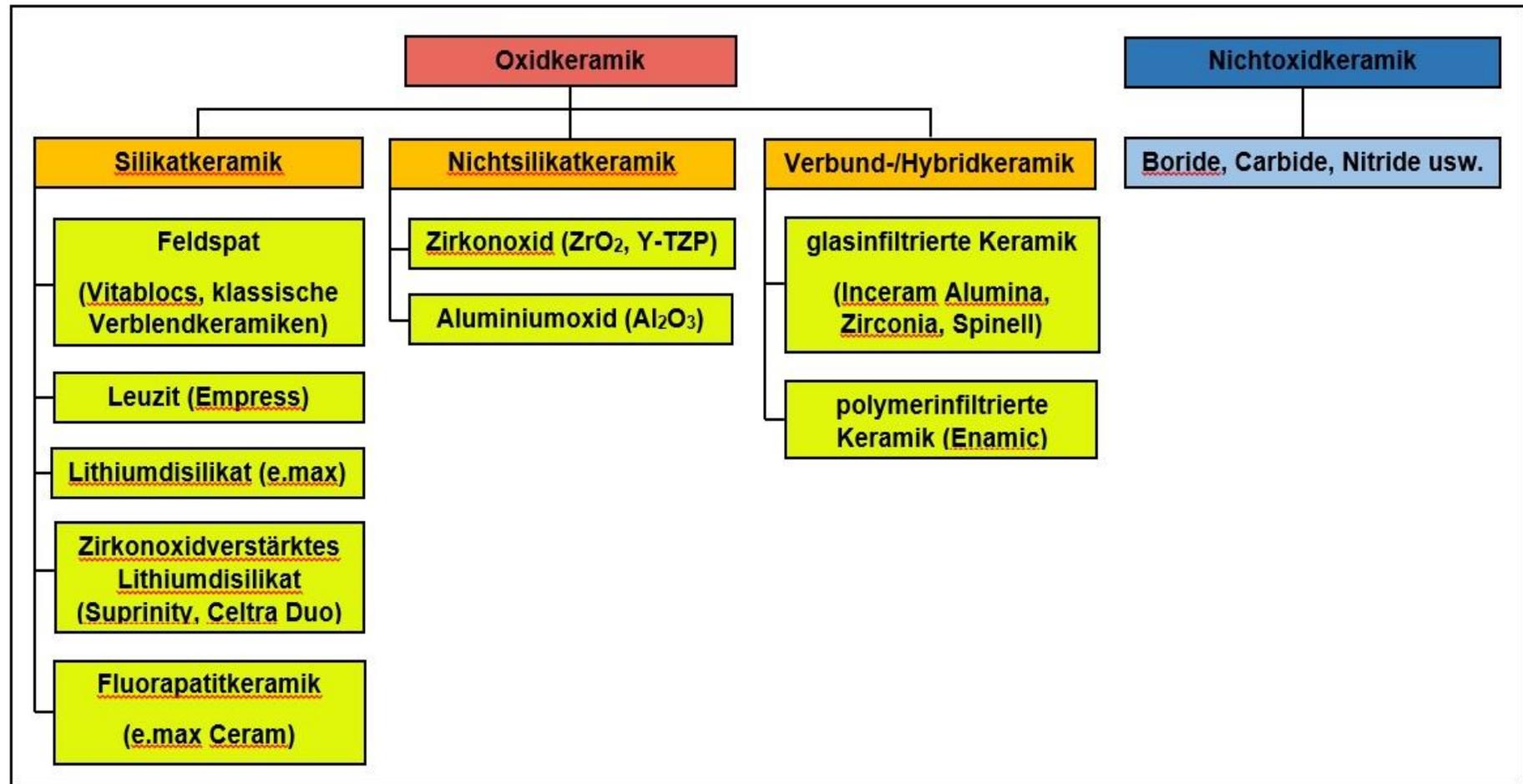


Abb. 1: Klassifizierung und Einteilung dentaler Keramiken nach ihrer chemisch-kristallografischen Zusammensetzung (Eigene Darstellung, angelehnt an: Taschner und Lohbauer, 2016)

1.2.2.1 Silikatkeramiken

Silikatkeramiken werden auch als Glaskeramiken bezeichnet, da sie neben dem kristallinen Anteil zusätzlich noch amorphe Bestandteile aufweisen (DGZMK, 2007). Werkstoffkundlich betrachtet stellen Silikatkeramiken eine Mischung verschiedener Mineralien wie zum Beispiel Feldspat, Aluminiumoxid oder Leuzit dar, die in Form von Kristalliten in eine Glasmatrix aus Siliziumoxid bestehend eingebettet sind (Schmidseder und Munz, 2008). Silikatkeramiken sind somit mehrphasig, bestehend aus einer glasreichen Matrix mit kristallinen Phasen. Sie unterliegen einem Kristallisationsprozess (Rinke, 2011). Zu den Silikatkeramiken gehören alle Verblendkeramiken, die in der Regel mit Feldspat verstärkt werden. Dabei wird gemahlenes Feldspatglas in Pulverform gesintert (Rinke, 2011).

Aus eben genannten werkstoffkundlichen Aspekten lassen sich für Silikatkeramiken folgende Eigenschaften ableiten (Schmidseder und Munz, 2008):

- geringe Festigkeit
- hohe Transluzenz und Transparenz, die einen hohen ästhetischen Wert ausmachen
- Ätzbarkeit mit Flusssäure

Die Lithiumdisilikatkeramiken zählen ebenfalls zu den Silikatkeramiken und somit auch zu den Glaskeramiken. Bei Silikatkeramiken können durch die Auswahl verschieden großer und unterschiedlich verteilter Kristallite die mechanischen und optischen Eigenschaften beeinflusst werden. So zeichnen sich die Lithiumdisilikatkeramiken besonders durch ihre langen Kristallite aus, welche in die Glasmatrix eingelagert sind. Dadurch wird die Festigkeit der Lithiumdisilikatkeramiken im Verhältnis zu den anderen Silikatkeramiken etwa verdoppelt (Schmidseder und Munz, 2008).

1.2.2.2 Nichtsilikatkeramiken

Als Nichtsilikatkeramiken werden Keramiken bezeichnet, die komplett oder zum überwiegenden Teil aus feinen Kristallen der Mineralien Aluminiumoxid und Zirkonoxid bestehen. Aufgrund ihrer Zusammensetzung aus mehreren feinen Kristallen sind sie als polykristallin zu bezeichnen. Durch den Sinterprozess kommt es zu einem

Verschmelzen, so dass Kristallite entstehen. Im Gegensatz zu Silikatkeramiken besitzen sie keine Glasmatrix. Die polykristalline Struktur der Nichtsilikatkeramiken bringt folgende Eigenschaften mit sich (Schmidseder und Munz, 2008):

- hohe Festigkeit
- Säureresistenz

1.2.2.3 Hybridkeramiken

Die sogenannten Hybridkeramiken vereinen die positiven Eigenschaften von Keramiken und Kompositen, indem sie die Stabilität und Ästhetik von Keramiken mit der Flexibilität von Kompositen verbinden (Arnetzl, 2016 Spitznagel et al., 2016). In einer Studie von Ramos et al. zeigten sich in der strukturellen Zusammensetzung von *Vita Enamic*[®] organische und anorganische Phasen (Ramos et al., 2016). Hybridkeramiken enthalten ein Keramiknetzwerk, das zum überwiegenden Teil auf einer Leuzitkeramik basiert und ihren Ursprung in einer Feldspatkeramik hat. Zusätzlich bestehen sie aus einer kleineren kristallinen Phase aus Zirkonoxid, welche verstärkend wirkt. Die Hybridkeramik wird durchzogen und infiltriert von einem Netzwerk von Polymeren auf Basis eines oberflächenmodifizierten PMMAs, frei von MMA (Della Bonna et al., 2014). Hierdurch entsteht eine ineinandergreifende duale Netzstruktur, die eine neue Materialklasse darstellt (Arnetzl, 2016). In einer Studie von Azarbal et al. (2018) konnte nachgewiesen werden, dass die indirekten Restaurationen aus *Vita Enamic*[®] – als Hybridkeramik – im Mund eine bessere Randpassung erzielten als die Lithiumdisilikat-gefertigten Restaurationen. Sie wiesen in einer Studie von Ramos et al. (2016) das niedrigste Elastizitätsmodul und neben Feldspatkeramiken ebenfalls die niedrigste Anfälligkeit für Risswachstum auf.

1.2.3 Komposite als Restaurationsmaterial

Komposite setzen sich aus drei getrennten Phasen zusammen: den polymerisierbaren Harzen, den Füllkörpern sowie den Verbundstellen von Füllkörpern und Harzen.

Die Harzphase besteht aus polymerisierbaren Monomeren, welche unter Lichtzufuhr von einer flüssigen Phase in ein hochvernetztes Polymer übergehen. Die Lichtquelle wirkt als Katalysator, so dass sich aktive Zentren in Form von Radikalen ausbilden, welche

die Polymerisation initiieren. Die Füllkörper übernehmen diverse Rollen in der Komposition des Komposits: Sie verstärken das Elastizitätsmodul und die Radioopazität, verändern das thermische Expansionsverhalten und reduzieren die Polymerisations-schrumpfung. Die Verbundstellen zwischen Füllkörpern und Harzen wirken als Brückenelemente, indem sie die polymerisierbaren Anteile mit den Füllpartikeln verbinden (Cramer et al., 2011).

1.3 Vorbehandlungsmethoden

Dem aktuellen Stand der Wissenschaft zufolge sind verschiedene Konditionierungen von Restaurationsmaterialien denkbar und sinnvoll. Als Konditionierung einer Substratoberfläche beschreibt die Bundeszahnärztekammer das Anätzen der Zahnhartsubstanz oder des Werkstücks sowie das Sandstrahlen einer Restauration. Weitere Schritte wie das Silanisieren sowie Primern und Bonden werden nicht zum Schritt der Konditionierung gezählt (BZÄK, 2014). Das Ziel dabei ist es, durch mechanische und/oder chemische Vorbehandlung die Retentionsfläche zu vergrößern (Kato et al., 2000).

1.3.1 Reinigung mit Alkohol

Alkohol dient der Reinigung und Entfettung der Materialoberfläche (Gernet et al., 2007). Beispielsweise findet bei der Anprobe des Werkstücks intraoral eine Benetzung und Kontamination der Materialoberfläche mit Speichelproteinen statt. Durch die Reinigung mit Alkohol soll eine Dekontamination sowie ein verbesserter Haftwert des Bondings an der Oberfläche begünstigt werden. Bei Zirkonoxidkeramiken konnten Quaas et al. (2007) nachweisen, dass die Reinigung hier zu keiner verbesserten Haftung des Bondings führte.

1.3.2 Mechanische Vorbehandlung

Das Sandstrahlen (Körnung 50 μm , für 10-15 Sekunden unter einem Abstand von 10 mm bei 380 kPa) – also das Aufrauen der Oberfläche zur Vergrößerung der selbigen – erfolgt mit Aluminiumoxid-Strahlsand. Das Aufrauen der Oberfläche dient der mikroretentiven Unterstützung sowie der Vergrößerung der zu verbindenden Oberflächen (Amaral et al., 2014). Dadurch wird die Benetzung der Materialoberfläche

des Werkstoffs mit dem danach zu verwendenden Primer, Bonding oder Befestigungsmaterial erleichtert (Rosentritt et al., 2016). Ferner säubert das Sandstrahlen die Innenfläche der Restauration von verbliebenen Fremdpartikeln (Hutsky, 2011). Insbesondere für Zirkonoxidkeramiken wird ein verbesserter Verbund der Materialoberfläche mit dem Bonding durch Sandstrahlen beschrieben (Attia und Kern, 2011).

1.3.3 Chemische Vorbehandlung

Die Ätzung der Werkstoffe der zahnfarbenen Einlagefüllungen dient der Ausbildung eines retentiven Ätzmusters sowie einer erhöhten Benetzbarkeit der Unterseite der Restauration (Hellwig et al., 2009).

Nachfolgend sollen Flusssäure und Phosphorsäure in Kürze erläutert werden, weil diese beiden Säuren eine mikroretentive Oberfläche auf CAD/CAM Blöcken (*Cerasmart*[®] der Firma GC; *Vita Enamic*[®] der Firma Vita) laut Lise et al. (2017) erzeugen.

1.3.3.1 Flusssäure

Das Anätzen von Keramiken mit 8 %-iger Flusssäure wird empfohlen (Akova et al., 2007; Menees et al., 2014). Dies gilt für Silikatkeramiken, da hier eine mikroretentive Oberfläche geschaffen und die Benetzung mit dem hochviskösen Befestigungszement verbessert wird. Nicht-Silikatkeramiken enthalten hingegen keine Glasphase in ihrer Matrix, so dass sie nicht ätzbar sind (Schmidseder und Munz, 2008). Die Flusssäure ätzt die Glasphase oberflächlich an, vergrößert damit die Materialoberfläche und legt zugleich Lithiumdisilikatkristalle frei. Anschließend erfolgt eine Weiterbehandlung mit Silan (Hutsky, 2011).

1.3.3.2 Phosphorsäure

Die vorbereitenden Maßnahmen der keramischen Restauration konnten durch das Anätzen der Keramikoberfläche mithilfe von 40 %-iger Phosphorsäure in den Versuchen von Kamada et al. (1998) die besten Haftwerte erzielen. Die Oberfläche wurde anschließend mit Silan weiterbehandelt. Allerdings führten Shiu et al. (2007) einen ähnlichen Versuch mit Feldspatkeramik durch, bei dem eine Ätzung der Keramikoberfläche mit Phosphorsäure als Vorbehandlung die niedrigsten Haftwerte im

Schertest bewirkte. Shiu et al. (2007) führen die höheren Haftwerte im Versuch von Kamada et al. (1998) auf die höhere Oberflächenrauigkeit aufgrund eines verwendeten Schleifpapiers mit einer Körnung von 600 zurück. Hutsky (2011) erläutert, dass ein Anätzen mit Phosphorsäure auf der Keramikoberfläche kein Ätzmuster bewirkt, sondern lediglich der Reinigung von organischen Resten auf der Oberfläche dient. Demzufolge wird eine entsprechende Vorbehandlung von Glaskeramikoberflächen mit Phosphorsäure zur Dekontamination vor einer Behandlung mit Flusssäure empfohlen (Bock und Özcan, 2015).

1.4 Der Verbund zur vorbehandelten Oberfläche

Die Wahl der Befestigung einer Komposit- oder Keramikrestauration mit einem Komposit oder einem konventionellen Zement ist stark an die Werkstoffeigenschaften der Restauration gebunden. Das entsprechend zu wählende Befestigungsprotokoll richtet sich somit in erster Linie an dem Werkstoff der verwendeten laborgefertigten Restauration aus. Der adhäsive Verbund zur vorbehandelten Oberfläche kann je nach Oberfläche durch ein Adhäsivsystem oder das Auftragen eines Silans erzielt werden.

1.4.1 Adhäsiv

Die Adhäsivtechnik umfasst laut Bundeszahnärztekammer einen Werkstoff oder ein Werkstück, welches an einem Präparat – beispielsweise dem Zahn – befestigt werden soll und sich als Verbindungselement eines Adhäsivs bedient. Dabei sind verschiedene Verbindungen denkbar, die sich in Aufbau und Haltbarkeit unterscheiden und sogar Werkstücke mit selbst-adhäsivem Charakter umfassen können, bei denen die Anwendung eines Adhäsivsystems verzichtbar ist (BZÄK, 2014). Zur Adhäsivtechnik zählt das sogenannte Priming, welches der chemischen Vorbehandlung des Dentins dient, so dass ein Verbindungselement zwischen dem hydrophilen Dentin und dem hydrophoben Substrat geschaffen wird. Dieser Schritt kann singulär durchgeführt werden oder in ein Adhäsivsystem eingebunden sein. Ferner zählt das Bonding zur Adhäsivtechnik, welches das Auftragen eines Adhäsivsystems umfasst. Auch hierbei ist denkbar, dass das Bonding als separater Schritt auf die Oberfläche appliziert wird oder bei neueren Systemen in ein Primer-Bonding-Gemisch eingebunden ist (BZÄK, 2014).

1.4.2 Silane

Silane stellen hervorragende Haftvermittler dar. Sie besitzen zwei funktionelle Gruppen, so dass die erste reaktive funktionelle Gruppe mit anorganischen Matrizen wie Keramiken und die zweite reaktive funktionelle Gruppe mit organischen Matrizen wie Harzen reagieren kann. Silane dienen somit als „coupling agent“ zwischen Keramiken und Harzen (Lung und Matinlinna, 2012).

1.5 Vergleichende Bewertung der verschiedenen Befestigungstechniken für indirekte Restaurationen – eine Literaturübersicht

Zum Befestigen des festsitzenden Zahnersatzes am Zahn können diverse Materialien in Betracht gezogen werden: Der Behandler kann zwischen konventionellen Materialien oder einer selbststützenden oder adhäsiven Komponente wählen (Rosentritt et al., 2016). Bei der adhäsiven Befestigung muss die Schmierschicht am Zahn entfernt werden (Rosentritt et al., 2016). Unter dem sogenannten „smear layer“ wird eine kristalline Schicht verstanden, die an der Zahnoberfläche nach einer instrumentellen Bearbeitung des Zahnes auftritt und die nicht einfach mit Wasser weggespült werden kann, sondern durch ein Säureätzverfahren entfernt werden muss (Mosby's Dental Dictionary, 2008).

Welche Art der Befestigung gewählt werden sollte bzw. angewandt wird, ist stark von der Keramik abhängig. Die folgende Abbildung (Abb. 2) zeigt die Möglichkeit der Befestigung in Abhängigkeit zu unterschiedlichen Keramikmatrizen.

Wenn eine Keramik eine Biegefestigkeit von mehr als 350 MPa aufweist, kann der Behandler zwischen adhäsiver und konventioneller Befestigung entscheiden. Unter konventionell wird die Verwendung von Glasionomer- oder Zinkphosphat-Zementen verstanden. Zu den Keramiken, welche die oben genannte Biegefestigkeit aufweisen, zählen Lithiumdisilikatkeramik, glasinfiltrierte Oxidkeramik sowie pressgesinterte Oxidkeramik und Zirkonoxidkeramik. Besitzen Keramiken wie zum Beispiel Silikatkeramik eine geringere Festigkeit, muss die Befestigung ausschließlich adhäsiv erfolgen (Kunzelmann, 2014). Die hochfesten Vollkeramikrestaurationen besitzen hingegen eine so hohe Eigenstabilität, dass ein volladhäsiver Kraftschluss zum Zahn nicht zwingend erforderlich ist. Grundsätzlich gilt jedoch für diese Keramiken, dass eine

adhäsive Befestigung insbesondere dann angestrebt werden sollte, je höher der verbleibende Schmelzanteil am präparierten Zahn ist (Kunzelmann et al., 2006).

Grundsätzlich gilt für die Befestigung von vollkeramischen Restaurationen, dass die Art der Befestigung erheblich zur Gesamtstabilität des Haftverbundes sowie sowohl physikalisch als auch klinisch zur Haltbarkeit der Restauration beiträgt (Kern, 2008).

Navigation zur Befestigung von Vollkeramiken											
Keramik	Silikat		Lithiumdisilikat			Oxidkeramik glasinfiltriert			Oxidkeramik polykristallin		
Markennamen (Auswahl)	Vitablocs Empress CEREC Blocs		e.max Press / CAD			In-Ceram, Spinell, Alumina, Zirconia			In-Ceram YZ, Procera, e.maxZirCAD, Lava, In-Ceram AL, Sirona inCoris AL, Sirona inCoris ZI		
Indikation	Inlay, Onlay, Veneers, Kronen		Kronen, Inlay, Veneers, kleine Brücken			Kronen, 3-gliedrige Brücken			Kronen, Brücken		
Befestigungs- material	Adhäsive Composite licht/dual- härtend	Selbstadhäsive Composite licht/dualhärtend (nicht bei Veneer)	Glasio- nomer	Adhäsive Composite	Selbst- adhäsive Composite	Glasio- nomer	Adhäsive Composite, selbst- härtend	Selbst- adhäsive Composite	Glasio- nomer	Adhäsive Composite, selbst- härtend	Selbst- adhäsive Composite
Markennamen (Auswahl)	Variolink 2 Bonder	Rely X Unicem	Ketac- Cem	Multilink Automix Panavia 2.0	Rely X Unicem	Ketac- Cem	Multilink Automix Panavia F 2.0	Rely X Unicem Panavia F 2.0	Ketac- Cem	Multilink Automix Panavia F 2.0	Rely X Unicem Panavia F 2.0
Keramikvor- behandlung	Flusssäure 60s, Silan, Bond	Flusssäure 60s, Silan	Reinigen	Flusssäure 20s, Silan, Bond	Flusssäure 60s, Silan	Ab- strahlen	Abstrahlen	Abstrahlen	Ab- strahlen	Ab- strahlen Zirkonprimer	Ab- strahlen Zirkonprimer
Zahnvor- behandlung	Schmelz- ätzung, Dentin- adhäsiv (Licht- härtung)	Reinigen Selbstadhäsiv, bei unbesch- liffenem Schmelz wird selektive Schmelzätzung empfohlen	Poly- acryl- säure	Dentin- adhäsiv	Reinigen, Selbst- adhäsiv, bei unbesch- liffenem Schmelz wird selekti- ve Schmelz- ätzung empfohlen	Poly- acryl- säure	Dentin- adhäsiv	Reinigen, Selbst- adhäsiv, bei unbesch- liffenem Schmelz wird selekti- ve Schmelz- ätzung empfohlen	Poly- acryl- säure	Dentin- adhäsiv Bond Trocken- legung!	Reinigen, Selbst- adhäsiv, bei unbesch- liffenem Schmelz wird selekti- ve Schmelz- ätzung empfohlen
Hinweise	Kofferdam Trocken- legen		Trocken- legung Scotchbond Universal enthält Rest- aurations- primer und Silan			H ₃ PO ₄ Reinigung Trocken- legung siehe Gebrauchs- anweisung			Bei adhäsiver Befestigung von ZrO ₂ mit Zirkonprimer darf zur Reinigung keine Phosphorsäure benutzt werden		

Abb. 2: Darstellung der Befestigung verschiedener Keramiken (Eigene Darstellung, angelehnt an: Kunzelmann et al., 2006)

1.6 Ziel der vorliegenden Arbeit

Gegenwärtig werden zahnfarbene Restaurationen von Patienten verstärkt nachgefragt. Sie wünschen sich ästhetisch hochwertige Versorgung, die keine Ränder aus Metall oder ein Durchschimmern von Metallunterbauten sichtbar werden lassen. Je nach Größe der Kavität und Zerstörungsgrad des Zahnes reichen Kompositfüllungen zur Versorgung des Defektes nicht mehr aus. Die Folge dessen ist, dass vermehrt indirekte Restaurationen aus Keramiken, Hybridmaterialien oder Kompositen hergestellt werden, vorzugsweise im CAD/CAM-Verfahren. Um den klinischen Erfolg gewährleisten zu können, muss die Restauration bestmöglich befestigt werden. Ein Langzeiterfolg ist nur dann zu gewährleisten, wenn Zahn und Restauration eine stabile Lage und einen idealen Verbund miteinander aufweisen. Dabei sind die Arbeitsabläufe zum optimalen Verbund von Komposit und Zahnhartsubstanz wissenschaftlich bereits sowohl an Schmelz als auch an Dentin sehr gut erforscht (Buonocore, 1997).

Das Ziel der vorliegenden Studie besteht darin, den optimalen Verbund eines Befestigungskomposits (*PermaFlo DC*[®]) und eines Füllungskomposits (*Enamel plus EF Hri function*[®]) unter Verwendung verschiedener Adhäsivsysteme (*Peak universal*[®]; *Ceramic Primer II*[®]) mit einem neuartigen indirekten Restaurationsmaterial *Cerasmart*[®] – einer Verbund- und Hybridkeramik – aufzuzeigen. Für das neuartige Restaurationsmaterial *Cerasmart*[®] liegen noch keine validierten Daten zur idealen Befestigung am Zahn vor, weshalb es im Zentrum des Versuchssettings steht. Mittels Abscherversuchen in einer Universalprüfmaschine mit ausgesparter Klinge nach ISO Norm 29022:2013 soll anhand der gemessenen Höchstkraft in Newton, welche in Verbundfestigkeit (Spannung) – gemessen in MPa – umgerechnet wird, eine Aussage über den Haftwert von Komposit und Restauration getroffen werden. Daraus kann abgeleitet werden, wie der bestmögliche Verbund zum Restaurationsmaterial zu erreichen ist. Um den Prozess des Haftversagens detaillierter zu beschreiben, sollen unter dem Lichtmikroskop und mithilfe der Profilometrie die Bruchstelle und die Oberflächenstruktur analysiert werden. Neben der optischen Auswertung wird ebenfalls eine statistische Auswertung der Ergebnisse durchgeführt. Dieses Vorgehen unterstützt die zuvor gewonnenen Erkenntnisse zu der möglichen Schwachstelle im Verbund von Befestigungsmaterial und Restauration.

2. Material und Methodik

Die vorliegende Arbeit bedient sich in Durchführung und Datenerfassung der in diesem Kapitel beschriebenen Arbeitsweise: Zunächst werden die bei der Untersuchung verwendeten Materialien vorgestellt und anschließend wird die methodische Vorgehensweise erläutert.

2.1 Verwendete Materialien

Die dem Versuchsaufbau der vorliegenden Arbeit zugrundeliegenden Materialien – *Cerasmart*[®], *Technovit*[®], *Ceramic Primer II*[®], *Peak universal*[®], *PermaFlo DC*[®], *Enamel plus EF Hri function*[®] – werden im Folgenden vorgestellt.

2.1.1 Cerasmart[®] als indirektes Restaurationsmaterial

Cerasmart[®] (Firma GC, Tokyo, Japan) gehört zu den im theoretischen Abschnitt beschriebenen Verbund- und Hybridkeramiken und stellt das für das vorliegende Versuchsetting ausgewählte Restaurationsmaterial dar, welches unter Verwendung verschiedener Adhäsivsysteme und Komposite in seinen adhäsiven Verbundeigenschaften untersucht werden soll.

Bei *Cerasmart*[®] handelt es sich um einen Werkstoff, der für die CAD/CAM-Technik geeignet ist. *Cerasmart*[®] zeichnet sich in seinen Werkstoffeigenschaften durch eine Polymermatrix aus, die durch Verwendung der sogenannten Glasfüllertechnologie feinste Keramikfüllkörper enthält und in sich die Eigenschaften von Keramik und Kompositen vereint. Aus diesem Grund zählt es zu den Verbund- und Hybridkeramiken. Folgende weitere Eigenschaften und Vorzüge zeichnen *Cerasmart*[®] gemäß der werkstoffkundlichen Ausführungen der Firma GC (2016b):

- natürliche Opaleszenz und Fluoreszenz
- hohe Radioopazität
- physikalische Eigenschaften des Zahnschmelzes
- einfache Polierbarkeit

- anhaltender Glanz, auch nach längerer Tragedauer
- hohe Fräsgenauigkeit und kurze Schleifzeiten in CAD/CAM-Einheiten
- höchste Flexibilität, Härte und Bruchenergie im Vergleich mit Materialien wie *Lava Ultimate*[®] und *Vita Enamic*[®]
- größte Härte nach dem Bonding im Mund
- kein Chipping durch präzise Randadaptation
- kein Sintern notwendig
- hohe Temperaturbeständigkeit

Das Material besitzt im Seitenzahnbereich eine Indikation für Inlays, Onlays, Kronen, Veneers sowie Implantatkonstruktionen. Es zeichnet sich laut Herstellerangaben durch eine ultrafeine Füllertechnologie aus, bei der der Polymermatrix extrem feine und homogen verteilte Füllkörper zugeführt werden (Abb. 3). Aufgrund der extrem feinen (300 nm) Füllkörper bleibt der Glanz des Materials auch unter dem Kaudruck des stomatognathen Systems langfristig erhalten (Firma GC, 2016b).

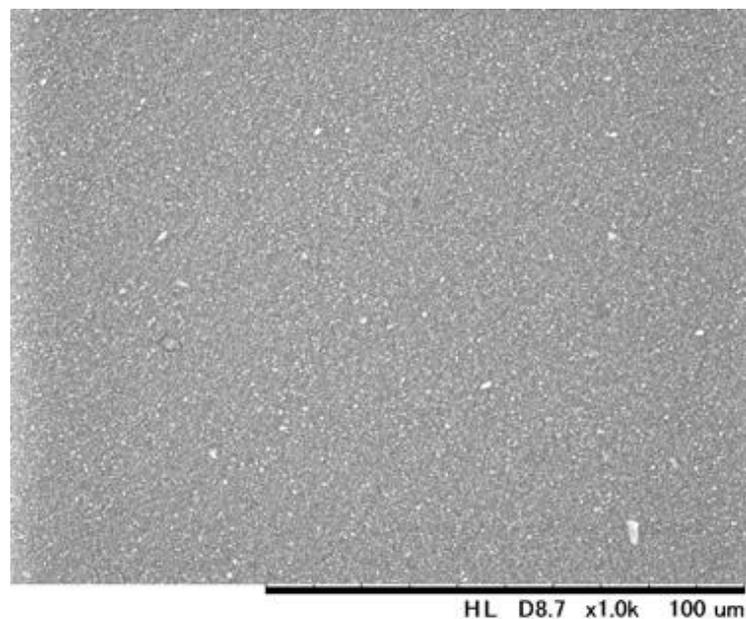


Abb. 3: Aufnahme im Rasterelektronenmikroskop zur Darstellung der ultrafeinen Füllertechnologie von *Cerasmart*[®] (Firma GC, 2016b)

Nachfolgend sollen die beiden oben bereits erwähnten Eigenschaften Bruchenergie und Temperaturbeständigkeit noch einmal näher betrachtet werden (Firma GC, 2016b):

Cerasmart[®] weist unter hoher Belastung hinsichtlich der Vergleichsprodukte die höchste Bruchenergie auf (Abb. 4), was aus der hohen Flexibilität des Produkts resultiert. Dieses Materialverhalten ist auf einen speziell entwickelten Produktionsprozess der Firma GC (2016b) zurückzuführen, der die Eigenspannung und infolgedessen das Bruchrisiko minimiert.

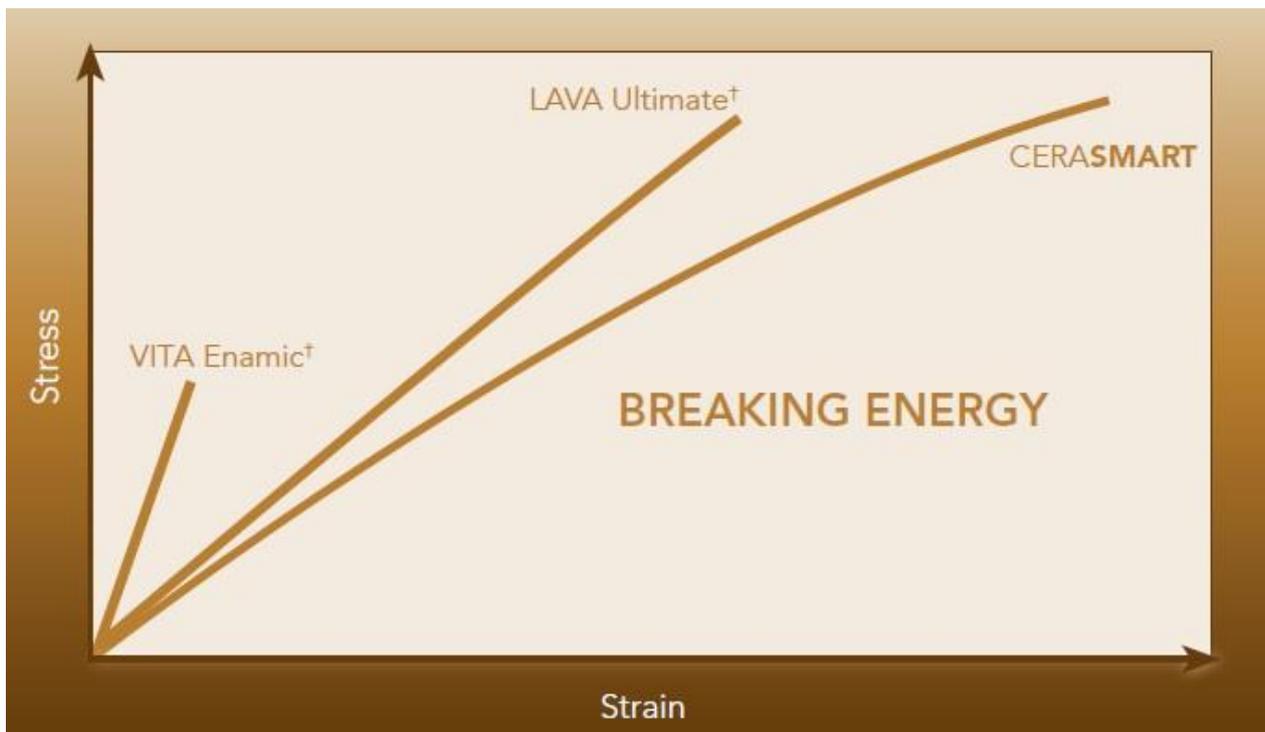


Abb. 4: Darstellung der Bruchenergie von *Cerasmart*[®] im Vergleich zu anderen CAD/CAM-Materialien (Firma GC, 2016b)

Cerasmart[®] kann den Temperaturen zwischen 5 und 55 Grad Celsius, bezogen auf die Biegefestigkeit, am längsten standhalten (Abb. 5). Nach 10.000 Thermocyclingzyklen im Bereich zwischen 5 und 55 Grad Celsius weist *Cerasmart*[®] sowohl vor als auch nach dem Thermocycling mit 202 MPa bzw. 163 MPa die größte Biegefestigkeit der drei untersuchten Materialien auf (Firma GC, 2016b). In einer Studie von Tekçe et al. (2018) konnte nachgewiesen werden, dass sich die Oberflächenbeschaffenheit von *Cerasmart*[®] durch Thermocycling nicht wesentlich verändert.

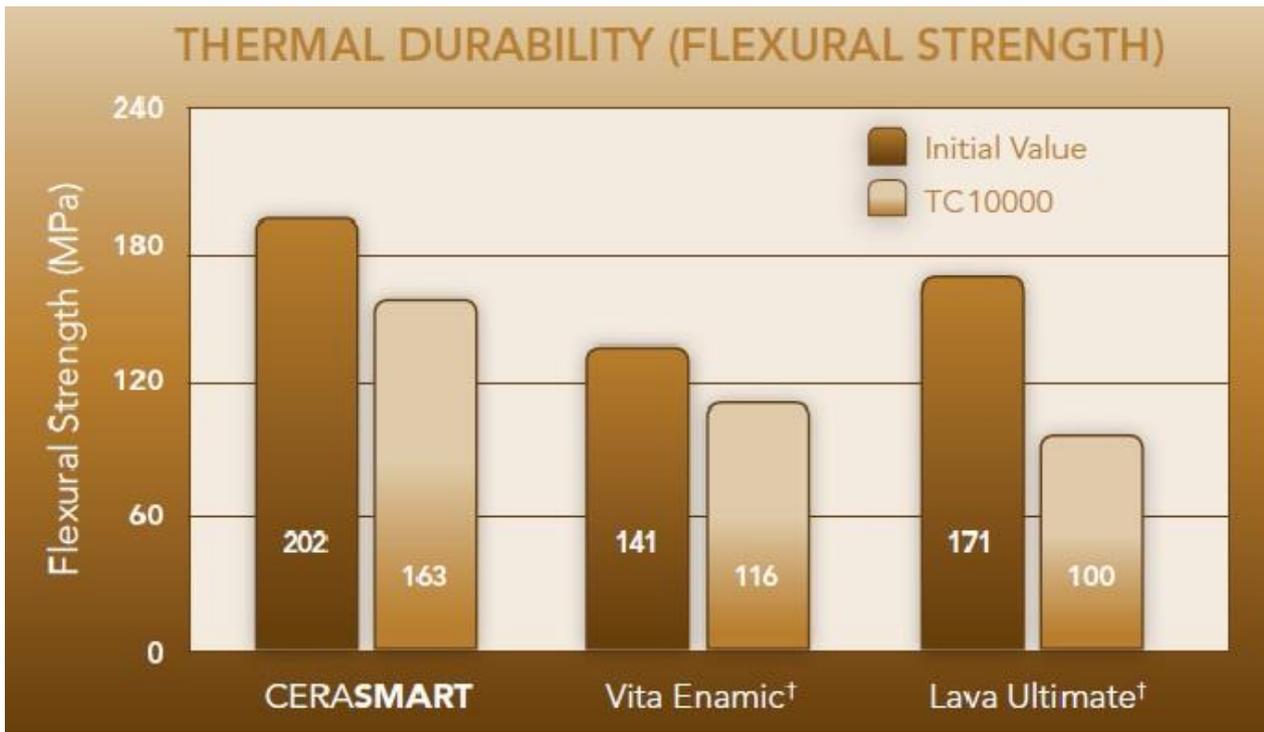


Abb. 5: Darstellung der thermischen Beständigkeit von *Cerasmart*[®] im Vergleich mit anderen CAD/CAM-Materialien (Firma GC, 2016b)

2.1.2 Technovit 4004[®]

Der verwendete, transparente Kunststoff, in den die geschnittenen *Cerasmart*[®]-Plättchen eingebettet werden, heißt *Technovit 4004*[®] (Kulzer GmbH, Wehrheim, Deutschland). Es handelt sich hierbei um ein Zweikomponenten-Pulver-Flüssigkeits-System auf Methylmetacrylat-Basis. *Technovit 4004*[®] wurde speziell zum Einbetten von Proben entwickelt, weshalb es an die Anforderungen im Laboratorium angepasst ist. Es zeichnet sich als Kalteinbettmittel durch seinen schnellen Abbindeprozess und seine Resistenz gegen alle gebräuchlichen Ätzmittel aus. Aufgrund seiner Transparenz ist eine Sichtkontrolle in gewissem Maße möglich, die allerdings bei der vorliegenden Untersuchung keine Relevanz besitzt. Die beim Abbindeprozess bei niedrigem Siedepunkt auftretende Blasenbildung ist ebenfalls zu vernachlässigen, da ein blasenfreies Einbetten nicht zwingend erforderlich ist. (Kulzer-Technik, 2017).

2.1.3 Adhäsivsysteme

Die verwendeten Adhäsivsysteme sind Einkomponentensysteme. Während *Peak universal*[®] zur V. Generation der Adhäsivsysteme gehört und der Konditionierung von Schmelz und Dentin dient, stellt *Ceramic Primer II*[®] keinen Primer zur Behandlung von Zahnhartsubstanz dar, sondern dient speziell der Vorbehandlung des gewählten Werkstücks. Im Folgenden werden die beiden Systeme näher beschrieben.

2.1.3.1 Peak universal[®]

Peak universal[®] (Ultradent Products, South Jordan, USA) ist ein lichthärtendes Einkomponentensystem, welches mit einem Nanofülleranteil von 7,5 % für eine optimale Viskosität sorgt. Der beigefügte Äthylalkohol ermöglicht eine sichere Penetration der Oberfläche und der Chlorhexidin-Gehalt von 0,2 % unterstützt den dauerhaften Erhalt der Bondingschicht (Firma Ultradent Products, 2018). Es gehört zu den Adhäsivsystemen der V. Generation und kann nach der „Total-Etch-Technik“ mit einer Ätzung durch Phosphorsäure angewandt werden. Anschließend wird das Einkomponentensystem, bestehend aus einem selbstprimenden Adhäsiv, aufgetragen. Die Kombination aus Primer und Adhäsiv im Einflaschensystem erlaubt als Mehrkomponentenadhäsiv, den hydrophilen Primer und das hydrophobe Adhäsiv in einem Schritt zu applizieren. Das Adhäsiv wirkt dabei, wie zuvor beschrieben, als Haftvermittler (Hellwig et al., 2009).

2.1.3.2 Ceramic Primer II[®]

Bei *Ceramic Primer II*[®] (Firma GC, Tokyo, Japan) handelt es sich um einen speziellen Primer, der die Oberflächen von Keramik- und Kompositrestaurationen benetzen soll, um bei Befestigung bzw. Reparatur einen starken Verbund zu den Kompositmaterialien zu ermöglichen (Firma GC, 2017a). Dieser wurde zur Anwendung an Feldspat-, Leuzit- und Lithiumdisilikatkeramik, Zirkonoxid, konventionellen Kompositen und hochgefüllten Kompositen sowie Hybrid- und Nanokeramik wie beispielsweise *Cerasmart*[®] entwickelt (Firma GC, 2017b).

Bei einer Anwendung wird die Verbundfläche der Restauration zunächst gemäß Herstellerangaben mit einem Ultraschallgerät oder Alkohol gereinigt. Dann wird mit

einem Micro-Brush eine dünne Schicht des *Ceramic Primer II*[®] aufgetragen und mit Luft verblasen. Anschließend wird der Befestigungszement appliziert (Firma GC, 2016a).

2.1.4 Komposite

In dem vorliegenden Versuchssetting werden das Befestigungskomposit *PermaFlo DC*[®] (Ultradent Products, South Jordan, USA) sowie das Füllungskomposit *Enamel plus EF Hri function*[®] (Micerium, Avegno, Italien) verwendet, die nachfolgend vorgestellt werden.

2.1.4.1 PermaFlo DC[®] als Befestigungskomposit

Befestigungskomposite dienen dem adhäsiven Verbund der indirekten Restauration am Zahn. Die Stellungnahme der DGZMK gibt folgende Hinweise zu Befestigungskompositen (DGZMK, 2007): Die Adhäsivtechnik umfasst den Schmelz- und Dentinverbund sowie die Haftung am Werkstück. Die Auswahl des geeigneten Befestigungskomposits erfordert unter Berücksichtigung eines möglichen Auswaschens aus der Zementfuge ein hochvisköses Komposit, welches zeitgleich auch noch die Überschusskontrolle erleichtert. Dualhärtende Befestigungskomposite haben sich bewährt. Zu berücksichtigen ist, dass eine Inhibition der selbsthärtenden Komponente durch saure Bestandteile erfolgen kann. Aus diesem Grund sollten Bondingsysteme Anwendung finden, die klinisch erprobt sind, und durch Mehrfachapplikation aufgetragen werden, weshalb selbstkonditionierende Adhäsive nicht empfohlen werden.

Das im Versuchssetting verwendete dualhärtende Befestigungskomposit *PermaFlo DC*[®] ist ein thixotropes Komposit mit einem Fülleranteil von 70 Gew% und kann in dünnsten Filmstärken von 9 µm abbinden (Firma Ultradent Products, 2017). Aufgrund dessen ist das Produkt ideal zur Befestigung indirekter Restaurationen geeignet.

2.1.4.2 Enamel plus EF Hri function[®] als Füllungskomposit

Als Vertreter der Füllungskomposite wurde im vorliegenden Versuch *Enamel plus EF Hri function*[®] (Micerium, Avegno, Italien) verwendet. Das Material hat einen Fülleranteil von 80 Gew%. Von den 80 Gew% bilden die Glasfüllkörper mit einer durchschnittlichen Größe von 1 µm den größten Anteil mit 68 Gew% und die Nanozirkonoxidpartikel mit einer Größe von 20 nm einen Anteil von 12 Gew%. Die minimale Stärke, mit der *Enamel plus EF Hri function*[®] aufgetragen werden sollte, beträgt 0,5 mm. Dem Material

sind eine hohe Abrasionsfestigkeit sowie ein großer Kompressionswiderstand, der dem natürlichen Schmelz in seiner Eigenart sehr nahe kommt, zu Eigen (Firma Micerium, 2017).

2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Zielsetzung des Versuchs besteht darin, dass mithilfe der Universalprüfmaschine mit ausgesparter Klinge nach ISO Norm 29022:2013 Scherspannungswerte erfasst werden, die angeben, unter welcher Spannung Kunststoffknöpfe von *Cerasmart*[®]-Plättchen abgeschert werden (s. 2.2.5). Dazu müssen Probenkörper hergestellt werden, indem zuvor geschnittene *Cerasmart*[®]-Plättchen in *Technovit 4004*[®]-Kunststoff eingebettet werden, so dass eine identische Anwendung in der Scherspannungsmaschine gewährleistet wird.

2.2.1 Herstellung der Probenkörper

Als formgebendes Element für die Probenkörper sollen 25 ml Einmalspritzen mit ihrem zylindrischen Hohlraum dienen. Die Einmalspritzen werden folgendermaßen modifiziert: die Düse wird mithilfe eines Skalpells entfernt, so dass der Stempel von dieser Seite aus in den Hohlraum eingeführt werden kann (Abb. 6).



Abb. 6: Modifizierte Einmalspritze ohne Düse im Vergleich zur unbehandelten Einmalspritze

Mithilfe des Stempels kann die Höhe des Probenblocks vorgegeben werden. Die Höhe des Stempels wird in der Einmalspritze auf 22 ml eingestellt und in eine Holzvorrichtung eingehängt. Die Handauflagen der Einmalspritzen, die bei herkömmlicher Verwendung das Gleiten des Stempels im Kolben und die Griffigkeit erleichtern sollen, dienen in dem Versuch zum planen Einhängen der modifizierten Einmalspritzen in die speziell hergestellte Holzvorrichtung (Abb. 7).



Abb. 7: Hergestellte Holzvorrichtung zum Einhängen der Einmalspritzen

Anschließend wird der *Technovit*[®]-Kunststoff angemischt und in die Einmalspritzen eingefüllt (Abb. 8).



Abb. 8: Unbefüllte Einmalspritzen in der Holzvorrichtung

Mithilfe der Präzisionsmaschine Exakt 300 CP (Exakt Advanced Technologies GmbH, Norderstedt, Deutschland) werden *Cerasmart*[®]-Blöcke in kleine Plättchen mit einer Dicke von 4 mm und einer Größe von 14x12 mm geschnitten. Die Maschine besitzt eine Parallelführung der Schneideblätter, so dass die Oberfläche annähernd plan ist. Die überstehenden Bruchkanten werden nach dem Schneiden manuell mit einer Fräse vorsichtig beigearbeitet, indem diese Kanten am Rand gebrochen werden. Um die zuvor geschnittenen *Cerasmart*[®]-Plättchen in das *Technovit 4004*[®] einzubetten, werden diese mithilfe von Klebewachs auf Objektträgern aus Glas fixiert (Abb. 9), so dass gewährleistet werden kann, dass die Oberfläche der Plättchen plan im Kalteinbettmittel *Technovit 4004*[®] liegt.

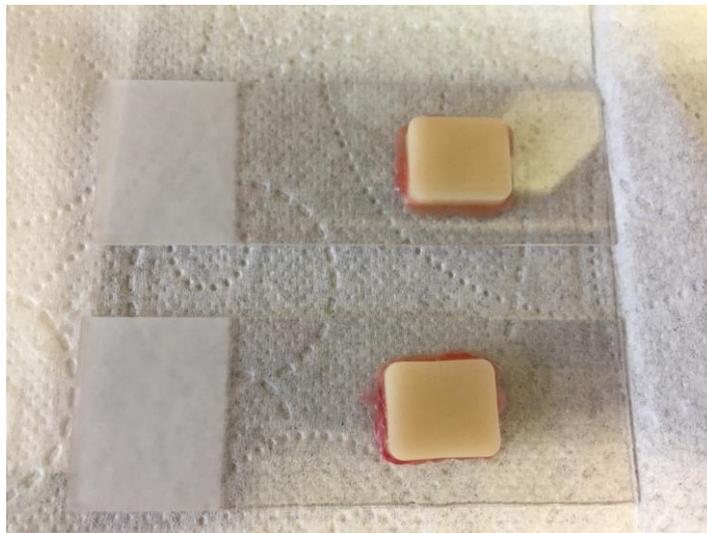


Abb. 9: Mit Klebewachs fixierte *Cerasmart*[®]-Plättchen auf Glasobjektträgern

Anschließend wird der Objektträger mit dem *Cerasmart*[®]-Plättchen von oben in den *Technovit 4004*[®]-Kunststoff gedrückt, so dass das Plättchen plan im Kunststoff liegt und die Seiten des Glasobjektträgers auf den Handauflagen liegen. Infolgedessen wird eine Positionsänderung der Plättchen im Kunststoff verhindert.

Nun erfolgt der Abbindeprozess des Kunststoffes. Nach dem Abbinden (Abb. 10) wird der fertige Probenkörper mithilfe des Stempels aus dem Kolben gedrückt.

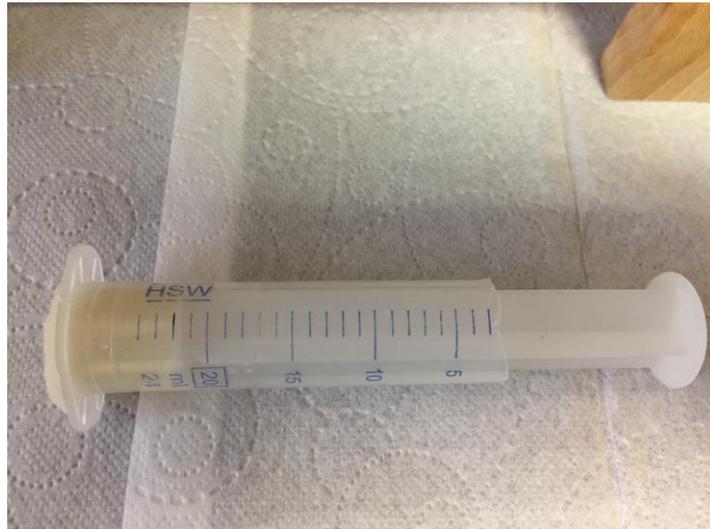


Abb. 10: Abgebundene Probe in der Einmalspritze

Nachdem der Probenkörper aus dem Kolben gedrückt wurde, werden jegliche Klebewachsreste mit dem Dampfstrahler entfernt. Es dürfen weder Klebewachsreste noch eine Schmierschicht auf der Oberfläche verbleiben, um die Haftwerte nicht zu verfälschen. Insgesamt werden auf diese Art und Weise vierzig Probenkörper hergestellt. Nun können die fertigen Probenkörper (Abb. 11) die verschiedenen Vorbehandlungsschritte durchlaufen.



Abb. 11: Fertiger Probenkörper

2.2.2 Vorbehandlung der Probenkörper

Die zuvor hergestellten Probenkörper werden dem Versuchssetting entsprechend vorbehandelt. Zu den in diesem Versuch gewählten Vorbehandlungsschritten zählen das Sandstrahlen der Plättchenoberfläche und die Applikation eines Adhäsivsystems.

2.2.2.1 Sandstrahlen

Da die Literatur eine gesandstrahlte Oberfläche zur besseren Benetzung mit Bonding empfiehlt (Naichuan et al., 2015), sieht der Versuchsaufbau bei jeder Probe ein Sandstrahlen nach dem nachfolgend beschriebenen Verfahren vor: Das Sandstrahlen von Restaurationsoberflächen wie Metall und Keramiken sollte unter Abstandseinhaltung von 10 mm für 10-15 Sekunden erfolgen. Der Druck sollte dabei 380 kPa betragen und die Aluminiumkörper sollten eine Größe von 50 µm aufweisen (Lung und Matinlinna, 2012).

2.2.2.2 Applikation der Adhäsivsysteme

Während das Sandstrahlen bei allen 40 Proben Anwendung findet, werden jeweils 20 Proben unter Beachtung der Herstellerangaben mit *Peak universal*[®] und 20 mit *Ceramic Primer II*[®] vorbehandelt.

Peak universal[®] wird den Herstellerangaben entsprechend mit einem Pinsel für zehn Sekunden aufgetragen, danach zehn Sekunden mit einem Püster verblasen, bis eine homogene Bondingschicht die Oberfläche benetzt, und anschließend im Standard Power Mode der VALO[®] (Ultradent Products, South Jordan, USA) bei 1000 mW/cm² für zehn Sekunden lichtgehärtet (Firma Ultradent Products, 2012).

Der *Ceramic Primer II*[®] wird ebenfalls ohne zeitliche Vorgaben des Herstellers mit einem Micro-Brush appliziert und verblasen und wirkt anschließend ein, da eine Lichtpolymerisation nicht notwendig ist (Firma GC, 2016a).

2.2.3 Befestigung der Kunststoffknöpfe auf den Probenkörpern

Gemäß dem Versuchsaufbau wird nach dem genormten Verfahren der ISO Norm 29022:2013 auf jedem Probenkörper ein Kunststoffknöpfchen aufgeklebt und mit einer Lichtquelle ausgehärtet.

2.2.3.1 Aufkleben der genormten Kunststoffknöpfe nach ISO Norm 29022:2013

Damit Umfang, Durchmesser und Höhe der Kunststoffknöpfchen aus *PermaFlo DC*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®] homogen gestaltet werden können, ermöglicht eine spezielle Vorrichtung nach ISO Norm 29022:2013 (Abb. 12) eine Fixierung der Kunststoffknöpfe auf den Proben (Abb. 13).

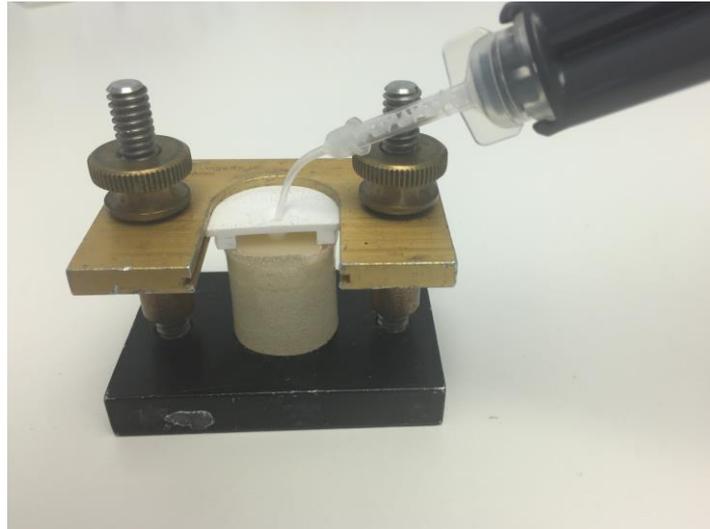


Abb. 12: Aufkleben eines genormten Kunststoffknöpfchens auf dem eingespannten Probenkörper

In der in Abbildung 13 in ihren Einzelteilen dargestellten Vorrichtung wird der Probenkörper mit einer Wellenfeder fixiert. Der Zylinderformeinsatz mit einem Lochdurchmesser von $(2,38 \pm 0,03)$ gestattet die exakte Positionierung und Größe des Kompositknöpfchens auf der *Cerasmart*[®]-Oberfläche. Beim Einspannen der Probe ist darauf zu achten, dass der Zylinderformeinsatz plan aufliegt und nicht durch zu hohe Kraftexposition beim Zudrehen der Wellenfeder verbiegt, da sonst eine perfekte Verklebung nicht mehr möglich ist, weil das Kompositknöpfchen durch die Aussparung im Zylinderformeinsatz nicht mehr bündig auf der Oberfläche des Probenkörpers adaptiert werden kann. Weiterhin ist darauf zu achten, dass in den oberen um 45° abgeschrägten Teil des Zylinderformeinsatzes kein Komposit mehr eingefüllt wird, da andernfalls die Entnahme aus dem Formeinsatz erschwert wird oder das Kunststoffknöpfchen sogar abreißen kann (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013).

Das exakte Verkleben des Kompositknöpfchens mit der Materialoberfläche von *Cerasmart*[®] stellt einen sehr empfindlichen Teil dar und kann bei Nichteinhaltung der zuvor beschriebenen Verfahrensweise zu hohen Standardabweichungen führen.

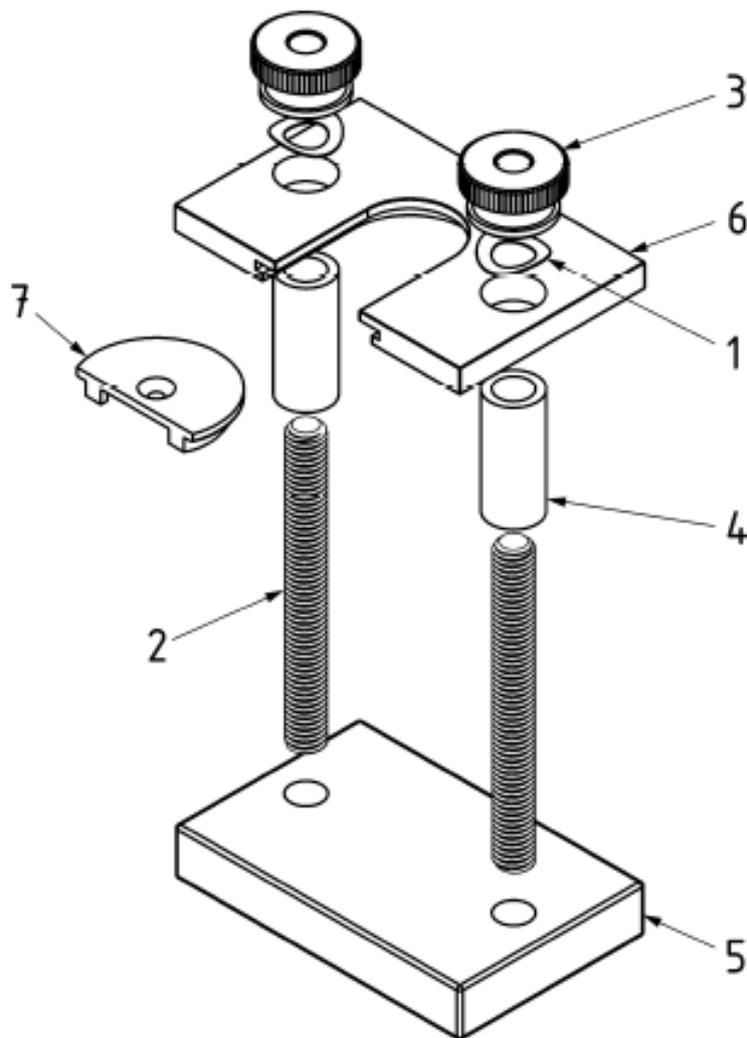


Abb. 13: Vorrichtung nach ISO Norm 29022:2013 zum Aufkleben der Kunststoffknöpfe auf den Probenkörpern (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013); Legende: 1-Wellenfeder, 2-Gewindestab (1/4"-20), 3-Rändelmutter (1/4"-20), 4-Buchse, 5-Unterteil der Spannvorrichtung, 6-Oberteil der Spannvorrichtung, 7-Zylinderformeinsatz

2.2.3.2 Aushärten mit einer Lichtquelle

Sowohl das Adhäsivsystem *Peak universal*[®] (s. 2.2.2.2) als auch die beiden verwendeten Kunststoffe *PermaFlo DC*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®] müssen mit einer Polymerisationslampe ausgehärtet werden, um einen Polymerisationsprozess des Materials zu initiieren. Im gewählten Versuchsaufbau wurde zunächst die Bondingschicht bei *Peak universal*[®] – *Ceramic Primer II*[®] ist kein lichthärtendes Adhäsivsystem – aufgetragen und ausgehärtet. Nach dem Einbringen des jeweiligen Komposits in den zylinderförmigen Einsatz zur Herstellung des Knöpfchens wird auch dieses im High Power Mode bei 1400 mW/cm² zweimal für vier Sekunden polymerisiert. Danach ist der Probenkörper mit aufgeklebtem Knöpfchen fertiggestellt (Abb. 14).



Abb. 14: Fertiger Probenkörper mit aufgeklebtem Kompositknöpfchen

Bei allen Polymerisationsprozessen wird dieselbe Lichtquelle bzw. LED-Polymerisationslampe namens *VALO*[®] (Ultradent Products, South Jordan, USA) verwendet. *VALO*[®] ist mit vier LEDs ausgestattet, die insgesamt drei verschiedene Wellenlängen in einem Spektrum von 395-480 nm abdecken. Zudem ist die Lampe mit einer Glaslinse ausgestattet, die das abgegebene Licht in einem homogenen Lichtstrahl bündelt.

2.2.4 Thermocycling

Nach der Fertigstellung aller Proben werden diese einzeln in kleine Nylonsäckchen verpackt. Die Verpackung gilt als Garant dafür, dass beim Thermocycling möglicherweise abfallende Kunststoffknöpfe anschließend der Probe entsprechend zugeordnet werden können und nicht verloren gehen. Insgesamt haben alle Proben jeweils 2500 Zyklen bei einer Temperatur von 5 und 55 Grad Celsius mit einer Eintauchzeit von 60 Sekunden durchlaufen.

2.2.5 Abscheren des Kompositknöpfchens mit der Scherspannungsmaschine nach ISO Norm 29022:2013

Um den wissenschaftlichen Standards zu entsprechen, werden die Versuche mit der Universalprüfmaschine mit ausgesparter Klinge nach ISO Norm 29022:2013 durchgeführt (Abb. 15). Die Proben werden mithilfe einer Probenhalterung in der Maschine fixiert, so dass der Scherarm mit ausgesparter Klinge senkrecht auf das Kunststoffknöpfchen trifft. Die Maschine erhöht dabei die Vorschubgeschwindigkeit des Querhaupts von $1,0 \pm 0,1$ mm/min so lange, bis das Knöpfchen abgeschert ist. Dabei wird die gemessene Kraft in Newton pro Fläche – angegeben in mm^2 – in Scherspannung – angegeben in MPa – umgerechnet, aufgezeichnet und nach der Versuchsdurchführung ausgewertet. Die ermittelten Scherspannungswerte werden in einer tabellarischen Urliste dargestellt, die statistisch in Bezug auf Minimum und Maximum, Median und Mittelwert, Quartile und Standardabweichung ausgewertet und anschließend in Säulendiagrammen und Boxplotdiagrammen visualisiert werden.

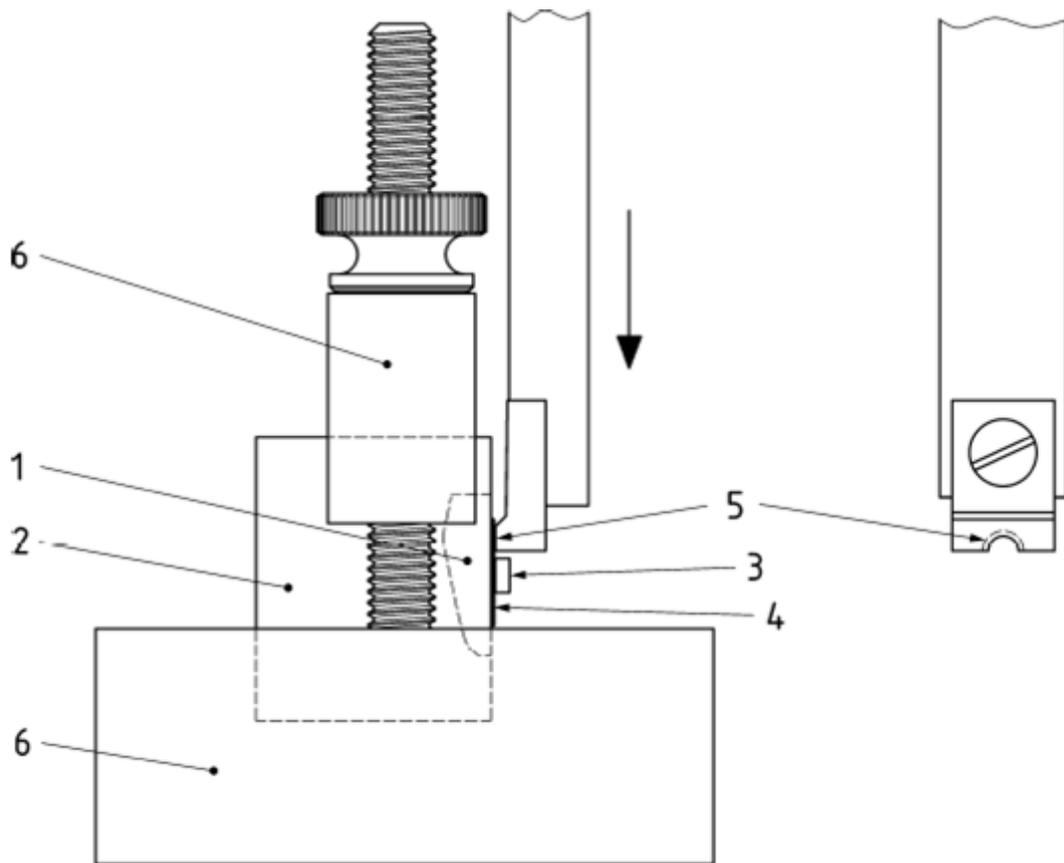


Abb. 15: Universalprüfmaschine nach ISO Norm 29022:2013 mit ausgesparter Klinge am Scherarm (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013); Legende: 1-Zahn, 2-ausgehärtetes Einbettungsmaterial, 3-ausgehärteter Kompositzylinder, 4-ausgehärtetes Adhäsiv, 5-Scherklinge mit Aussparung, 6-Prüfspannvorrichtung

2.3 Codierung des Versuchs

Das gewählte Versuchssetting wird mit einer Codierung (Tab. 1) versehen, so dass diese bei späteren Versuchsreihen eine Vergleichbarkeit und genaue Zuordnung ermöglicht.

Tab. 1: Codierung der verwendeten Vorbehandlungen und Materialien

CAD/CAM-Material	Cerasmart®	1
	CeltraDuo®	2
Sandstrahlen	ja	1
	nein	2
Flusssäure	ja	1
	nein	0
Phosphorsäure	ja	1
	nein	0
Alkohol	ja	1
	nein	0
Bondingsystem	Ceramic Primer II®	1
	Peak universal®	2
Komposite	PermaFlo DC®	1
	Enamel plus EF Hri function®	2
Probennummer		01
		...
		10

Somit ergibt sich für den dieser Arbeit zugrundeliegenden Versuch folgende Codierung (Tab. 2): Probenreihe 1 enthält die Kombination aus *Cerasmart*® + Sandstrahlen + *Ceramic Primer II*® + *PermaFlo DC*® – Codierung: 1-1-0-0-0-1-1; Probenreihe 2 aus *Cerasmart*® + Sandstrahlen + *Ceramic Primer II*® + *Enamel plus EF Hri function*® – Codierung: 1-1-0-0-0-1-2; Probenreihe 3 aus *Cerasmart*® + Sandstrahlen + *Peak universal*® + *PermaFlo DC*® – Codierung: 1-1-0-0-0-2-1 und Probenreihe 4 aus *Cerasmart*® + Sandstrahlen + *Peak universal*® + *Enamel plus EF Hri function*® – Codierung: 1-1-0-0-0-2-2.

Tab. 2: Codierung des vorliegenden Versuchssettings

Probenreihe	Komposit- block	Sand- strahlen	Fluss- säure	Phosphor- säure	Alkohol	Bonding		Komposit		Codierung
	<i>Cerasmart</i> [®]					<i>Ceramic Primer II</i> [®]	<i>Peak universal</i> [®]	<i>PermaFlo DC</i> [®]	<i>Enamel plus EF Hri func- tion</i> [®]	
Probenreihe 1	x	x				x		x		1-1-0-0-0-1-1- Probennummer
Probenreihe 2	x	x				x			x	1-1-0-0-0-1-2- Probennummer
Probenreihe 3	x	x					x	x		1-1-0-0-0-2-1- Probennummer
Probenreihe 4	x	x					x		x	1-1-0-0-0-2-2- Probennummer

2.4 Lichtmikroskopische Betrachtung und Profilometrie

Nach den Abscherversuchen in der Universalprüfmaschine mit ausgesparter Klinge werden die Proben zuerst unter dem Lichtmikroskop betrachtet und danach mithilfe eines Profilometers hinsichtlich ihrer Oberflächenstruktur untersucht und ausgewertet: Zunächst werden die Bruchstellen unter dem Lichtmikroskop Leica Stereo Wild mit der Lichtquelle KL 2500 LCD (Leica Camera AG, Wetzlar, Deutschland) betrachtet und unter 25-facher Vergrößerung fotografiert und nach den folgenden beiden Kriterien bewertet:

1. Erkennbare Rückstände des verwendeten Kompositknöpfchens
2. Erkennbare Ausrisse aus dem *Cerasmart*[®]-Block

Dabei werden die Proben in vier Bereiche kategorisiert, je nachdem, an welcher Stelle sie eine Fraktur – Verbundfläche, Kompositknöpfchen, *Cerasmart*[®]-Plättchen und eine Kombination aus Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen – aufweisen. Anschließend erfolgt eine Auswertung der Proben anhand der 3D-Darstellung der Oberflächenmorphologie mithilfe des Profilometers FRT MicroProf (FRT GmbH, Bergisch Gladbach, Deutschland), welches einen Weißlichtsensor verwendet. Die Messungen werden durch einen Computer gesteuert, der aufgrund von Oberflächentopographiemessungen 3D-Rauheits- und Welligkeitskennwerte ermittelt und auswertet (Jung, 2012). Diese Darstellungsweise erlaubt es, die Oberfläche hinsichtlich Erhebungen – also Rückständen des Komposits – und hinsichtlich Vertiefungen – also Ausrissen aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen – zu beurteilen. Dies kann neben der lichtmikroskopischen Auswertung einen weiteren Nachweis dafür liefern, in welchem Bereich das Verbundversagen stattgefunden hat, um die beobachteten Frakturzonen zu bestätigen. Die Frakturzonen werden im Uhrzeigersinn in vier Quadranten aufgeteilt und mit „A“, „B“, „C“ oder „D“ bezeichnet (Abb. 16). Zusätzlich wird ein Bereich des vorbehandelten Plättchens, welcher keine Frakturzone enthält, analysiert, mit „ref“ bezeichnet und im Ergebnisteil als Referenzprofil den Messwerten der Frakturzonen gegenübergestellt.

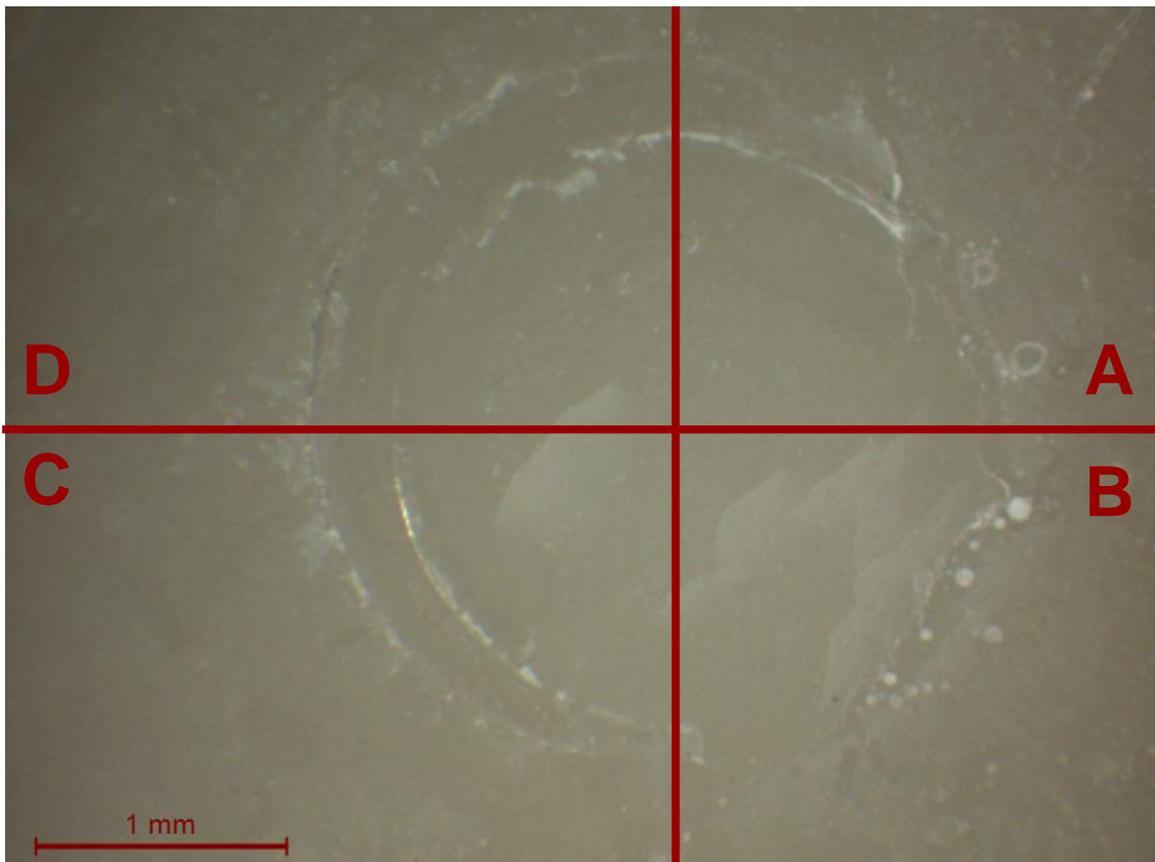


Abb. 16: Aufteilung der Frakturzone in vier Quadranten

2.4.1 Rauheit und Welligkeit

Jede einzelne Probe wird profilometrisch betrachtet, um mithilfe der Rauheit und Welligkeit eine Aussage über die Oberflächenstruktur des Probenkörpers zu treffen. Unter dem Profilometer, bei dem der Vor- und Nachlaufbereich der profilometrischen Auswertung auf $L_c/2$ eingestellt wird, werden zunächst von jeder Probe Gestaltabweichungen 1. Ordnung – also kleine Unebenheiten – durch einen Filter ausgeglichen, der die Ebene der Probe, sofern dies notwendig ist, korrigiert. Danach werden die Proben segmentiert, um Lufteinschlüsse herauszufiltern. Abschließend werden ein Rauheits- und ein Welligkeitsprofil erstellt. Dabei werden unter Rauheit Rillen und Riefen in der Oberfläche und unter Welligkeit das Makroprofil bzw. das Höhenprofil in der Oberflächengestaltabweichung verstanden (Abb. 17). Demnach eignet sich die Rauheit insbesondere, um die Grundstruktur der Probenoberflächen nach der Vorbehandlung zu beurteilen. Daraus können Rückschlüsse auf

Bearbeitungsspuren, die Vorbehandlung sowie Veränderungen der Oberfläche durch mögliche chemische Einwirkungen gezogen werden. Die Welligkeit wird hingegen herangezogen, um eine Aussage über den Verbundbereich von Plättchen und Kompositknöpfchen zu treffen (Uhlmann, 2018).

Gliederungssystem für Gestaltabweichung nach DIN 4760

Gestaltabweichung

1. Ordnung: Formabweichungen



Beispiele für Ursachen und Art der Abweichung

Fehler in den Führungen der Werkzeugmaschine, Durchbiegung der Maschine oder des Werkstücks, Härteverzug und Verschleiß führen zu Geradheits-, Ebenheits-, Rundheitsabweichung

2. Ordnung: Welligkeit



außermittige Einspannung, Form- oder Laufabweichungen eines Fräsers, Schwingungen der Werkzeugmaschine oder des Werkzeugs führen zu Wellen

3. Ordnung: Rauheit



Form der Werkzeuge, Vorschub oder Zustellung des Werkzeugs führt zu Rillen

4. Ordnung: Rauheit



Vorgang der Spanbildung (Reiß-, Scherspan, Aufbauschneide), Werkstoffverformung beim Strahlen, Knospenbildung bei galvanischer Behandlung führt zu Riefen, Kuppen, Schuppen

5. Ordnung: Rauheit

Kristallisationsvorgänge, Veränderung der Oberfläche durch chemische Einwirkung (z. B. Beizen) und Korrosionsvorgänge führen zu Abweichungen in der Gefügestruktur

6. Ordnung: Rauheit im atomaren Bereich Abweichung im Gitteraufbau des Werkstoffes

Abb. 17: Gestaltabweichungen von Oberflächen (Uhlmann, 2018)

2.5 Statistische Auswertung

Um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu ermöglichen, werden die Scherspannungswerte folgendermaßen statistisch analysiert: Je Kombination wird eine Probenreihe mit 10 Proben erhoben, also insgesamt 4 Probenreihen und 40 Proben.

Aus den 40 bzw. viermal zehn Proben ergibt sich die Stichprobe, die im Anschluss der Auswertung Rückschlüsse auf die Grundgesamtheit ermöglichen soll. Die univariate Statistik orientiert sich an einem qualitativen, stetigen Merkmal, den Scherspannungswerten. Diese werden zuerst in einer Urliste (Tab. 3) und in einer sortierten Liste (siehe Anhang, Tab. 10) – in aufsteigender Folge gereihte Scherspannungswerte – dargestellt und nachfolgend auf Grundlage der sortierten Liste als Säulendiagramm visualisiert. Alle

weiteren Interpretationen der Ergebnisse erfolgen statistisch und visuell auf Grundlage der Urliste. Es werden jeweils die Minimal- und Maximalwerte sowie das arithmetische Mittel, der Median und die Standardabweichung der jeweiligen Probenreihen miteinander verglichen. Die Minimal- und Maximalwerte zeigen in jeder Probenreihe die niedrigsten bzw. höchsten Scherspannungswerte an. Während der Mittelwert Aufschluss über die Durchschnittswerte der Scherspannung für die jeweilige Probenreihe gibt, sortiert der Median je fünf der ermittelten Scherspannungswerte oberhalb und fünf Werte unterhalb seines Wertes ein und berücksichtigt dabei die Streuung der Daten bzw. Ausreißer nicht so stark wie das arithmetische Mittel. Die Standardabweichung trifft eine Aussage über den mittleren Fehler aufgrund der Streuung der Scherspannungswerte und den Schwankungsbereich der Daten.

Abschließend werden die Scherspannungswerte in einem Boxplotdiagramm dargestellt. Als Grundlage dienen die sortierten Scherspannungswerte, die in vier Quartile aufgeteilt werden. Jedes Quartil umfasst 25 % der Daten und insgesamt die Spannweite von Minimal- zu Maximalwert.

3. Ergebnisse

Die ermittelten Ergebnisse des Versuchs werden unter drei verschiedenen Gesichtspunkten ausgewertet und analysiert: Zuerst werden die Scherspannungswerte, die in MPa gemessen werden, als aussagekräftiges Ergebnis zur Verbundfestigkeit herangezogen. Als zweites werden die Frakturzonen der einzelnen Proben unter dem Lichtmikroskop optisch betrachtet und beurteilt, um die Verbundfestigkeit bzw. das Verbundversagen aufgrund von Ausrissen und Rückständen auswerten zu können. Die Auswertungen werden durch 3D-Darstellungen der Oberflächenprofile im Profilometer untermauert. Als drittes soll aufgrund der durch Profilometrie ermittelten Messwerte der Rauheit und Welligkeit eine Aussage über die Oberflächenstruktur der Proben getroffen werden.

3.1 Scherspannungswerte

Die ermittelten Scherspannungswerte der vier Probenreihen sowie die Ergebnisse der statistischen Auswertung sind in Tabelle 3 dargestellt. Das darauf folgende Säulendiagramm visualisiert die Scherspannungswerte in aufsteigender Reihung (Abb. 18).

Tab. 3: Urliste der Scherspannungswerte in MPa unter Angabe der Probennummer

Probennummer	Probenreihe 1: <i>Ceramic Primer II</i> [®] + <i>PermaFlo DC</i> [®] 1-1-0-0-0-1-1	Probenreihe 2: <i>Ceramic Primer II</i> [®] + <i>Enamel plus EF Hri</i> <i>function</i> [®] 1-1-0-0-0-1-2	Probenreihe 3: <i>Peak universal</i> [®] + <i>PermaFlo DC</i> [®] 1-1-0-0-0-2-1	Probenreihe 4: <i>Peak universal</i> [®] + <i>Enamel plus EF Hri</i> <i>function</i> [®] 1-1-0-0-0-2-2	Scherspannungswerte in MPa
01	17,4	20,6	21,5	16,1	
02	9,6	11,4	27,7	21,6	
03	22,4	11,4	12,9	17,2	
04	25,4	0,0 Verlust im Thermocycling	24,0	kein Wert von Maschine gemessen bzw. angezeigt	
05	11,8	7,4	27,7	0,2	
06	11,7	18,1	46,6	14,9	
07	3,5	11,0	26,0	6,5	
08	9,1	21,0	30,9	15,6	
09	3,2	0,0 Verlust im Thermocycling	28,9	14,0	
10	7,0	Probe nicht verwendbar; Knöpfchen nicht fixierbar	18,9	16,9	
Minimum	3,2	0,0	12,9	0,2	
1. Quartil	7,5	7,4	22,1	14,0	
Median	10,7	11,4	26,9	15,6	
3. Quartil	16,0	18,1	28,6	16,9	
Maximum	25,4	21,0	46,6	21,6	
Mittelwert	12,1	11,2	26,5	13,7	
Standardabweichung	7,1	7,4	8,4	6,1	

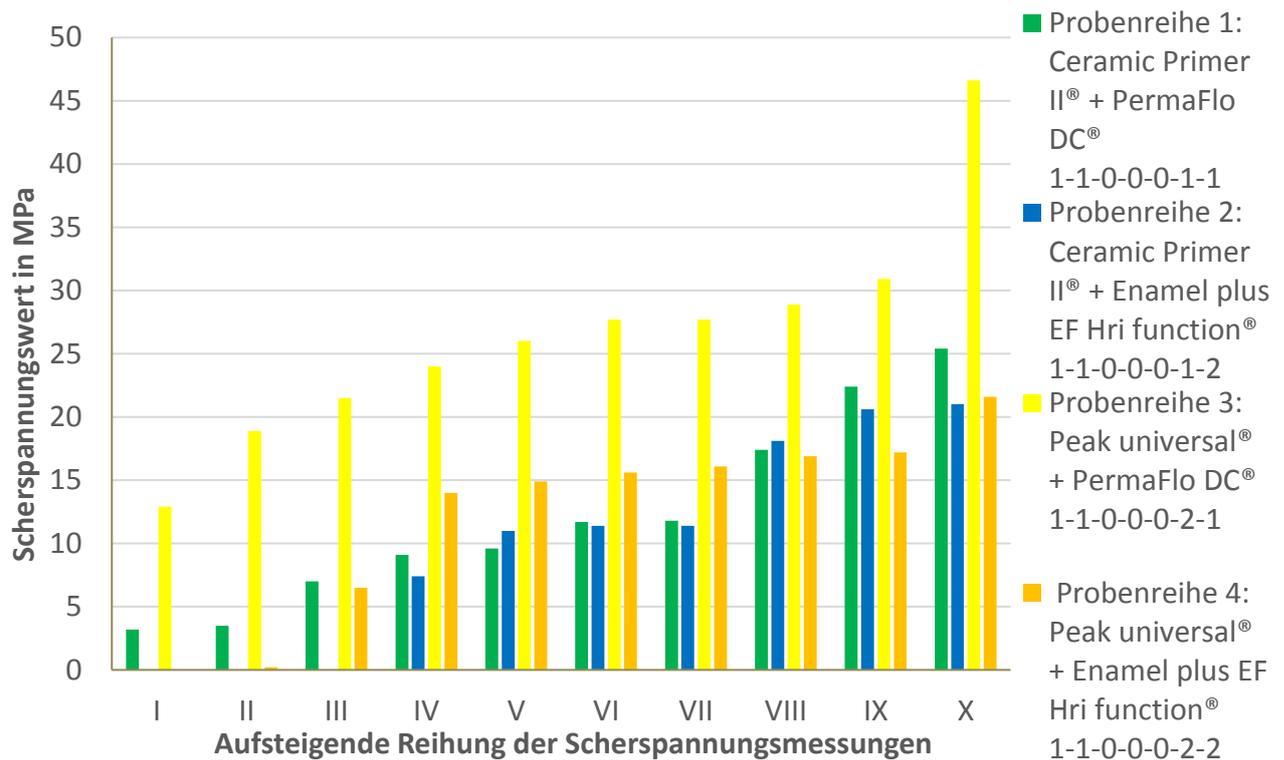


Abb. 18: Aufsteigende Scherspannungswerte in MPa, gemäß sortierter Liste

Vorab werden vier der vierzig Proben gesondert erläutert: In der zweiten Probenreihe ist eine Probe – Probennummer 1100012-10 – nicht verwendbar, da beim Herstellungsprozess ein Prozessfehler aufgetreten ist, der dazu führt, dass das Kompositknöpfchen beim Aufkleben aufgrund von starken Unebenheiten nicht auf der Oberfläche des *Cerasmart*[®]-Plättchens hält. Aus diesem Grund wird diese Probe aussortiert und bei der statistischen Auswertung nicht berücksichtigt. Darüber hinaus sind in der zweiten Probenreihe zwei weitere Werte – Probennummer 1100012-04 und 1100012-09 – auffällig. Diese beiden Proben weisen einen unzureichenden adhäsiven Verbund auf, so dass die Kunststoffknöpfchen bereits beim Thermocycling abgefallen sind und folglich keine Messung möglich war. Da es sich hierbei um ein nachgewiesenes Verbundversagen mit einem vorzeitigen Bruch handelt, werden diese beiden Werte, wie es die ISO Norm 29022:2013 vorgibt, in die statistische Auswertung einbezogen und mit dem Wert 0 MPa aufgeführt. Aus der vierten Probenreihe wird die Probennummer 1100022-04 hingegen nicht in die statistische Auswertung einbezogen, da die Scherspannungsmaschine nach ISO Norm 29022:2013 bei dieser Probe keinen Wert erkannt bzw. anzeigt hat, so dass hier ein Prozessfehler vorliegt, der jedoch nicht

auf ein Verbundversagen hinweist, was die Auswertung der Frakturzonen im nachfolgenden Teil bestätigt (vgl. 3.2).

Zunächst wird der in den ersten beiden Probenreihen verwendete *Ceramic Primer II*[®] betrachtet: die erste Probenreihe weist einen Minimalwert von 3,2 MPa und die zweite Probenreihe zwei Nullwerte auf. Zugleich erreicht die erste Probenreihe mit 25,4 MPa einen höheren Maximalwert als die zweite Probenreihe, die mit 21,0 MPa als höchstem Scherspannungswert sogar noch hinter dem zweiten Wert der ersten Probenreihe liegt. Werden die arithmetischen Mittelwerte der ersten und zweiten Probenreihe gegenübergestellt, fällt keine große Abweichung – lediglich um 0,9 MPa – auf, da die erste Probenreihe einen Mittelwert von 12,1 MPa und die zweite Probenreihe von 11,2 MPa besitzt. Eine Gegenüberstellung der beiden Säulendiagramme (Abb. 19 und Abb. 20) zeigt, dass die Scherspannungswerte der zweiten Probenreihe näher um den Mittelwert verteilt liegen, die Probenreihe bzw. die Verbindung von *Ceramic Primer II*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®] aufgrund der beiden Nullwerte jedoch eine niedrigere Konstanz im Vergleich zur ersten Probenreihe aufweist.

Abschließend lässt sich festhalten, dass die zweite Probenreihe aufgrund der zwei verlorenen Kunststoffknöpfchen und somit des niedrigeren Minimalwertes, des niedrigeren Maximalwertes sowie des niedrigeren Mittelwertes hinter der ersten Probenreihe zurückbleibt. Daraus ist zu schlussfolgern, dass die Verbindung von *Ceramic Primer II*[®] und *PermaFlo DC*[®] zu geringfügig besseren Ergebnissen führt als die Kombination aus *Ceramic Primer II*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®].

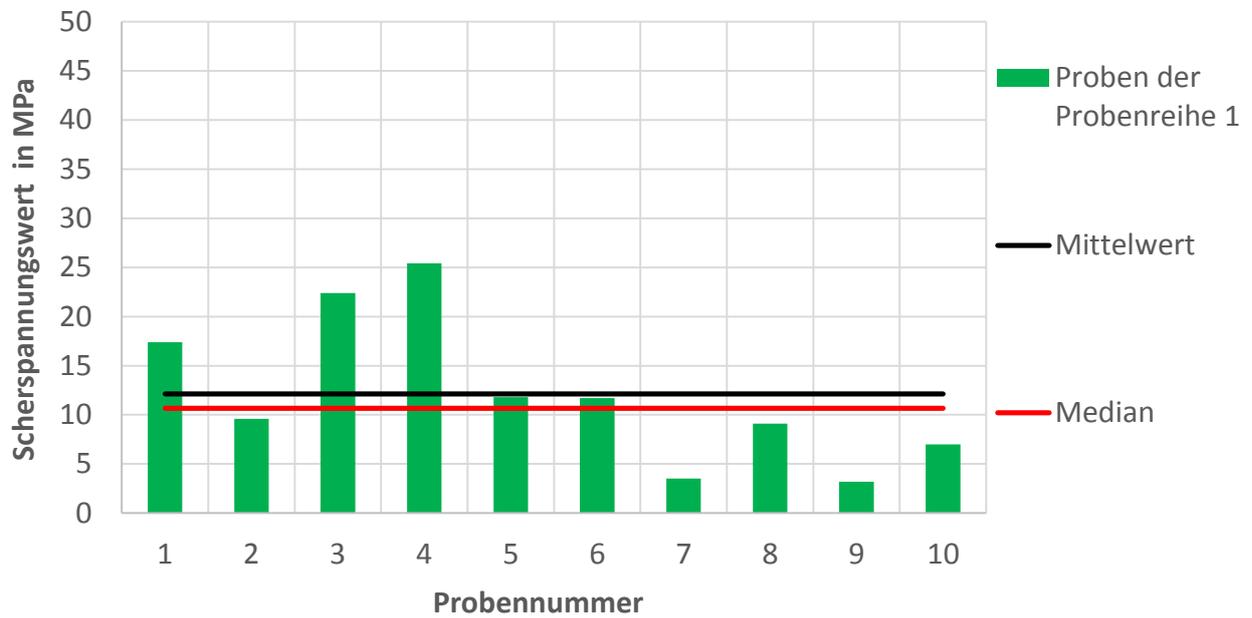


Abb. 19: Scherspannungswerte der Probenreihe 1: *Ceramic Primer II® + PermaFlo DC®* 1-1-0-0-0-1-1

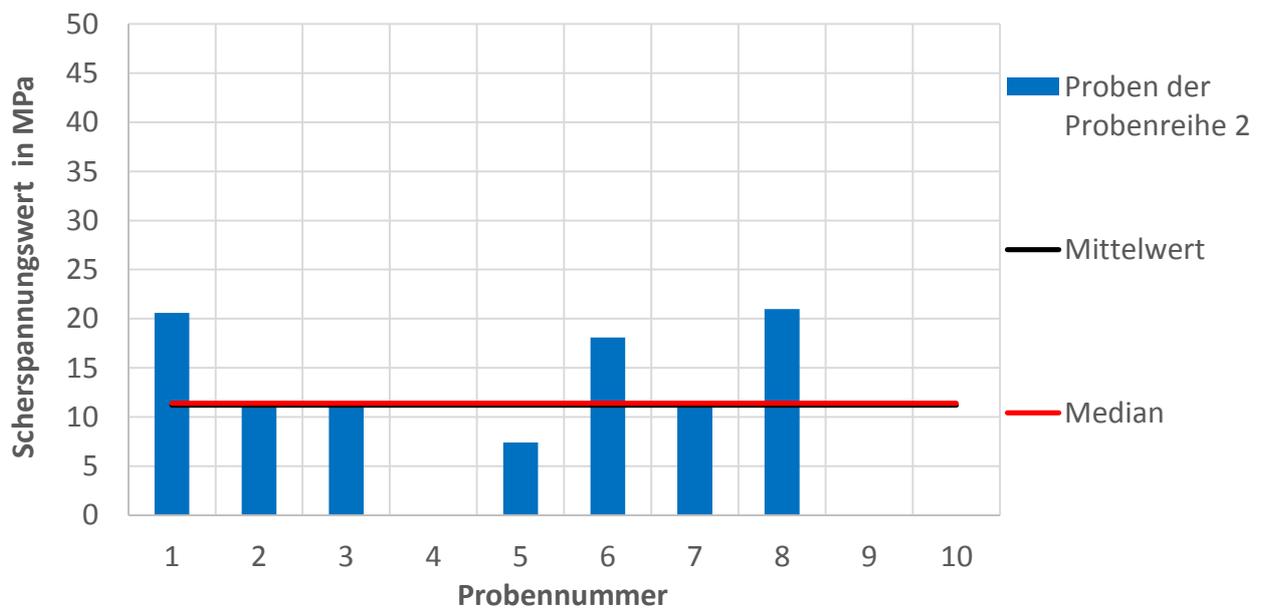


Abb. 20: Scherspannungswerte der Probenreihe 2: *Ceramic Primer II® + Enamel plus EF Hri function®* 1-1-0-0-0-1-2

Die Verbindung des Adhäsivsystems *Peak universal*[®] mit den Kompositen *PermaFlo DC*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®] zeigt bezogen auf die Minimalwerte in der dritten Probenreihe einen Wert von 12,9 MPa und in der vierten Probenreihe einen Wert von 0,2 MPa auf. Hinsichtlich der Maximalwerte hebt sich die dritte Probenreihe mit einem Wert von 46,6 MPa ebenfalls deutlich von der vierten Probenreihe ab, die einen Maximalwert von 21,6 MPa besitzt. Demzufolge sind die Mittelwerte der beiden Probenreihen deutlich verschieden, so dass der Wert der dritten Probenreihe mit 26,5 MPa fast doppelt so hoch liegt wie der Wert der vierten Probenreihe mit 13,7 MPa. Die Gegenüberstellung der beiden Säulendiagramme (Abb. 21 und Abb. 22) zeigt die vergleichsweise hohen Scherspannungswerte der dritten Probenreihe und die hohe Konstanz der Werte deutlich auf. Dies wird ebenfalls an der Tatsache deutlich, dass der zweitniedrigste Wert der dritten Probenreihe höher ist als der zweithöchste Wert der vierten Probenreihe.

Alle ermittelten Werte – der hohe Minimalwert, der hohe Maximalwert und der hohe Mittelwert – zeigen, dass die Kombination aus *Peak universal*[®] und *PermaFlo DC*[®] besser hält als die Kombination aus *Peak universal*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®].

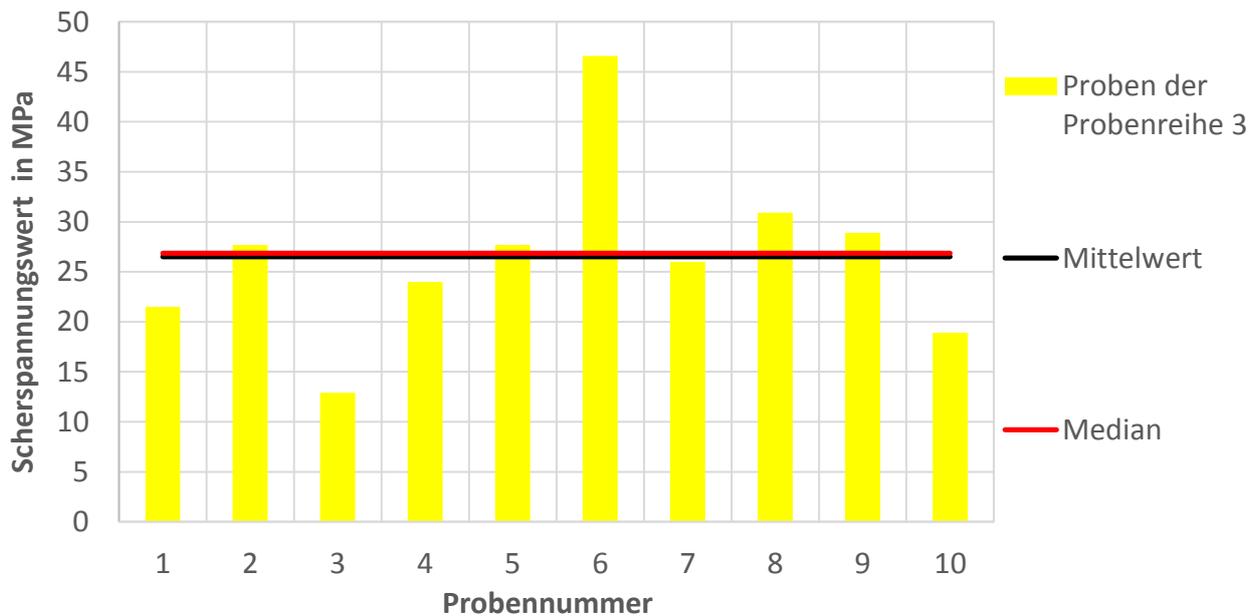


Abb. 21: Scherspannungswerte der Probenreihe 3: *Peak universal*[®] + *PermaFlo DC*[®] 1-1-0-0-0-2-1

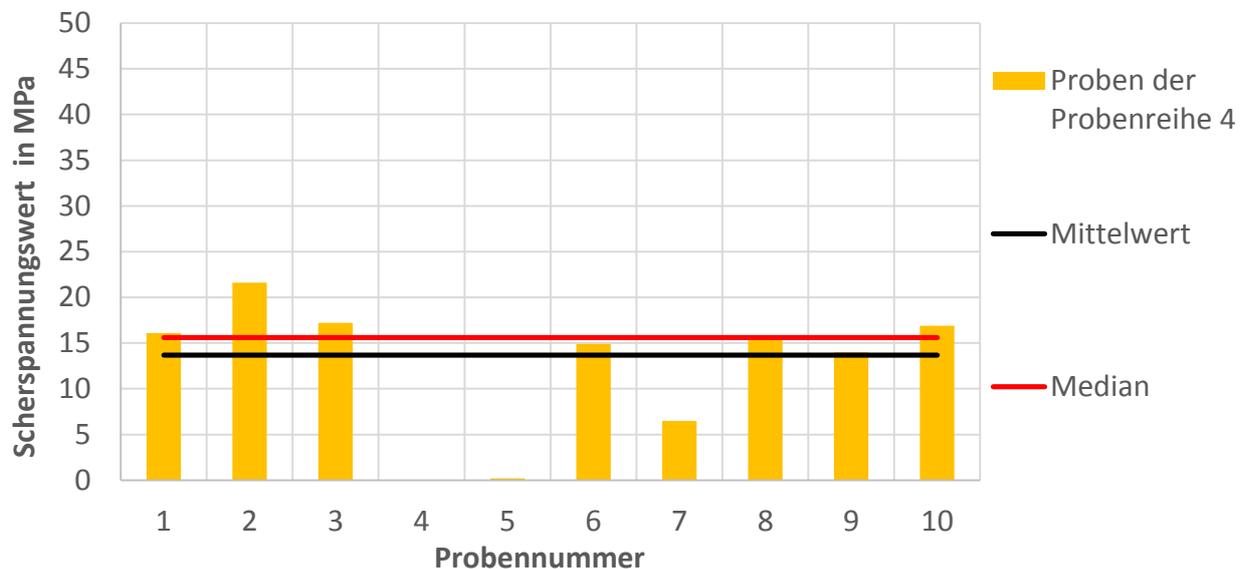


Abb. 22: Scherspannungswerte der Probenreihe 4: *Peak universal*[®] + *Enamel plus EF Hri function*[®] 1-1-0-0-0-2-2

Um nicht nur die Kombinationen des jeweiligen Adhäsivsystems mit den beiden Kompositen zu vergleichen, wird nachfolgend eine Gegenüberstellung der beiden verwendeten Adhäsivsysteme *Ceramic Primer II*[®] und *Peak universal*[®] mithilfe eines Boxplotdiagramms (Abb. 23) vorgenommen: Unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®] kommt es zu Minimalwerten von 0 MPa, während *Peak universal*[®] einen Minimalwert von 0,2 MPa aufweist. Der Maximalwert von 25,4 MPa unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®] bleibt deutlich hinter dem Maximalwert von *Peak universal*[®] mit 46,6 MPa zurück. Auch der Median liegt in beiden Probenreihen des *Ceramic Primer II*[®] unter den Werten der Probenreihen von *Peak universal*[®]. Darüber hinaus zeigt das Boxplotdiagramm deutlich, dass die zweiten und dritten Quartile der ersten beiden Probenreihen weitere Abstände aufweisen als die entsprechenden Quartile der dritten und vierten Probenreihe. Dies bedeutet, dass die Streuung um den Median herum in der dritten und vierten Probenreihe geringer ausfällt und folglich weniger Ausreißer außerhalb des Bereichs des zweiten und dritten Quartils zu verzeichnen sind.

Dieser Vergleich macht deutlich, dass sich die Probenreihen mit *Peak universal*[®] teilweise geringfügig und teilweise markant von den beiden Probenreihen des *Ceramic Primers II*[®] abheben und höhere Minimal-, Maximal- und Mittelwerte in Bezug auf die

Scherspannung aufweisen. So wie sich zuvor *PermaFlo DC*[®] im Vergleich zu *Enamel plus EF Hri function*[®] als das bessere Komposit herausgestellt hat, hat sich in dem Vergleich der beiden Adhäsivsysteme *Peak universal*[®] als das bessere Adhäsivsystem erwiesen.

Zusammengefasst bedeutet dies, dass eine Kombination aus *Peak universal*[®] und *PermaFlo DC*[®] zu signifikant höheren Scherspannungswerten führt und sich diese Kombination deutlich sowohl von der Kombination aus *Peak universal*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®] als auch den Kombinationen der beiden Komposite mit dem *Ceramic Primer II*[®] abhebt.

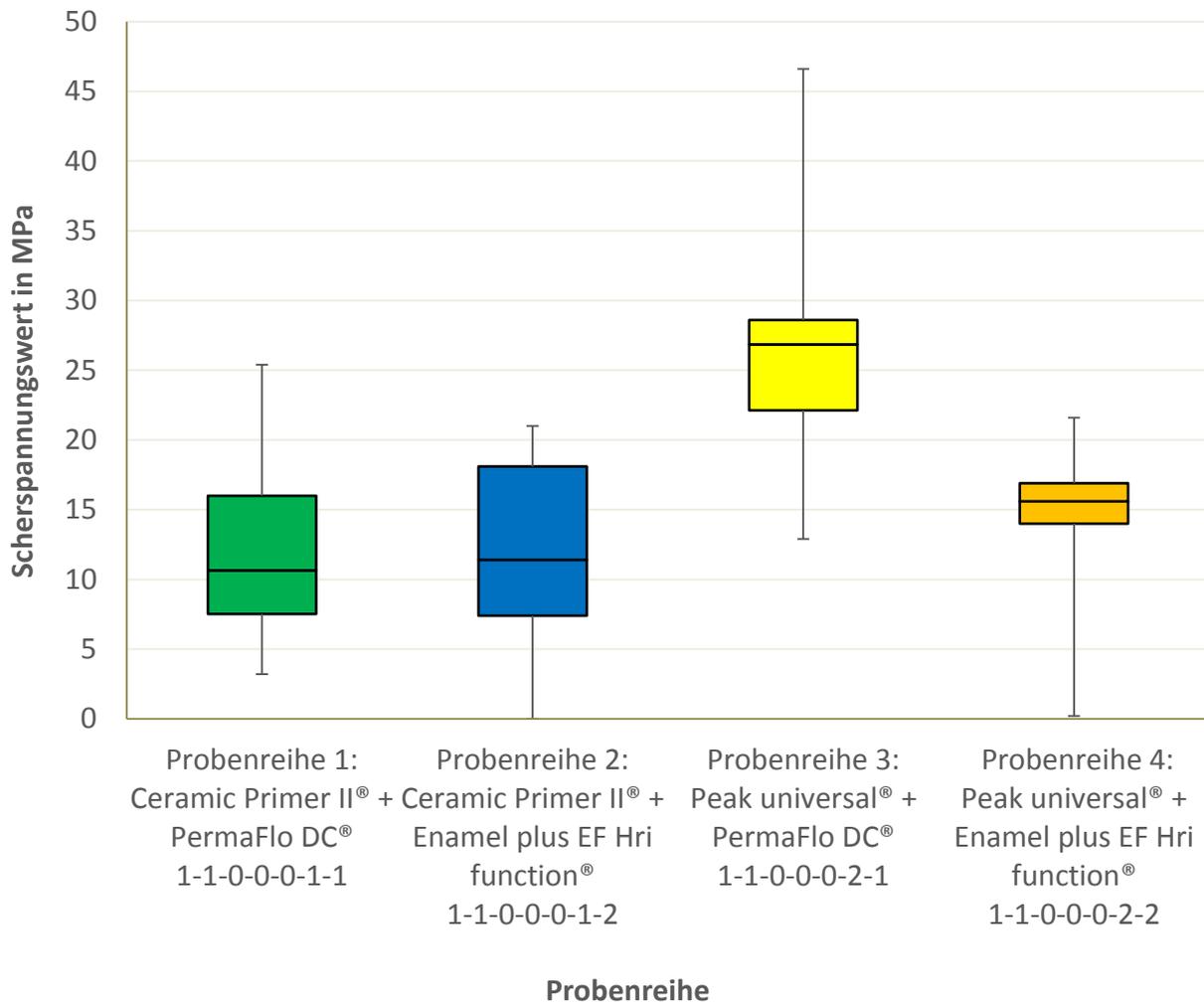


Abb. 23: Scherspannungswerte der vier Probenreihen

3.2 Frakturzonen

3.2.1 Optische Auswertung der Frakturzonen

Die Frakturzonen werden in vier Bereiche kategorisiert:

1. Die Frakturzone liegt an der Verbundfläche vor (Abb. 24 und Abb. 25), so dass die Oberfläche optisch wie eine unbelackte Oberfläche aussieht. Es ist nur teilweise oder gar nicht erkennbar, an welcher Stelle das Knöpfchen klebte, weil ein sauberes Abscheren des Knöpfchens von der behandelten Oberfläche stattgefunden hat. Es sind folglich weder erkennbare Rückstände des Kompositknöpfchens noch Ausrisse aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen vorhanden.

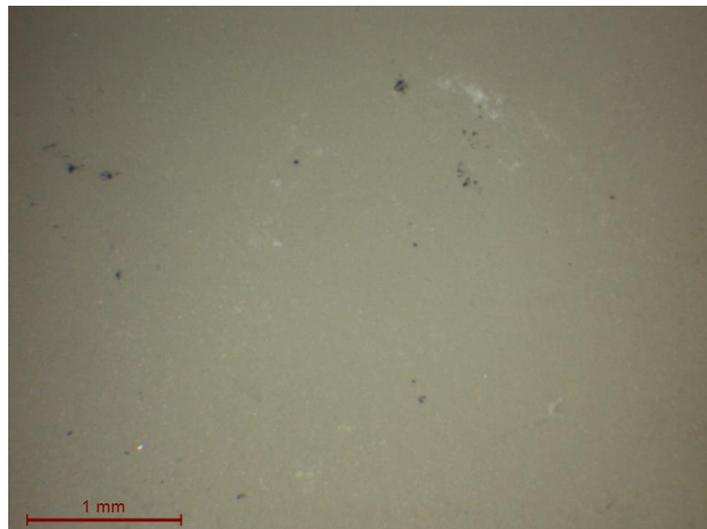


Abb. 24: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Frakturzone an der Verbundfläche (Beispielaufnahme: Probe 1100011-09)

In der 3D-Darstellung (Abb. 25) – Beispielprobe 1100011-10 – erscheint das *Cerasmart*[®]-Plättchen in seiner Oberflächenmorphologie unverändert – also ohne Erhebungen oder Vertiefungen – und lässt keine Rückschlüsse auf Rückstände des Kompositknöpfchens zu. Demzufolge stellt die adhäsive Klebefläche bzw. Verbundfläche zwischen dem Plättchen und dem Kompositknöpfchen den Ort des Verbundversagens dar.

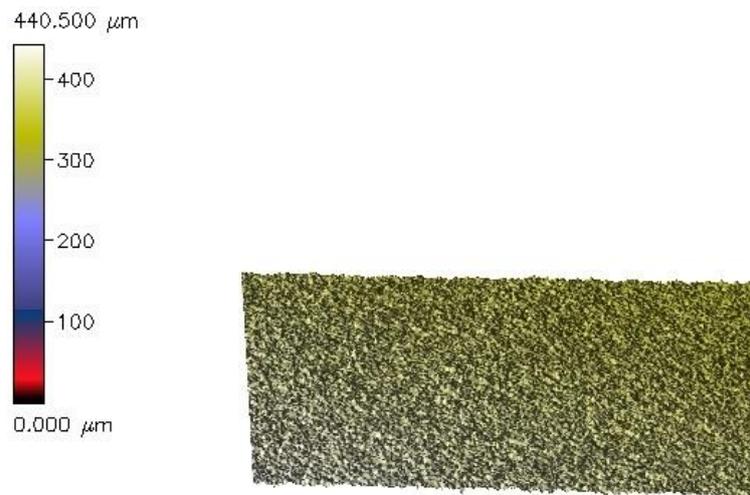


Abb. 25: 3D-Darstellung einer Frakturzone an der Verbundfläche (Beispielaufnahme: Probe 1100011-10)

2. Die Frakturzone liegt im Kompositknöpfchen vor (Abb. 26 und Abb. 27), so dass die Oberfläche des *Cerasmart*[®]-Plättchens noch Rückstände des aufgeklebten Kompositknöpfchens aufweist und die Form des Knöpfchens häufig noch erkennbar ist. In einigen Fällen bleiben Anteile des Kunststoffknöpfchens nur im Randbereich stehen, in anderen Fällen bleiben sogar noch großflächige Bereiche an Kunststoffresten zurück.

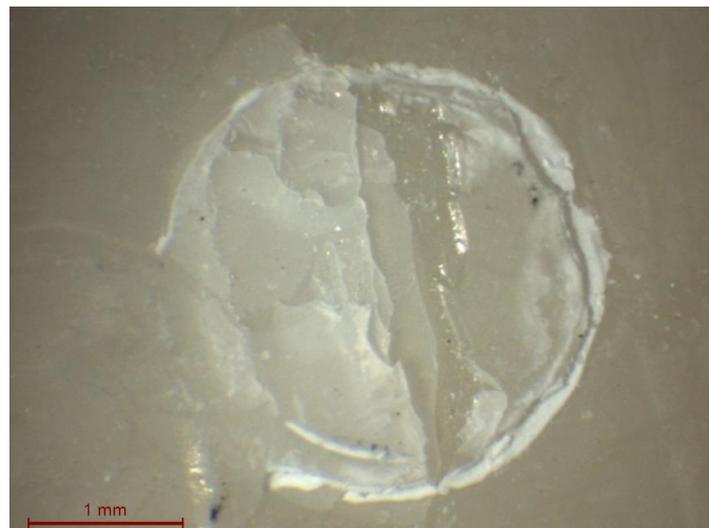


Abb. 26: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Frakturzone im Kompositknöpfchen (Beispielaufnahme: Probe 1100021-04)

In der 3D-Darstellung (Abb. 27) – Beispielprobe 1100012-01 – ist eine inhomogene Oberflächenstruktur erkennbar, die von Erhebungen durchdrungen ist, welche die Rückstände des Kompositknöpfchens darstellen. Die Ausdehnungen und Höhen differieren je nach Größe der Überreste. Wenn es zu einer Bruchstelle im Kompositknöpfchen kommt, ist der adhäsive Verbund von *Cerasmart*[®]-Plättchen und Kunststoffknöpfchen so gut, dass dieser der Scherspannung standhält und es infolgedessen zu einer Fraktur im Kompositknöpfchen kommt.

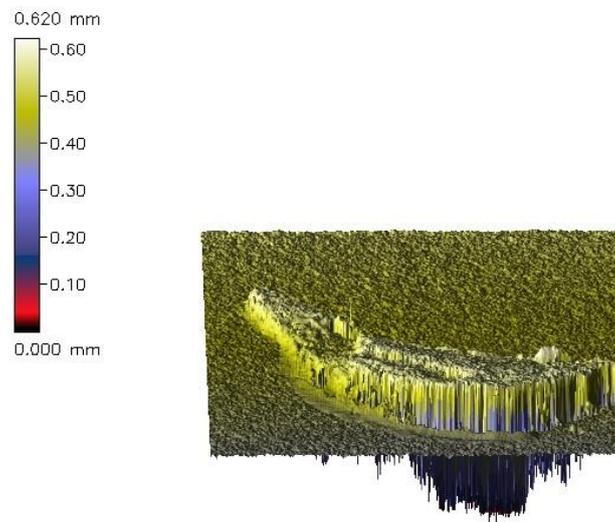


Abb. 27: 3D-Darstellung einer Frakturzone im Kompositknöpfchen (Beispielaufnahme: Probe 1100012-01)

3. Frakturzone liegt im *Cerasmart*[®]-Plättchen vor (Abb. 28 und Abb. 29), so dass es zu Ausrissen aus dem Plättchen gekommen ist. In einigen Fällen ist ein ganzes Stück des Plättchens herausgerissen, da der Verbund zwischen *Cerasmart*[®] und Kunststoffknöpfchen an dieser Stelle besonders gut gehalten hat und die adhäsive Verbundfläche unter Scherspannung nicht durchbrochen wurde. An dieser Stelle ist bei allen Proben das Kunststoffknöpfchen vollständig abgerissen, so dass es auf der Plättchenoberfläche keine Kompositrückstände mehr gibt.

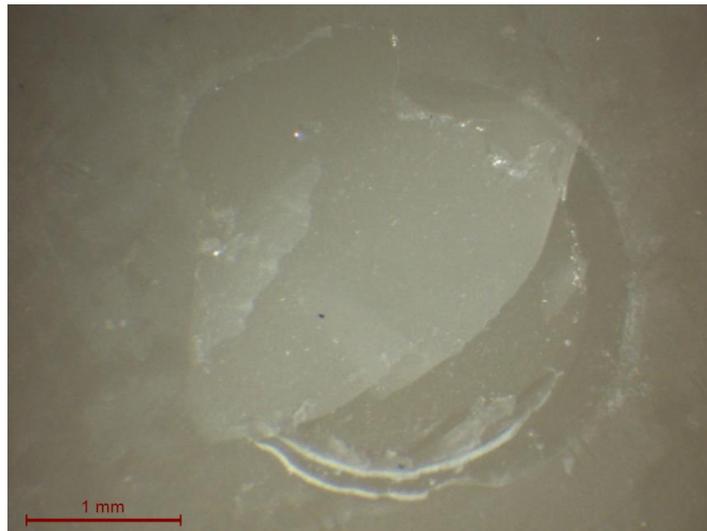


Abb. 28: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Frakturzone im *Cerasmart*[®]-Plättchen (Beispielaufnahme: Probe 1100021-02)

Auch die 3D-Darstellung (Abb. 29) – Beispielprobe 1100022-01 – zeigt, dass es in den bläulichen Bereichen zu Ausrissen aus dem Plättchen gekommen ist und infolgedessen Vertiefungen in der Materialoberfläche erkennbar sind.

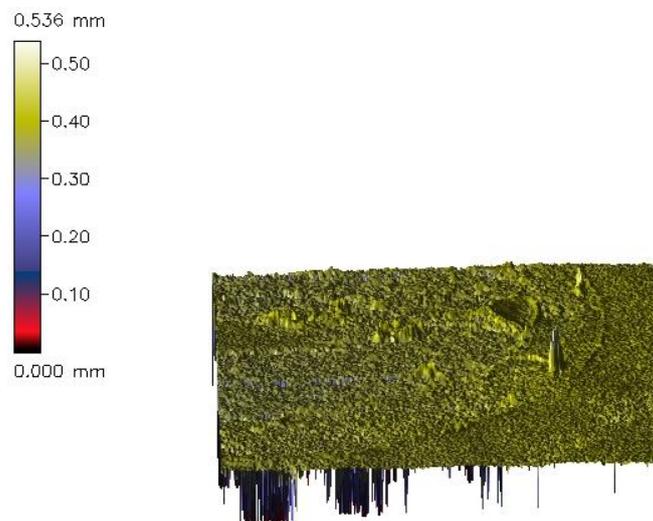


Abb. 29: 3D-Darstellung einer Frakturzone im *Cerasmart*[®]-Plättchen (Beispielaufnahme: Probe 1100022-01)

4. Die Frakturzone kann auch eine Kombination aus einer Fraktur im Kunststoffknöpfchen und einem Ausriss aus dem Plättchen darstellen (Abb. 30 und Abb. 31). Hierbei werden Stücke aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen herausgerissen und zugleich verbleiben Anteile

des Kompositknöpfchens an der Oberfläche, so dass Reste des Knöpfchens erkennbar sind.

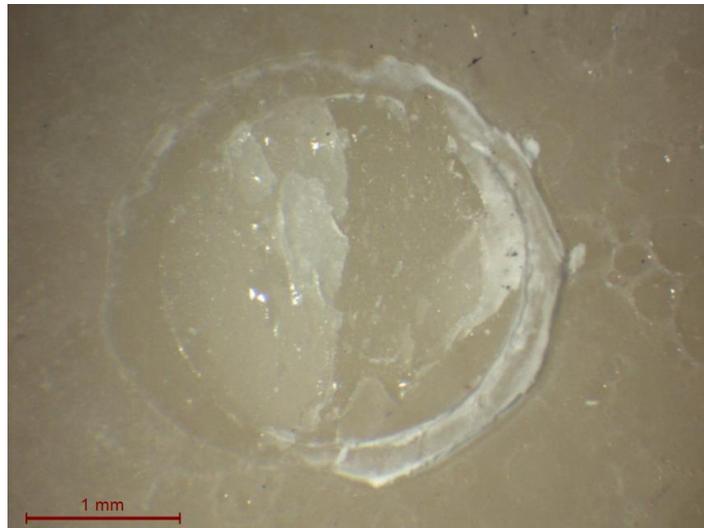


Abb. 30: Lichtmikroskopische Aufnahme einer kombinierten Frakturzone im Kompositknöpfchen sowie *Cerasmart*[®]-Plättchen (Beispielaufnahme: Probe 1100021-05)

In der 3D-Darstellung (Abb. 31) – Beispielprobe 1100022-04 – sind sowohl Rückstände des Kompositknöpfchens auf der Oberfläche sichtbar als auch Vertiefungen, welche die Ausrisse aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen widerspiegeln.

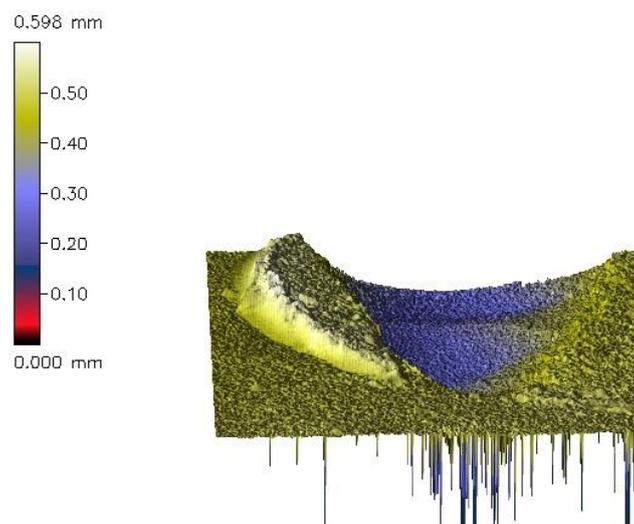


Abb. 31: 3D-Darstellung einer kombinierten Frakturzone im Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen (Beispielaufnahme: Probe 1100022-04)

3.2.2 Häufigkeit der Frakturzonen

In Tabelle 4 werden die einzelnen Proben mit ihren zugehörigen Scherspannungswerten sowie denjenigen Bereichen, in denen die Fraktur unter Scherspannung stattgefunden hat, aufgelistet. Unterhalb jeder Probenreihe werden der arithmetische Scherspannungsmittelwert sowie die Anzahl der Bruchstellen pro Frakturbereich notiert. Anschließend werden die Frakturzonen statistisch ausgewertet und grafisch visualisiert. Zunächst wird jede der vier möglichen Frakturzonen – Verbundfläche, Kompositknöpfchen, *Cerasmart*[®]-Plättchen sowie eine Kombination aus Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen – als Säulendiagramm dargestellt und ausgewertet (Abb. 33 - 36). Danach werden mögliche Frakturzonen in einem Boxplotdiagramm visualisiert (Abb. 37).

Tab. 4: Auflistung der Proben und ihre jeweiligen Frakturzonen

Probennummer	Scher- span- nungswert in MPa	Fraktur an der Verbund- fläche	Fraktur im Komposit- knöpfchen	Fraktur im Ceras- mart®- Plättchen	Fraktur im Komposit- knöpfchen und Cerasmart®- Plättchen
1100011-01	17,4				x
1100011-02	9,6		x		
1100011-03	22,4			x	
1100011-04	25,4		x		
1100011-05	11,8	x			
1100011-06	11,7	x			
1100011-07	3,5		x		
1100011-08	9,1		x		
1100011-09	3,2	x			
1100011-10	7,0	x			
Gesamtan- zahl	12,1 (Mittelwert)	4	4	1	1
1100012-01	20,6		x		
1100012-02	11,4	x			
1100012-03	11,4	x			
1100012-04	0,0	x			
1100012-05	7,4	x			
1100012-06	18,1		x		
1100012-07	11,0	x			
1100012-08	21,0		x		
1100012-09	0,0	x			
1100012-10	nicht verwendbar				
Gesamtan- zahl	11,2 (Mittelwert)	6	3	0	0
1100021-01	21,5				x
1100021-02	27,7			x	
1100021-03	12,9			x	
1100021-04	nicht messbar				x
1100021-05	27,7				x
1100021-06	46,6				x
1100021-07	26,0				x
1100021-08	30,9			x	
1100021-09	28,9				x
1100021-10	18,9			x	
Gesamtan- zahl	26,5 (Mittelwert)	0	0	4	6

1100022-01	16,1				x
1100022-02	21,6				x
1100022-03	17,2			x	
1100022-04	0,0			x	
1100022-05	0,2	x			
1100022-06	14,9			x	
1100022-07	6,5	x			
1100022-08	15,6			x	
1100022-09	14,0			x	
1100022-10	16,9			x	
Gesamtanzahl	12,3 (Mittelwert)	2	0	6	2

Keine Probe der dritten Probenreihe weist ein Verbundversagen mit einer Frakturzone an der adhäsiven Verbundfläche (Abb. 32) auf. Die vierte Probenreihe verzeichnet zwei Proben, die erste Probenreihe vier Proben und die zweite Probenreihe sogar sechs Proben mit einem adhäsiven Verbundversagen. Tritt eine Frakturzone im Bereich der adhäsiven Verbundfläche auf, weist dies darauf hin, dass hier das Adhäsivsystem der aufgewendeten Scherspannung nicht standhalten konnte. In Bezug auf die zugehörigen Scherspannungswerte fällt auf, dass keine Probe mit einer Frakturzone an der Verbundfläche den Wert von 11,8 MPa übersteigt. Daraus lässt sich ableiten, dass ein Verbundversagen an der Verbundfläche mit niedrigeren Scherspannungswerten korreliert. Da *Peak universal*[®] nur zwei Proben mit einem Verbundversagen im adhäsiven Bereich aufweist, *Ceramic Primer II*[®] jedoch insgesamt zehn Proben, lässt dies den Rückschluss zu, dass die Verwendung von *Peak universal*[®] zu einem besseren adhäsiven Verbund führt als die Verwendung von *Ceramic Primer II*[®]. Darüber hinaus können erste Rückschlüsse auf die verwendeten Komposite gezogen werden: Während ein Verbundversagen unter Verwendung von *PermaFlo DC*[®] viermal auftritt, kommt es unter Verwendung von *Enamel plus EF Hri function*[®] doppelt so häufig – also bei acht Proben – vor, dass dieses Komposit den schwächeren adhäsiven Verbund eingeht.

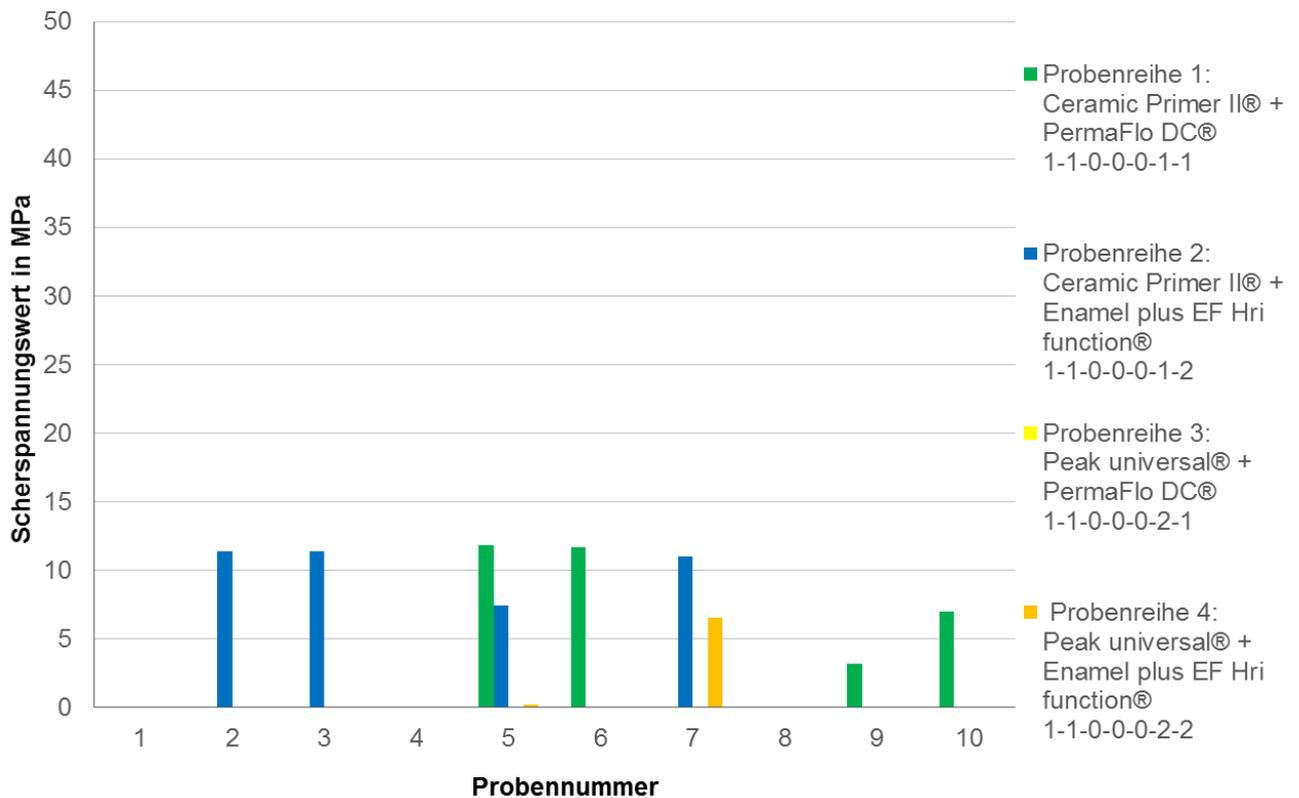


Abb. 32: Frakturzonen an der Verbundfläche

Die Häufigkeitsverteilung der Frakturzonen im Kompositknöpfchen (Abb. 33) zeigt, dass weder in der dritten noch in der vierten Probenreihe Frakturzonen im Kompositknöpfchen auftauchen, sondern die erste Probenreihe vier und die zweite Probenreihe drei Proben enthält, bei denen eine Frakturzone in diesem Bereich existiert. Die Proben mit einer Fraktur im Kompositknöpfchen weisen deutlich höhere Scherspannungswerte auf als die Proben mit einem Versagen an der adhäsiven Verbundfläche. Der kleinste Wert liegt bei 3,2 MPa und der größte Wert bei 25,4 MPa. Die Kompositknöpfchen aus *Enamel plus EF Hri function*® brechen erst bei Scherspannungswerten über 15,0 MPa, während bei den Kompositknöpfchen aus *PermaFlo DC*® bereits bei weitaus niedrigeren Werten von beispielsweise 3,2 MPa ein Bruch im Knöpfchen zu verzeichnen ist. Zudem ist auffällig, dass die Verwendung von *Peak universal*® zu keiner einzigen singulären Fraktur im Kunststoffknöpfchen führt. Aus dem Vorhergehenden ist ersichtlich, dass im Vergleich zu einer Fraktur der Verbundfläche höhere Scherspannungswerte notwendig sind, um eine Fraktur im Kompositknöpfchen auszulösen.

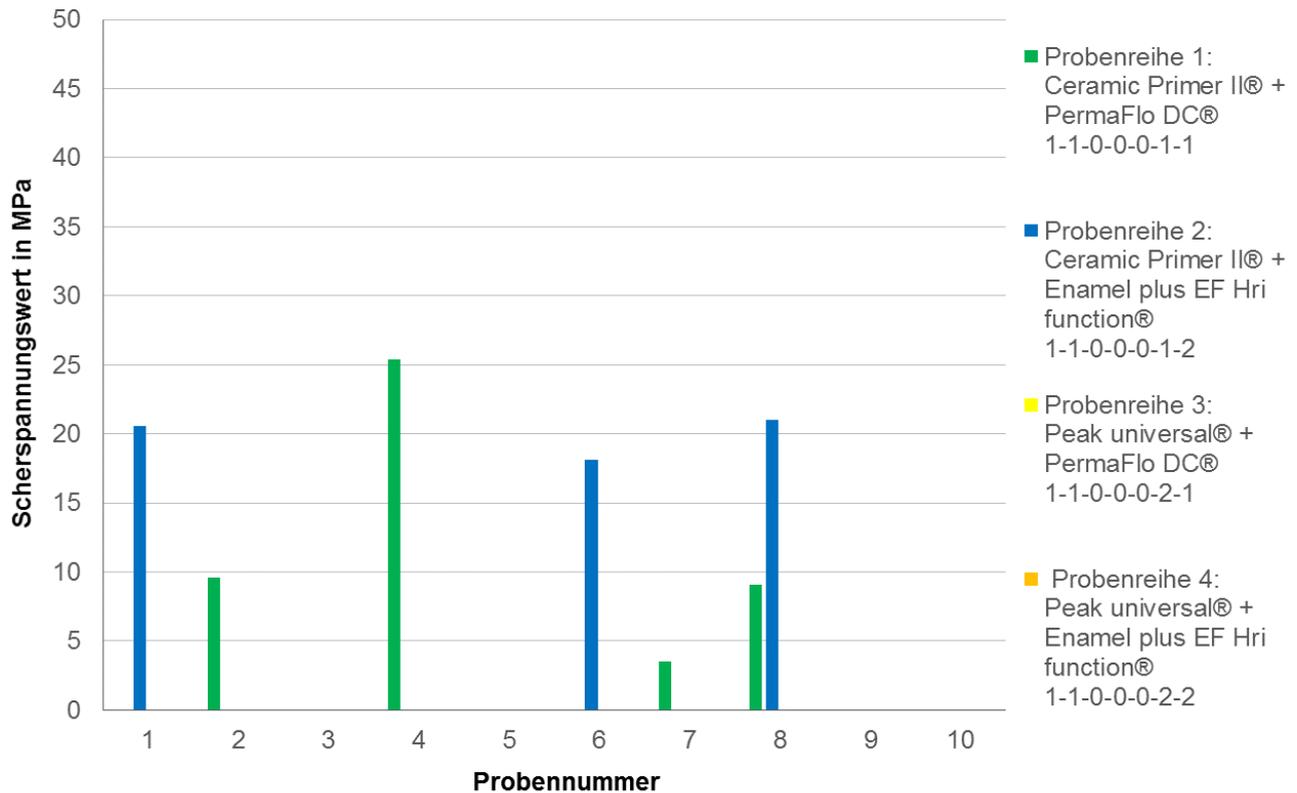


Abb. 33: Frakturzonen im Kompositknöpfchen

Abbildung 34 zeigt die Proben, die eine Frakturzone im *Cerasmart*[®]-Plättchen aufweisen. Die zweite Probenreihe enthält keine Probe mit einer Fraktur in diesem Bereich und die erste Probenreihe eine einzige Probe. Besonders häufig kommt es in der vierten Probenreihe – bei insgesamt sechs Proben – zu Brüchen im *Cerasmart*[®]-Plättchen. Die dritte Probenreihe weist vier Proben auf, bei denen das Plättchen bricht. Bezüglich der Scherspannungswerte fällt auf, dass diese alle über 12,0 MPa liegen und zum Teil sogar weitaus höher. Daraus lässt sich ableiten, dass, bis auf eine Ausnahme, nur Proben, die mit *Peak universal*[®] vorbehandelt wurden, unter der aufgewendeten Scherspannung für einen Ausriss aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen sorgen und die Werte der Scherspannung vergleichsweise höher als die Werte der Probenreihen mit Frakturzonen an der adhäsiven Verbundfläche oder dem Kompositknöpfchen liegen.

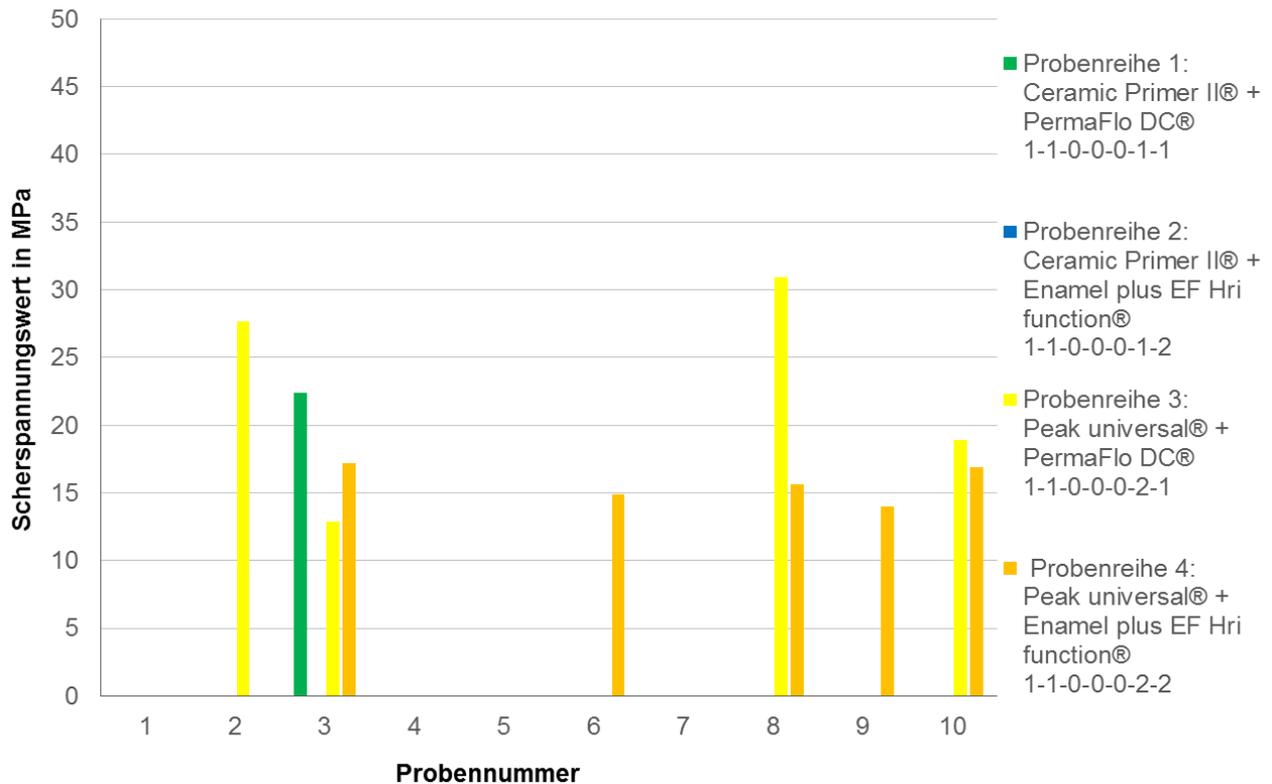


Abb. 34: Frakturzonen im *Cerasmart*[®]-Plättchen

Die Betrachtung der Frakturzonen, die eine Kombination von Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen (Abb. 35) darstellen, zeigt, dass – wie zuvor bei einer Fraktur im *Cerasmart*[®]-Plättchen – die zweite Probenreihe keine Probe mit einer kombinierten Fraktur aufweist und die erste Probenreihe eine einzelne Probe. In der vierten Probenreihe gibt es vier Proben und der dritten Probenreihe sechs Proben, bei denen unter Scherspannung diese kombinierte Art der Fraktur hervorgerufen wird. Alle Proben mit einer kombinierten Frakturzone zeigen, dass die Scherspannungswerte jeweils deutlich über 15,0 MPa liegen. Die Häufigkeitsverteilung verdeutlicht, dass nur eine Probe mit *Ceramic Primer II*[®], jedoch acht Proben mit *Peak universal*[®] behandelt worden sind. Von diesen neun Proben besaßen sechs Proben ein Kompositknöpfchen aus *PermaFlo DC*[®] und drei Proben ein Knöpfchen aus *Enamel plus EF Hri function*[®]. Daraus lässt sich ableiten, dass *Peak universal*[®] einen besonders haltbaren adhäsiven Verbund zu *PermaFlo DC*[®] eingeht und dass bei dieser Kombination sehr hohe Scherspannungswerte notwendig sind, um das Knöpfchen abzulösen bzw. dieser

Verbund gar nicht durchbrochen wird, da es gleichzeitig zu einem Ausriss im Plättchen und einer Fraktur im Kunststoffknöpfchen kommt.

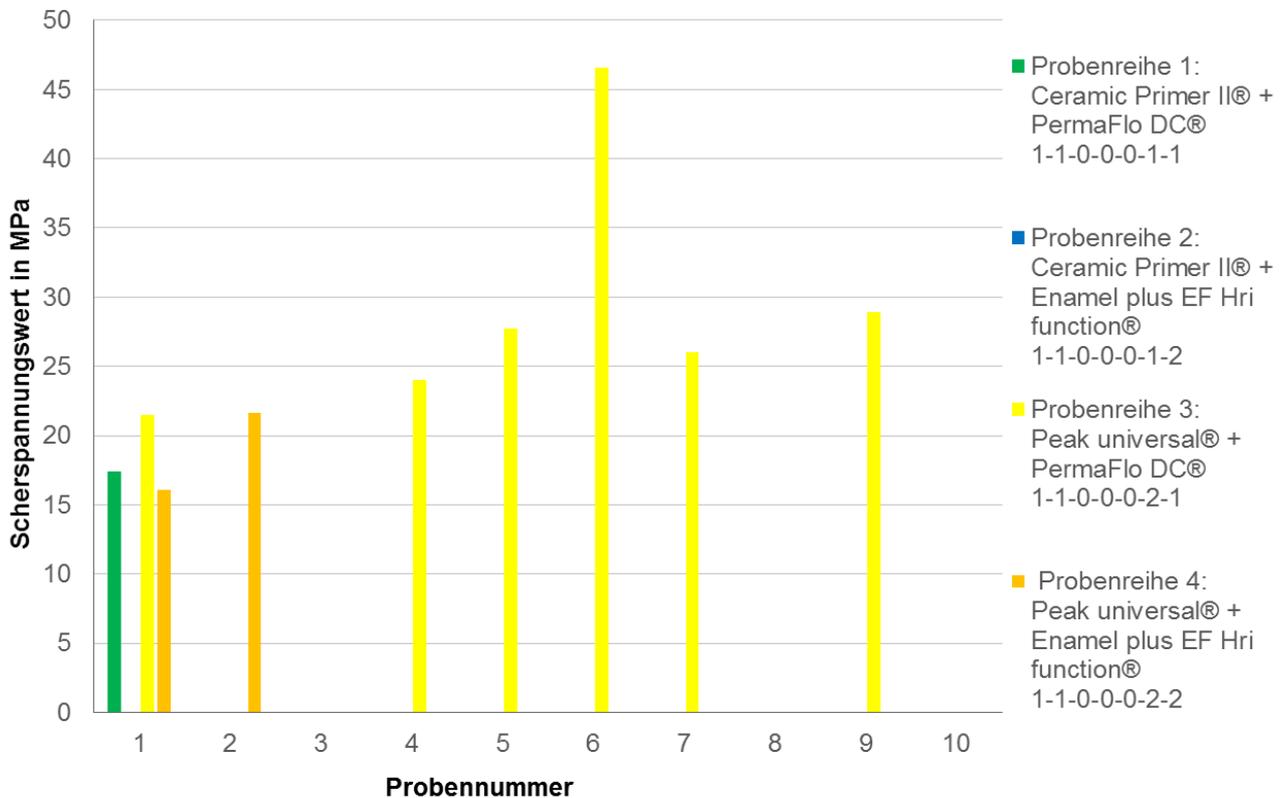


Abb. 35: Kombinierte Frakturzonen im Kompositknöpfchen und *Cerasmart*®-Plättchen

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die höchsten Scherspannungswerte mit einer kombinierten Frakturzone im Kompositknöpfchen und *Cerasmart*®-Plättchen korrelieren. Niedrige Verbundwerte gehen in der Regel mit einem Verbundversagen im Bereich der adhäsiven Verbundfläche einher, so dass bei diesen Proben kaum oder gar keine Kunststoffüberreste zu verzeichnen sind und keine *Cerasmart*®-Anteile ausbrechen.

Eine Besonderheit stellt die bereits zuvor erwähnte Probe 1100022-04 dar, welche in der mikroskopischen und profilometrischen Betrachtung einen deutlichen Ausriss aus dem *Cerasmart*® zeigt, von der Maschine jedoch kein Scherspannungswert gemessen wurde. Somit ist diese Probe – wie bereits in der Auswertung zu den Scherspannungswerten aufgezeigt (vgl. 3.1) – auszusortieren.

Besonders hervorzuheben ist die Beobachtung, dass bei der Vorbehandlung mit *Peak universal*[®] – mit Ausnahme der niedrigen MPa-Werten der beiden Proben 1100022-05 und 1100022-07– immer ein Ausbruch aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen stattgefunden hat.

Die Visualisierung der Frakturzonen im Boxplotdiagramm (Abb. 36) zeigt, dass die Fraktur an der adhäsiven Verbundfläche mit niedrigen Scherspannungswerten zwischen 0 MPa und 11,8 MPa einhergeht. Findet eine Fraktur singulär im Kompositknöpfchen statt, so liegen die Scherspannungswerte zwischen 3,5 MPa und 25,4 MPa. Frakturzonen, die hingegen im *Cerasmart*[®]-Plättchen auftreten, weisen Scherspannungswerte zwischen 12,9 MPa und 30,9 MPa auf. Kombinierte Frakturstelle aus Kunststoffknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen rufen sogar Scherspannungswerte hervor, die zwischen 16,1 MPa und 46,6 MPa liegen.

Ein Vergleich der Mediane der vier Arten an Frakturzonen verdeutlicht, dass der Wert bei einer Bruchstelle an der adhäsiven Verbundfläche bei 7,2 MPa liegt, der Wert der Fraktur im Kompositknöpfchen bei 18,1 MPa, der Wert der Fraktur im *Cerasmart*[®]-Plättchen bei 17,1 MPa und der Wert für die Kombination aus Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen sogar bei 24,0 MPa. Dass der Median bei einer Fraktur im Kunststoffknöpfchen leicht über dem Wert einer Fraktur im *Cerasmart*[®]-Plättchen liegt, resultiert trotz eines niedrigeren Minimal- sowie Maximalwertes aus der geringen Streuung bei den Proben mit Frakturen im *Cerasmart*[®]-Plättchen. Insgesamt stellt den besten und haltbarsten Verbund eine kombinierte Frakturzone aus Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen dar, die mit den höchsten erzielten Scherspannungswerten korreliert.

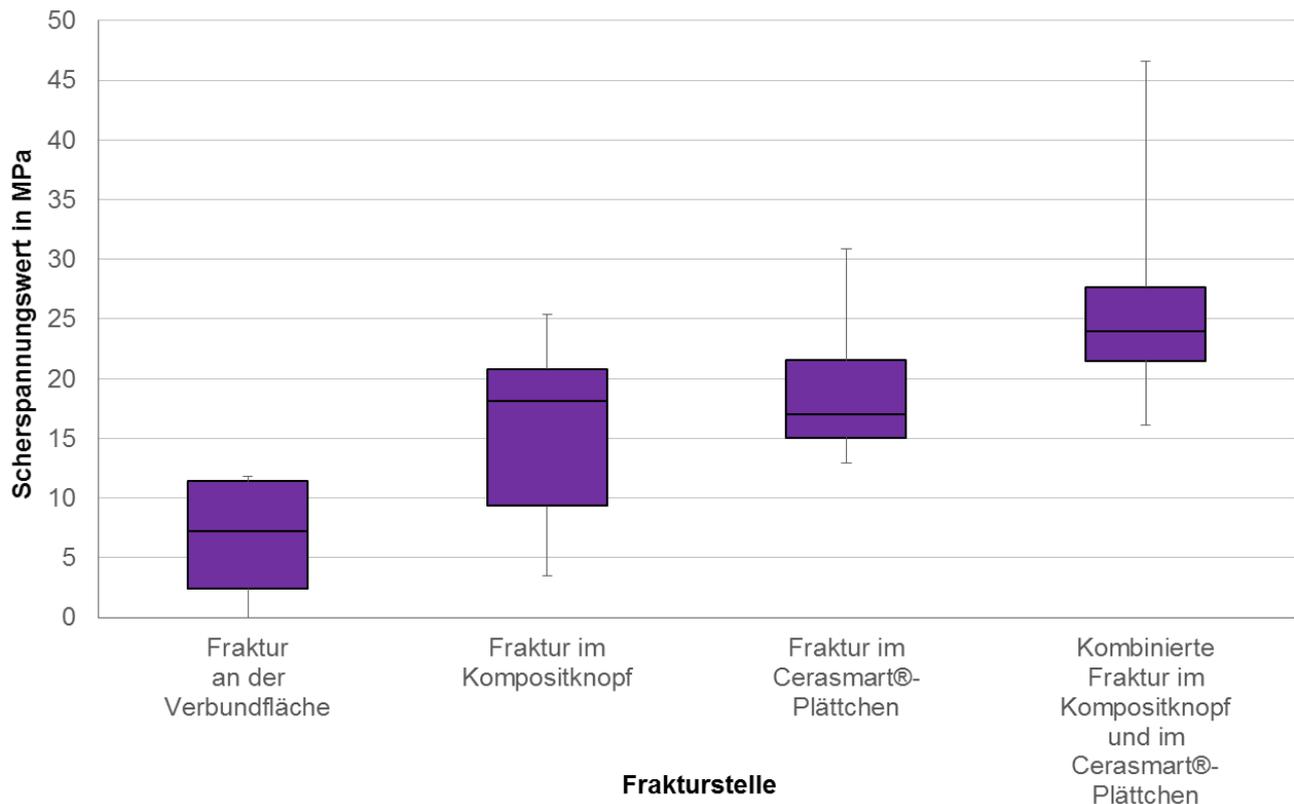


Abb. 36: Vier Arten an Frakturzonen in Relation zu den Scherspannungswerten

3.3 Rauheit

Jede Probe wird einzeln profilometrisch betrachtet. Dabei wird ein Rauheitsprofil erhoben, um eine Aussage über die Oberflächenstruktur des Probenkörpers treffen zu können.

Rauheit bezeichnet eine Größe, um die Oberflächenmorphologie von Materialien zu analysieren. Sie wird in μm gemessen und liefert verschiedene Parameter, nach denen die Oberfläche beurteilt werden kann. R_a umfasst das arithmetische Mittel aus allen Werten des Rauheitsprofils und wird auch als Mittenrauwert bezeichnet. Der zweite Parameter R_z setzt sich aus vielen R_{zi} – die Summe der größten Profilsitzen und Profiltäler einer Einzelmessstelle – umfasst aufeinanderfolgende und arithmetisch gemittelte Einzelmessstellen. R_{max} bezeichnet die größte Rautiefe innerhalb des gesamten Messbereichs. (Mahr GmbH, 1999).

Zu Beginn wird das Rauheitsprofil einer Leerprobe untersucht. Die Leerprobe umfasst ein *Cerasmart*®-Plättchen, welches weder gesandstrahlt noch mit einem Adhäsivsystem

vorbehandelt wurde. Anschließend wird bei einer weiteren Aufnahme ein *Cerasmart*[®]-Plättchen betrachtet, dessen Oberfläche gemäß den Literaturvorgaben (Lung und Matinlinna, 2012) gesandstrahlt wurde. Auf diese Weise kann aufgrund des Rauheitsprofils eine Aussage zu der Materialoberfläche von *Cerasmart*[®] sowohl vor als auch nach dem Sandstrahlen getroffen werden. Da alle Proben der vier Probenreihen gesandstrahlt wurden, lässt sich das beobachtete Ergebnis dieser Leerprobe auf die Oberflächen aller 40 Proben übertragen, weshalb diese Auswertung einmalig zu Beginn erhoben wurde. Tabelle 5 zeigt das Rauheitsprofil unbehandelten Leerprobe und der gesandstrahlten Leerprobe. Sowohl der arithmetische Mittenrauwert R_a als auch die größten Profilsitzen und -täler R_z sowie die größte Rautiefe R_{max} lassen aufgrund der kleiner gewordenen Werte des Rauheitsprofils erkennen, dass das Sandstrahlen eines *Cerasmart*[®]-Plättchens zu einer Homogenisierung bzw. einem Glätten seiner Oberfläche führt. Dies bedeutet, dass das Oberflächenprofil des *Cerasmart*[®]-Plättchens durch Sandstrahlen vorab geebnet wird und demnach zu einem Ausgleich von Profilsitzen und -tälern führt.

Tab. 5: Rauheitsprofile der unbehandelten Leerprobe und gesandstrahlten Leerprobe

Probe	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	$R_{max}/\mu\text{m}$
Unbehandelte Leerprobe	1,59	32,74	37,40
Gesandstrahlte Leerprobe	1,25	14,54	14,90

Das für eine gesandstrahlte Oberfläche charakteristische Rauheitsprofil ist auf der profilometrischen Aufnahme des Referenzprofils der Probe 1100012-09 (Abb. 37) sehr gut zu erkennen: Das Profil weist eine gleichmäßige Körnung in der Oberflächenbeschaffenheit auf, welche eine gesandstrahlte Oberfläche auszeichnet.

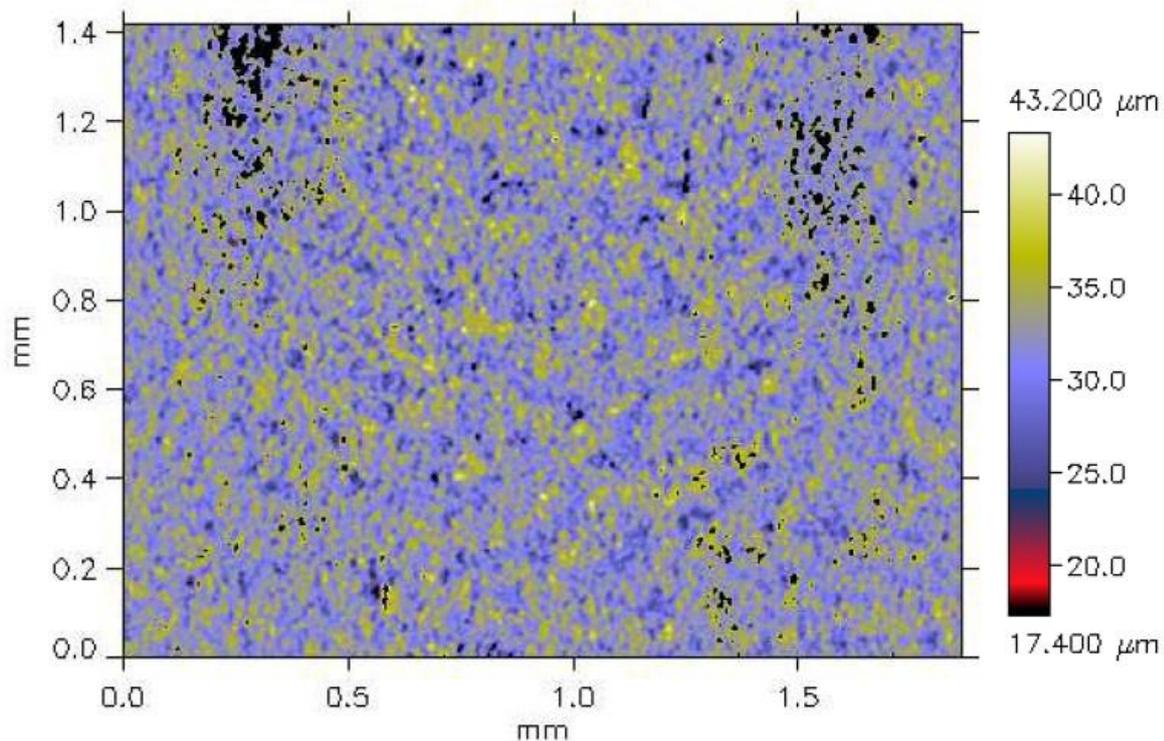


Abb. 37: Profilometrische Aufnahme einer gesandstrahlten Oberfläche (Beispielprobe: 1100012-09ref)

Das Rauheitsprofil jeder Probe wird dahingehend betrachtet, ob im Referenzprofil hohe arithmetische Mittenrauwerte R_a bzw. Rauspitzen und -täler R_z erkennbar sind. Treten arithmetische Mittenrauwerte über $2,1 \mu\text{m}$ auf, wird die Oberflächenmorphologie der jeweiligen Probe auf Bearbeitungsspuren oder ein unebenes Einbetten des Plättchens untersucht. Da regelmäßige Spuren für eine gesandstrahlte Oberfläche nicht charakteristisch sind, können gleichmäßige Rillen- oder Riefenbildungen im Rauheitsprofil einen Hinweis auf Bearbeitungsspuren liefern (Abb. 38). Da die Proben 1100021-06ref und 1100022-04ref deutlich erkennbare Sägespuren aufweisen, werden diese beiden Proben aussortiert. Bei allen anderen Proben sind hinsichtlich der Rauheitsprofile keine Hinweise auf Bearbeitungsspuren gegeben.

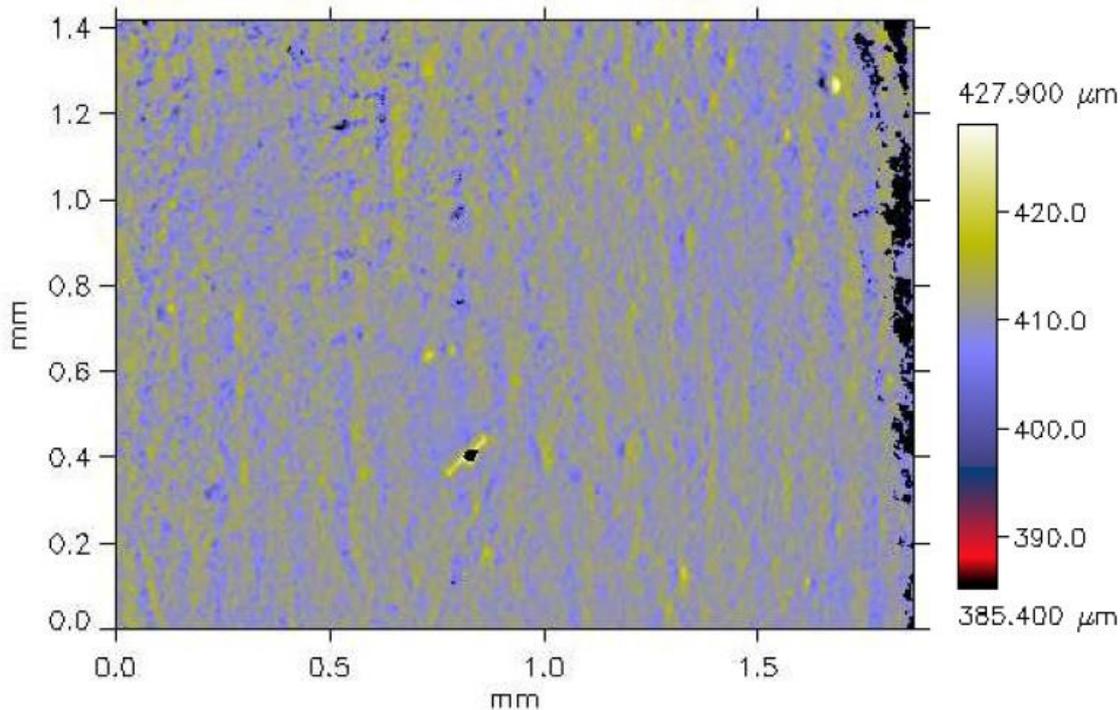


Abb. 38: Profilmetrische Aufnahme einer Oberfläche mit Bearbeitungsspuren (Beispielprobe: 1100021-06ref)

Die nachfolgende Tabelle (Tab. 6) listet von jeder Probe den Mittenrauwert R_a , die größten Profilsitzen und -täler R_z sowie die größte Rauhtiefe R_{max} auf. Für jede Probenreihe werden zudem der arithmetische Mittelwert sowie die Standardabweichung erhoben: Bei einem Vergleich der Mittelwerte fällt auf, dass die beiden Probenreihen, welche mit *Ceramic Primer II*[®] vorbehandelt wurden, mit 1,98 μm bzw. 2,00 μm höhere R_a -Mittelwerte besitzen als die beiden Probenreihen, welche mit dem Adhäsivsystem *Peak universal*[®] vorbehandelt wurden und Mittelwerte von 1,86 μm und 1,77 μm aufweisen. In Anbetracht des zuvor ermittelten R_a -Wertes einer gesandstrahlten Leerprobe von 1,25 μm lässt sich ableiten, dass durch die Vorbehandlung mit einem Adhäsivsystem bei allen Proben eine veränderte Oberfläche entsteht, die sich durch höhere Werte im Rauheitsprofil auszeichnet. Infolgedessen weisen diejenigen Probenreihen mit einer Vorbehandlung mit *Ceramic Primer II*[®] eine stärkere Oberflächenveränderung auf als die beiden Probenreihen, welche mit *Peak universal*[®] vorbehandelt wurden. Wird der Korrelationskoeffizient zwischen der größten Rautiefe R_{max} und den zugehörigen Scherspannungswerten ermittelt, so lässt sich bezüglich des Rauheitsprofils für keine der vier Probenreihen eine Abhängigkeit dieser beiden

Parameter voneinander erkennen. Folglich können aufgrund der Oberflächenmorphologie des *Cerasmart*[®]-Plättchens keine Rückschlüsse auf einen Zusammenhang zur Scherspannung bzw. einen entsprechenden Verbund gezogen werden.

Tab. 6: Rauheitswerte für die Referenzwerte der Proben aller Probenreihen

Probenreihe 1: 1100011-				
Probennummer	R_a /μm	R_z /μm	R_{max} /μm	Scherspannungswerte
01	1,84	27,78	29,70	17,4
02	1,93	29,62	37,10	9,6
03	1,89	26,04	30,30	22,4
04	2,05	37,98	41,90	25,4
05	2,19	28,72	31,60	11,8
06	2,04	31,08	36,50	11,7
07	1,71	23,66	26,70	3,5
08	2,10	28,82	31,50	9,1
09	1,97	37,40	42,70	3,2
10	2,06	26,68	29,00	7,0
Mittelwert	1,98	29,78	33,70	12,1
Standardabweichung	0,13	4,41	5,25	7,1
Korrelationskoeffizient			0,09	

Probenreihe 2: 1100012-				
Probennummer	R_a /μm	R_z /μm	R_{max} /μm	Scherspannungswerte
01	1,99	38,98	41,40	20,6
02	2,08	34,22	38,70	11,4
03	1,68	19,32	20,20	11,4
04	2,08	42,90	47,40	0,0
05	1,95	23,92	25,40	7,4
06	2,02	31,56	42,20	18,1
07	1,98	28,76	31,40	11,0
08	2,12	37,72	44,90	21,0
09	2,10	27,12	28,80	0,0
10	Probe nicht verwendbar			
Mittelwert	2,00	31,61	35,60	11,2
Standardabweichung	0,13	0,13	0,13	0,1
Korrelationskoeffizient			-0,08	

Probenreihe 3: 1100021-				
Probennummer	R_a /μm	R_z /μm	R_{max} /μm	Scherspannungswerte
01	2,06	48,90	57,30	21,5
02	2,15	67,02	69,70	27,7
03	1,74	30,18	33,00	12,9
04	1,94	58,78	61,90	24,0
05	1,70	29,88	33,90	27,7
06	1,81	60,00	72,20	46,6
07	1,69	30,70	37,50	26,0
08	1,83	42,90	45,80	30,9
09	1,98	51,60	59,50	28,9
10	1,67	27,54	30,00	18,9
Mittelwert	1,86	44,75	50,08	26,5
Standardabweichung	0,15	13,21	14,42	8,0
Korrelationskoeffizient			0,09	

Probenreihe 4: 1100022-				
Probennummer	R_a /μm	R_z /μm	R_{max} /μm	Scherspannungswerte
01	1,78	53,74	60,80	16,1
02	1,33	33,18	52,90	21,6
03	1,88	26,04	28,00	17,2
04	2,23	42,00	44,70	kein Wert angezeigt
05	2,04	36,80	43,00	0,2
06	1,84	40,40	44,60	14,9
07	2,06	43,42	47,00	6,5
08	1,62	34,82	40,60	15,6
09	1,62	26,48	29,00	14,0
10	1,32	19,94	23,20	16,9
Mittelwert	1,77	35,68	41,38	13,7
Standardabweichung	0,29	9,39	11,09	6,1
Korrelationskoeffizient			-0,75	

In Abbildung 39 sind die R_a -Mittelwerte mit den jeweils zugehörigen Standardabweichungen aller vier Probenreihen in einem Säulendiagramm dargestellt. Wie zuvor erläutert, ist ersichtlich, dass die R_a -Werte unter Verwendung des Adhäsivsystems *Ceramic Primer II*[®] geringfügig höher liegen als die Werte der beiden Probenreihen, welche mit *Peak universa*[®] vorbehandelt wurden.

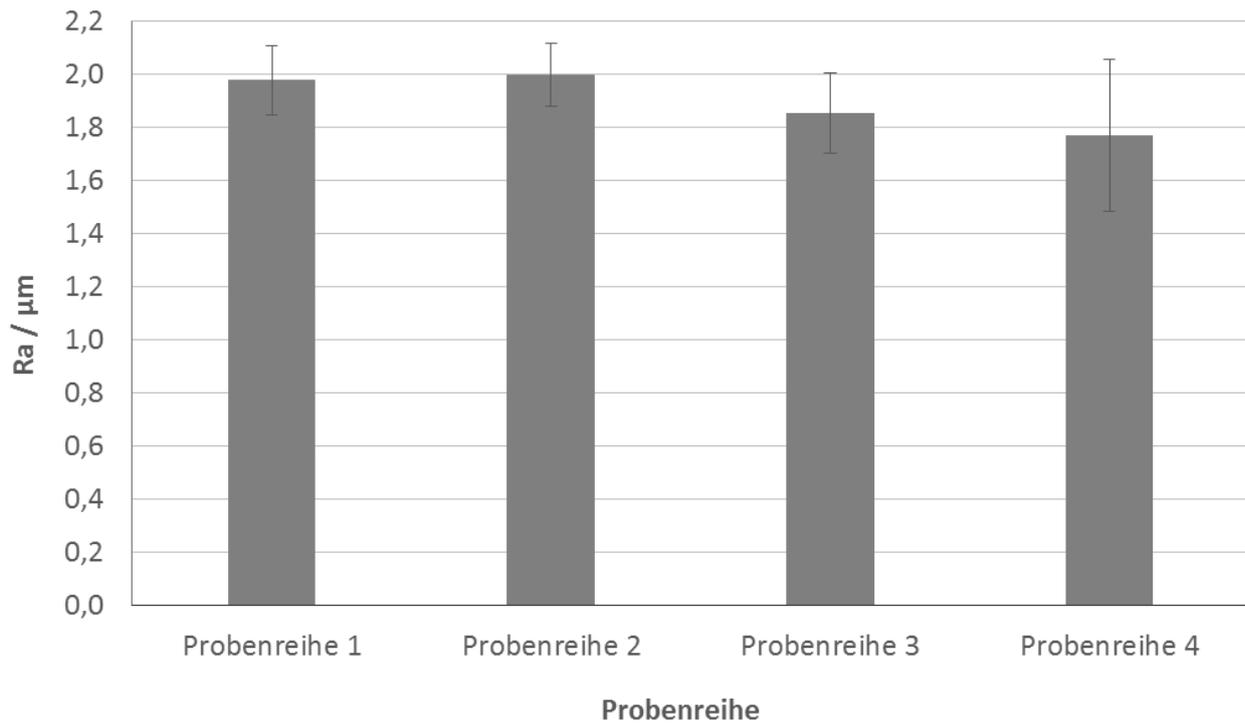


Abb. 39: R_a -Mittelwerte und Standardabweichungen der Referenzprofile der Proben aller vier Probenreihen

3.3.1 Welligkeit

Neben der Rauheit stellt die Welligkeit, die ebenfalls in μm gemessen wird, eine weitere Größe dar, um die Oberflächenbeschaffenheit von Materialien bewerten zu können. Bei der Welligkeit wird sowohl für die Referenzprofile – analog zur Rauheit – als auch für die vier Aufnahmen der Verbundstelle ein Welligkeitsprofil erstellt, welches die W_a -Mittenwelligkeitswerte, W_z - und W_{max} -Werte enthält.

Zu Beginn werden die Welligkeitsprofile der oben verwendeten unbehandelten Leerprobe sowie der ungesandstrahlten Leerprobe erhoben (Tab. 7). Analog zum Rauheitsprofil ist hier ebenfalls eine Glättung der Oberfläche erkennbar, was bedeutet, dass die Welligkeitswerte durch das Sandstrahlen kleiner bzw. homogener werden.

Tab. 7: Welligkeitsprofile der unbehandelten Leerprobe und gesandstrahlten Leerprobe

Probe	$W_a/\mu\text{m}$	$W_z/\mu\text{m}$	$W_{\text{max}}/\mu\text{m}$
Unbehandelte Leerprobe	1,53	10,12	12,90
Gesandstrahlte Leerprobe	0,65	3,48	3,90

Die Welligkeitswerte der Referenzprofile jeder Probe (Tab. 8) werden auf W_{max} -Werte über $30\ \mu\text{m}$ untersucht, woraufhin folgende Proben aussortiert werden müssen:

Probennummer 1100021-02ref, 1100021-06ref und 1100022-06ref.

Tab. 8: Welligkeitswerte der Referenzwerte aller Proben

Probenreihe 1: 1100011-			
Probennummer	$W_a / \mu\text{m}$	$W_z / \mu\text{m}$	$W_{\text{max}} / \mu\text{m}$
01	1,67	9,38	11,80
02	2,47	12,16	15,50
03	1,67	6,82	7,70
04	0,77	5,38	8,10
05	0,92	5,84	11,20
06	3,03	16,76	20,50
07	0,71	4,66	5,60
08	1,36	7,08	11,20
09	3,03	15,76	18,80
10	0,89	5,24	5,70

Probenreihe 2: 1100012-			
Probennummer	W_a / μm	W_z / μm	W_{max} / μm
01	1,23	6,84	7,70
02	2,35	11,04	15,30
03	0,50	3,10	4,30
04	4,15	18,70	23,00
05	0,90	5,38	6,30
06	3,02	17,48	24,40
07	0,84	4,34	5,10
08	0,73	4,86	7,50
09	2,48	10,28	13,00
10	Nicht verwendbar		

Probenreihe 3: 1100021-			
Probennummer	W_a / μm	W_z / μm	W_{max} / μm
01	4,19	19,68	25,20
02	4,65	20,80	30,10
03	1,69	8,12	9,10
04	3,46	16,08	22,00
05	3,02	19,24	26,00
06	2,52	18,84	34,10
07	2,46	11,96	17,80
08	1,45	6,88	7,60
09	3,72	22,14	29,20
10	1,57	8,20	9,10

Probenreihe 4: 1100022-			
Probennummer	W_a / μm	W_z / μm	W_{max} / μm
01	4,14	17,12	20,00
02	3,85	20,68	25,00
03	1,75	9,56	12,30
04	2,32	12,26	19,00
05	2,08	11,48	14,60
06	5,00	23,04	34,90
07	3,06	17,94	19,80
08	1,91	11,82	17,50
09	1,45	8,68	9,40
10	1,70	9,64	11,00

Anschließend werden die W_a-Werte der Referenzprofile einer Probe als „vorher“ und der Mittelwert der W_a-Werte aller vier Positionen (A, B, C, D) der Frakturzone als „nachher“ bezeichnet. Aus dem „vorher“- und „nachher“-Wert wird die Differenz berechnet,

woraufhin eine Aussage über die Veränderung der Oberfläche an der Frakturzone getroffen werden kann. Zudem werden der arithmetische W_a -Mittelwert, die Standardabweichung der W_a -Werte sowie der Korrelationskoeffizient aus den W_a -Differenzwerten und der Scherspannungswerte berechnet.

Bei der Auswertung der Welligkeitswerte (Tab. 9) fällt auf, dass unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®] deutlich niedrigere Mittenwelligkeitswerte auftreten als unter Verwendung von *Peak universal*[®]. Die Mittenwelligkeitswerte der Referenzprofile – „ W_a vorher“ – liegen in den ersten beiden Probenreihen bei 1,65 μm und 1,80 μm und sind somit deutlich niedriger als die Werte der dritten und vierten Probenreihe mit 2,87 μm und 2,73 μm . Diese Feststellung ist besonders ersichtlich, wenn die Mittelwerte der W_a -Differenz der Welligkeitswerte betrachtet werden: die ersten beiden Probenreihen weisen Mittelwerte der W_a -Differenz von 2,27 μm und 2,23 μm auf, die im Vergleich zur dritten und vierten Probenreihe mit 7,57 μm 27,18 μm deutlich kleiner sind. Die niedrigen Mittelwerte der W_a -Differenzwerte des *Ceramic Primer II*[®] sind in Rückbezug auf die vorherigen Ergebnisse zu den Frakturzonen (3.2) dadurch zu begründen, dass es bei insgesamt zehn von zwanzig Proben dieser beiden Probereihen – was einen Anteil von 50 % ausmacht – zu einer Frakturzone an der Verbundfläche bzw. einem adhäsiven Verbundversagen gekommen ist, so dass weder Rückstände auf der Oberfläche verblieben sind noch es zu Ausrissen aus dem *Cerasmart*[®]-Material gekommen ist. Darin liegt die gering auftretende Veränderung der Oberfläche begründet. Darüber hinaus ist auffällig, dass ebenfalls die Standardabweichung – insbesondere der W_a -Differenz – bei den beiden Probenreihen mit *Ceramic Primer II*[®] mit 3,63 μm und 2,87 μm deutlich hinter den Werten der Probenreihen mit *Peak universal*[®] mit den Werten 5,71 μm und 29,90 μm zurückbleiben. Diese Abweichungen sind vermutlich darauf zurückzuführen, dass eine größere Anzahl der Proben der Probenreihen mit *Peak universal*[®] eine Frakturzone im Kompositknöpfchen oder *Cerasmart*[®]-Plättchen oder eine kombinierte Frakturzone aufweist, so dass die Werte der Oberflächenbeschaffenheit in diesen Probenreihen stärker variieren.

Werden die Korrelationskoeffizienten aller vier Probenreihen betrachtet, so fällt unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®] eine sehr starke Korrelation zwischen den W_a -Differenzwerten und den Scherspannungswerten auf: Die Korrelationskoeffizienten für die erste Probenreihe beträgt 0,64 und für die zweite Probenreihe 0,72. Dies deutet auf

einen großen bzw. in der zweiten Probenreihe sogar auf einen sehr großen Zusammenhang hin. Werden diesen beiden Werten die Korrelationskoeffizienten der dritten und vierten Probenreihe mit 0,41 und 0,30 gegenübergestellt, so scheint es auch bei diesen Probenreihen einen leichten Zusammenhang zu den Scherspannungswerten zu geben, der allerdings geringfügiger ausfällt als der Zusammenhang bei den ersten beiden Probenreihen.

Tab. 9: Welligkeitsprofile und Scherspannungswerte in MPa der vier Probenreihen

Probenreihe 1: 1100011-				
Probennummer	W_a / μm			Scherspannungswerte
	vorher	nachher	Differenz	
01	1,67	7,05	5,38	17,4
02	2,47	3,01	0,54	9,6
03	1,67	2,31	0,64	22,4
04	0,77	12,18	11,41	25,4
05	0,92	2,63	1,71	11,8
06	3,03	2,76	-0,27	11,7
07	0,71	4,53	3,82	3,5
08	1,36	2,83	1,47	9,1
09	3,03	1,09	-1,94	3,2
10	0,89	0,85	-0,03	7,0
Mittelwert	1,65	3,92	2,27	12,1
Standardabweichung	0,86	3,22	3,63	7,1
Korrelationskoeffizient			0,64	

Probenreihe 2: 1100012-				
Probennummer	W _a / μm			Scherspannungswerte
	vorher	nachher	Differenz	
01	1,23	8,78	7,55	20,6
02	2,35	7,06	4,72	11,4
03	0,50	0,62	0,12	11,4
04	4,15	2,14	-2,00	0,0
05	0,90	2,16	1,26	7,4
06	3,02	8,42	5,40	18,1
07	0,84	0,80	-0,04	11,0
08	0,73	3,33	2,60	21,0
09	2,48	3,78	1,30	0,0
10	Probe nicht verwendbar			
Mittelwert	1,80	4,12	2,32	11,2
Standardabweichung	1,19	2,99	2,87	7,4
Korrelationskoeffizient			0,72	

Probenreihe 3: 1100021-				
Probennummer	W _a / μm			Scherspannungswerte
	vorher	nachher	Differenz	
01	4,19	8,79	4,61	21,5
02	4,65	7,05	2,40	27,7
03	1,69	2,90	1,22	12,9
04	3,46	9,28	5,82	24,0
05	3,02	16,97	13,95	27,7
06	2,52	18,57	16,05	46,6
07	2,46	4,10	1,64	26,0
08	1,45	6,87	5,42	30,9
09	3,72	11,00	7,28	28,9
10	1,57	18,85	17,29	18,9
Mittelwert	2,87	10,44	7,57	26,5
Standardabweichung	1,07	5,52	5,71	8,4
Korrelationskoeffizient			0,41	

Probenreihe 4: 1100022-				
Probennummer	W _a / μm			Scherspannungswerte
	vorher	nachher	Differenz	
01	4,14	14,01	9,86	16,1
02	3,85	18,00	14,15	21,6
03	1,75	4,51	2,75	17,2
04	2,32	26,37	24,05	kein Wert angezeigt
05	2,08	4,01	1,93	0,2
06	5,00	99,41	94,41	14,9
07	3,06	5,76	2,70	6,5
08	1,91	55,58	53,67	15,6
09	1,45	9,99	8,54	14,0
10	1,70	61,43	59,73	16,9
Mittelwert	2,73	29,91	27,18	13,7
Standardabweichung	1,16	30,31	29,90	6,1
Korrelationskoeffizient			0,30	

Die grafische Darstellung der W_a-Differenz-Mittelwerte und der zugehörigen Standardabweichungen der vier Probenreihen in einem Säulendiagramm (Abb. 40) zeigt, dass unter Verwendung des Adhäsivsystems *Ceramic Primer II*[®] insgesamt nur sehr niedrige Mittenwelligkeitswerte zustande kommen, die gleichzeitig mit einer niedrigen Standardabweichung korrelieren. Werden die dritte und vierte Probenreihe den beiden ersten Probenreihen gegenübergestellt, so weisen diese doppelt bzw. sogar vielfach so hohe W_a-Differenz-Mittelwerte auf, die zugleich mit einer höheren Standardabweichung einhergehen.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine Vorbehandlung mit *Peak universal*[®] die Mittenwelligkeitswerte stärker beeinflusst als eine Vorbehandlung mit *Ceramic Primer II*[®]. Eine Ursache dieses Ergebnisses liegt in der Art der Frakturzone, da sich die Plättchenoberfläche bei einem Lösen des Knöpfchens an der adhäsiven Verbundfläche – wie es unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®] häufiger als bei *Peak universal*[®] vorkommt – nicht so stark verändert wie durch Kompositrückstände oder Ausrisse aus dem Plättchen.

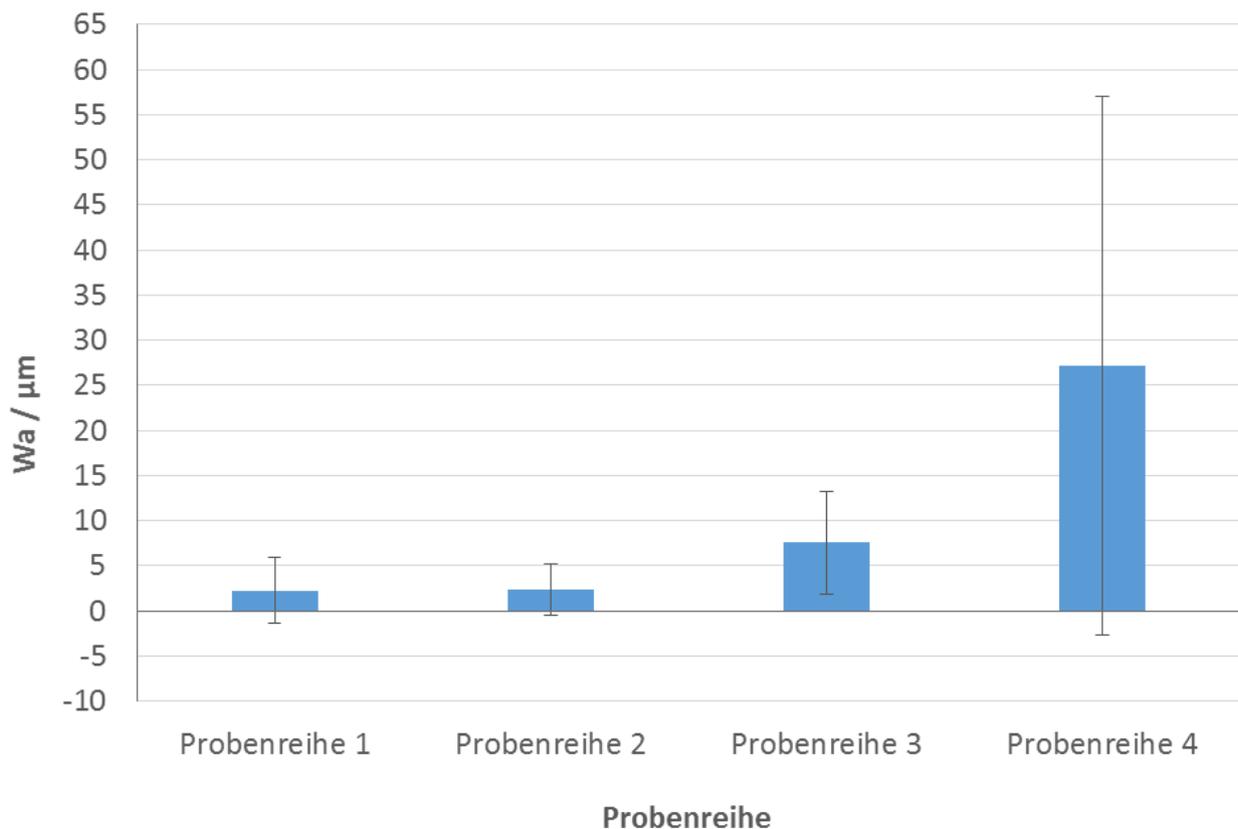


Abb. 40: W_a -Differenz-Mittelwerte und Standardabweichungen der vier Probenreihen

Die nachfolgenden Punktdiagramme (Abb. 41 - 44) zeigen die Korrelationskoeffizienten aus W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der vier Probenreihen. In die Punktdiagramme, die die zehn Proben einer Probenreihe in Punkten abbilden, wird eine Lineare gezogen. Der vorher durch Berechnungen nachgewiesene Korrelationskoeffizient ist in den Punktdiagrammen deutlich sichtbar, da sich die Werte der Proben der ersten beiden Probenreihen stärker um die Lineare gruppieren als die Werte der dritten und vierten Probenreihe.

An dieser Stelle sei der Hinweis gegeben, dass in Abb. 44 eine andere Skalierung der x-Achse verwendet wurde als bei den vorherigen drei Abbildungen, welche deutlich geringere W_a -Differenzwerte aufweisen. Dies soll vermeiden, dass die Abbildungen 41 bis 43 zu sehr verkleinert bzw. verzerrt werden.

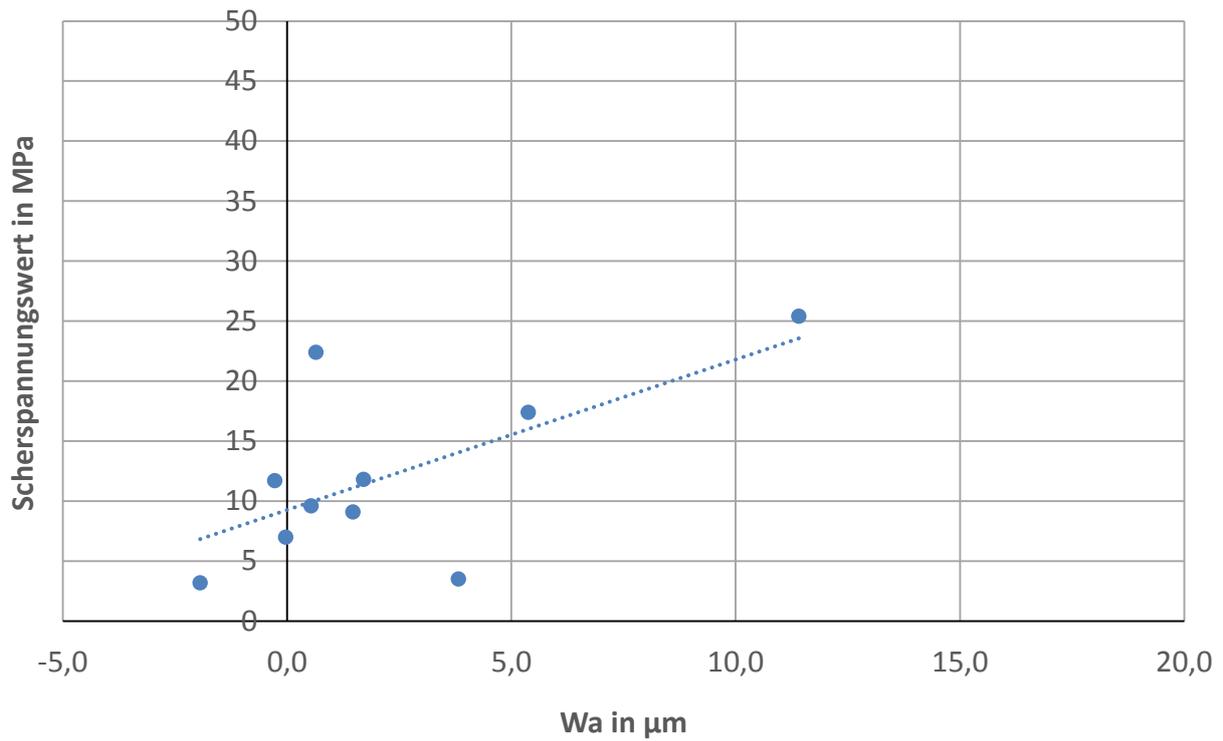


Abb. 41: Korrelationskoeffizient zwischen W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der Probenreihe 1

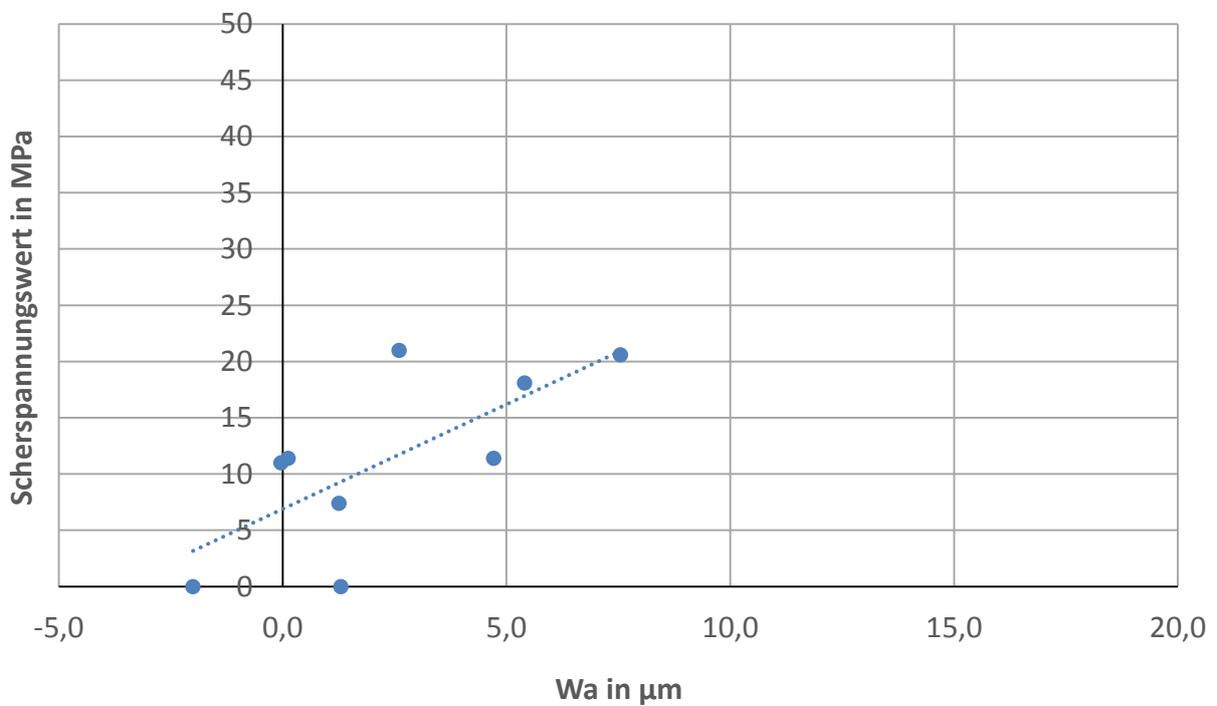


Abb. 42: Korrelationskoeffizient zwischen W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der Probenreihe 2

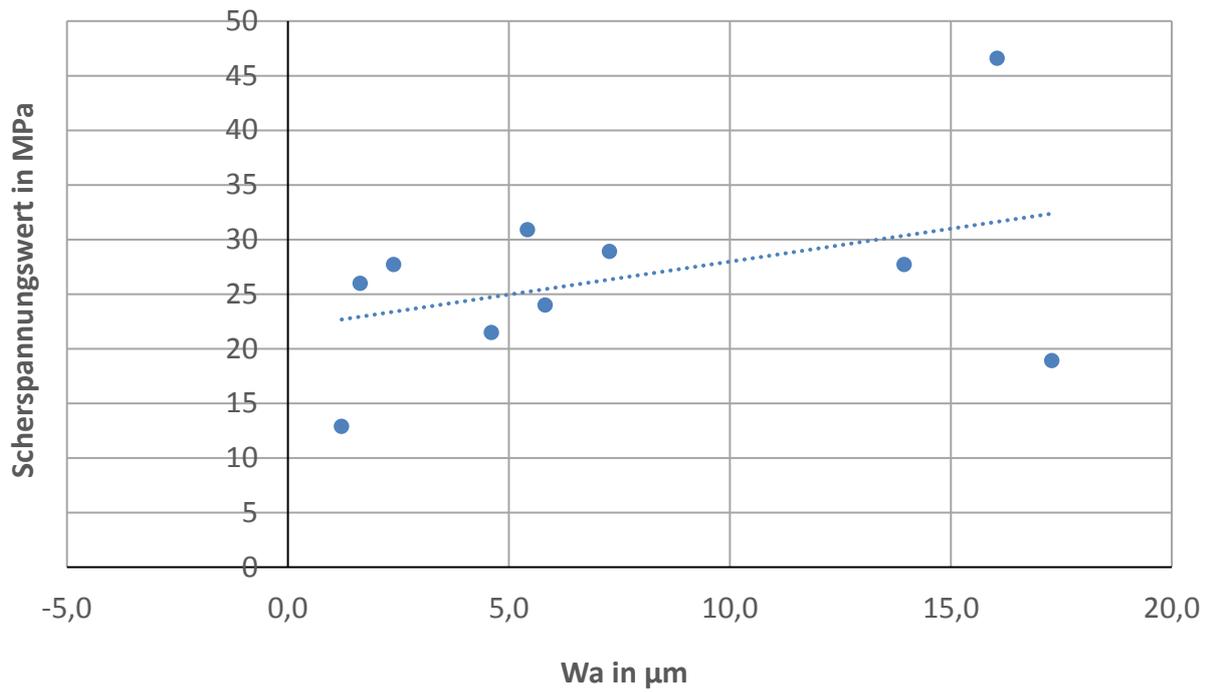


Abb. 43: Korrelationskoeffizient zwischen W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der Probenreihe 3

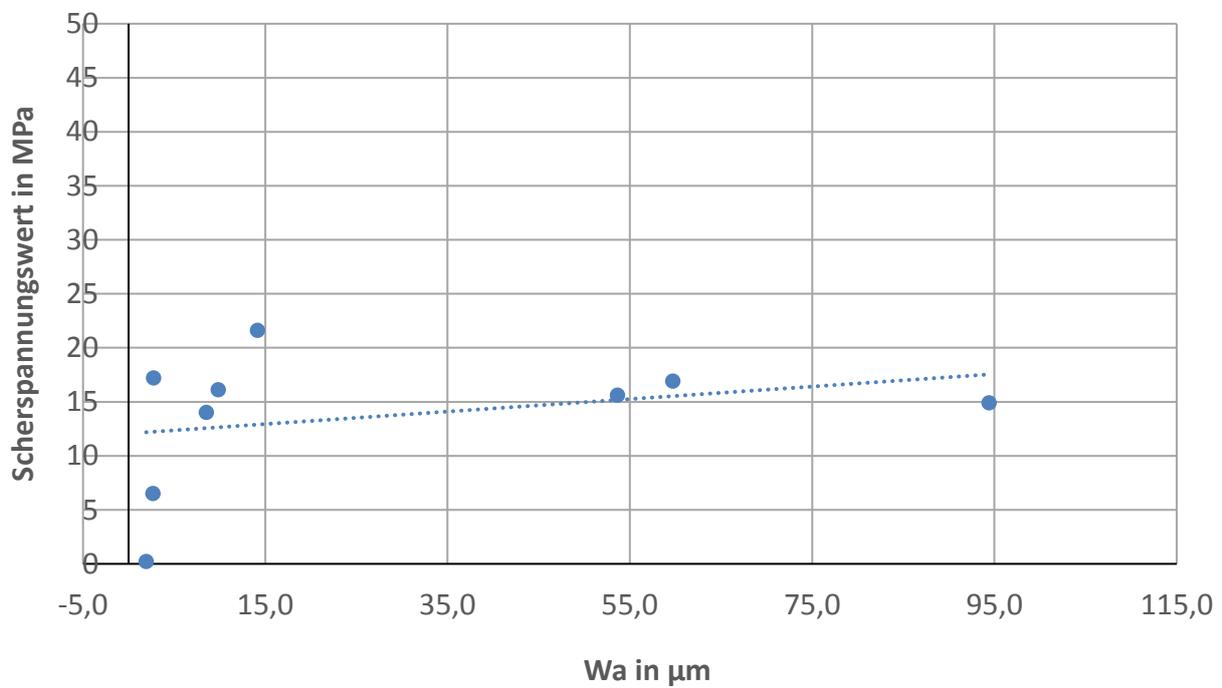


Abb. 44: Korrelationskoeffizient zwischen W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der Probenreihe 4

3.4 Vergleichende Beurteilung der Ergebnisse

Die Auswertung der Scherspannungswerte zeigt, dass das Adhäsivsystem *Peak universal*[®] aufgrund der höheren Scherspannungswerte sowie der enger zusammenliegenden zweiten und dritten Quartile besser geeignet ist als das Adhäsivsystem *Ceramic Primer II*[®]. Dabei stellt die Kombination aus *Peak universal*[®] und *PermaFlo DC*[®] eine besonders haltbare Verbindung dar, da sie sowohl im Minimal- und Maximalwert als auch im Mittelwert von den drei anderen Probenreihen abhebt. *PermaFlo DC*[®] stellt sich im Vergleich zu *Enamel plus EF Hri function*[®] in Verbindung mit beiden Adhäsivsystemen als die bessere Variante dar, weil es einerseits keine Verluste der Kompositknöpfchen und andererseits höhere Minimal- und Maximalwerte aufweist, wenngleich sich der Mittelwert der Verbindung mit *Ceramic Primer II*[®] nur marginal von dem Mittelwert der Kombination mit *Enamel plus EF Hri function*[®] unterscheidet.

Die Auswertung der Frakturzonen bestätigt vor allem, dass sich *Peak universal*[®] als das bessere Adhäsivsystem herausstellt, da dort nur bei zwei Proben eine Fraktur an der Verbundfläche stattfindet, während dies in der Verbindung mit *Ceramic Primer II*[®] bei zehn Proben der Fall ist. Dieses Ergebnis wird von der Tatsache unterstützt, dass eine Fraktur im Kunststoffknöpfchen nur in Verbindung mit *Ceramic Primer II*[®] auftritt – siebenmal – und nicht in Verbindung mit *Peak universal*[®]. Die bei den Scherspannungswerten festgestellte besonders haltbare Kombination aus *Peak universal*[®] und *PermaFlo DC*[®] wird durch die Art der Frakturzonen bestätigt, da dort ausschließlich Frakturzonen im *Cerasmart*[®]-Plättchen oder eine kombinierte Frakturzone im Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen auftauchen. Dabei ist beachtenswert, dass die Höhe der Scherspannungswerte mit der Art der Frakturzonen korreliert und eine kombinierte Fraktur im Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen in Verbindung mit den höchsten Scherspannungswerten auftritt. Dies liefert einen Nachweis dafür, dass in diesen Fällen der adhäsive Verbund zwischen Kompositknöpfchen und *Cerasmart*[®]-Plättchen besonders haltbar ist und auch unter hohen Scherspannungswerten nicht oder nur teilweise gelöst wird, weshalb dies zu Ausrissen aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen führt. Da sechs von neun kombinierten

Frakturzonen bei der Verbindung von *Peak universal*[®] und *PermaFlo DC*[®] auftreten, bestätigt dies die oben festgestellte adhäsive Verbundkraft dieser Kombination.

Hinsichtlich der Rauheitsprofile der *Cerasmart*[®]-Oberflächen kann festgestellt werden, dass beide Adhäsivsysteme zu einer veränderten Oberflächenmorphologie führen, jedoch unter Anwendung von *Peak universal*[®] das durch Sandstrahlen homogenisierte Profil des Plättchens nicht so stark verändert wird wie unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®]. Allerdings scheint kein Zusammenhang zu den ermittelten Scherspannungswerten zu bestehen: Alle Korrelationseffizienten liegen sowohl für *Ceramic Primer II*[®] als auch für *Peak universal*[®] unter 0,1 (Tab. 6). Hinsichtlich des Welligkeitsprofils fällt auf, dass *Peak universal*[®] zu höheren Welligkeitsprofilen und somit zu einer stärker veränderten Oberfläche an der Frakturzone führt als unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®]. Die Ursache liegt in Rückständen des Kompositknöpfchens und Ausrissen aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen begründet.

4. Diskussion

Der durchgeführte in-vitro-Versuch bietet die Möglichkeit, die adhäsive Verbundfestigkeit zwischen dem indirekten Restaurationsmaterial *Cerasmart*[®] und zwei Kompositen – *PermaFlo DC*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®] – nach unterschiedlicher Vorbehandlung – Sandstrahlen und *Ceramic Primer II*[®] bzw. *Peak universal*[®] – unter Exposition von Scherspannung auszuwerten und Rückschlüsse auf den idealen Verbund zu ziehen.

4.1 Diskussion der Methodik

Das gewählte Abscherverfahren der Kompositknöpfe von den *Cerasmart*[®]-Plättchen unterliegt der international anerkannten ISO-Norm 29022:2013. Das Verfahren wurde zur Überprüfung der Verbundfestigkeit von zahnärztlichen Restaurationsmaterialien mit Zahnhartsubstanz entwickelt. Bereits in der ISO-Zertifizierung ist eine entsprechende Modifikation aufgeführt, um dieses Verfahren bei adhäsiven Restaurationswerkstoffen anzuwenden. Grundsätzlich werden Aufbau und Anwendung des ISO-Norm-zertifizierten Verfahrens im gewählten Versuchsetting der vorliegenden Arbeit nicht verändert, bei dem der adhäsive Verbund nicht an Zahnhartsubstanz, sondern an indirekten Restaurationsmaterialien, die im Mund adhäsiv verklebt werden, untersucht bzw. überprüft wird. Anzumerken ist, dass das Verfahren grundsätzlich sehr „anwendungssensitiv“ ist (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013).

Der Versuchsaufbau zeichnet sich durch seine Reproduzierbarkeit und seine Übertragbarkeit auf mögliche zukünftige Versuchsreihen mit denselben oder weiteren Materialkombinationen aus. Er stellt eine zukunftsorientierte Verfahrensweise zur Ermittlung von idealen Haftverbunden zwischen indirekten Restaurationsmaterialien und Befestigungsmaterialien dar und bietet die Möglichkeit, den Versuchsaufbau durch zusätzliche Vorbehandlungsmethoden zu verändern bzw. zu erweitern und aufgrund der festgelegten Codierung miteinander zu vergleichen. Das gemäß der Literatur durchgeführte Thermocycling sorgt dafür, dass die Situation im Mund simuliert wird.

4.2 Diskussion der Vorbehandlung und Materialien

Das Einkleben von indirekten Restaurationen besitzt einen erheblichen Einfluss auf die klinische Haltbarkeit und den Langzeiterfolg der Restauration. Dabei sind je nach CAD/CAM-Material unterschiedliche Oberflächenbehandlungen erforderlich, um die Oberfläche zu aktivieren und eine ideale Befestigung zu ermöglichen (Strasser et al., 2018). Die adhäsive Verbundfestigkeit von CAD/CAM-Materialien und lighthärtenden Kompositen hängt stark von der Oberflächenbehandlung ab (Peumanns et al., 2016). Die Oberflächen von Restaurationen werden vorbehandelt, um eine rauere Materialoberfläche sowie eine höhere Oberflächenenergie zu erzeugen (Lung und Matinlinna, 2012). Dadurch werden Mikroporen geschaffen, die eine bessere Infiltration von Silanen oder Zementen erlauben (Matinlinna et al., 2007). Die Erhöhung der Oberflächenspannung führt infolgedessen zu einer besseren Benetzung mit Bonding (Lung und Matinlinna, 2012). Das Ziel einer jeden Vorbehandlung ist es, die drei nachfolgenden Voraussetzungen zu schaffen, um eine ideale Haftung zu erreichen: Eine saubere Oberfläche, eine raue Oberfläche und eine gute Benetzbarkeit. In der vorliegenden Untersuchung wird die Oberfläche ausschließlich gesandstrahlt. Zu weiteren Vorbehandlungsmethoden sollten weiterführende Untersuchungen angeschlossen werden.

4.2.1 Sandstrahlen und Anätzen der Oberfläche

Eine Studie von Tekçe et al. (2018) zeigte aufgrund unterschiedlicher verwendeter Stärken des Sandstrahlens, dass das Sandstrahlen mit 50 µm Al₂O₃ bei *Cerasmart*[®] zu den höchsten Verbundfestigkeiten führte. Die Nachbehandlung erfolgte bei allen Proben mit einer Silanisierung und dem *G-Cem LinkForce*[®]-Zement. Auch in der vorliegenden Arbeit wurde bei der Versuchsdurchführung eine retentive Oberflächenmorphologie ausschließlich durch Sandstrahlen mit 50 µm bei 1 bis 2 bar erzeugt.

Elsabaka (2014) konnte nachweisen, dass verschiedene Oberflächenvorbehandlungen zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur der Restaurationen – in diesem Fall *Lava Ultimate*[®] und *Vita Enamic*[®] – führte, so dass aufgrund der Oberflächenbehandlung materialspezifisch unterschiedliche Verbundfestigkeiten erzielt werden konnten. In dem vorliegenden Versuchssetting wird neben einer unbehandelten

Leerprobe eine gesandstrahlte Leerprobe in ihrer Oberflächenmorphologie beurteilt. Dieser Vergleich zeigt, dass es durch das Sandstrahlen auch hier zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur in Form einer Glättung der Materialoberfläche bei dem Restaurationsmaterial *Cerasmart*[®] kommt. Um eine Einflussnahme des Sandstrahlens auf die Verbundfestigkeiten nachzuweisen, müsste der vorliegende Versuchsaufbau dahingehend modifiziert werden, dass Probenreihen unter Verwendung identischer Materialien mit und ohne Sandstrahlen erfasst werden.

Auf eine Benetzung mit jeglicher Säureform als Vorbehandlung wurde verzichtet, weil zunächst grundlegende Erkenntnisse über die adhäsive Befestigung von *Cerasmart*[®] gewonnen werden sollten. Jedoch sollte auch hierzu eine eigene Untersuchung folgen.

4.2.2 Adhäsivsystem

In einem Versuch mit *Vita Enamic*[®] als Hybridkeramik konnte ein Universaladhäsiv – *Single Bond Universal*[®] – die höchsten adhäsiven Verbundwerte aufweisen (Barutçigill et al., 2019). Die Studie von Siqueira et al. (2016) konnte nachweisen, dass das Universaladhäsiv *Peak universal*[®], unabhängig vom Restaurationsmaterial, immer die höchsten Scherspannungswerte erreichen konnte. Das Ergebnis, dass ein Universaladhäsiv – *Peak universal*[®] – zu den besten adhäsiven Verbundwerten führt, kann durch die vorliegende Dissertation bestätigt werden, da die Scherspannungsmittelwerte der Probenreihen mit *Peak universal*[®] höher als die Scherspannungsmittelwerte der Probenreihen mit *Ceramic Primer II*[®] liegen. Die Auswertung der Frakturzonen sowohl unter dem Lichtmikroskop als auch unter dem Profilometer bestätigen, dass unter Verwendung von *Peak universal*[®] die höheren Scherspannungswerte entweder mit Ausrissen aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen oder mit kombinierten Frakturzonen, welche zum einen Rückstände des Komposits und zum anderen Ausbrüche aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen aufweisen, korrelieren. Auch Kömürçüoğlu et al. (2017) empfehlen als Vorbehandlung der CAD/CAM-Materialien – *Lava Ultimate*[®], *Vita Enamic*[®], *e.max CAD*[®] und *Mark II*[®] – das Auftragen eines Universaladhäsivs nach dem Sandstrahlen oder alternativ dem Anätzen mit Flusssäure. Die beschriebenen hervorragenden Verbundfestigkeiten von Universaladhäsiven kann die vorliegende Studie folglich bestätigen und unterstützen, da auch bei dem vorliegenden Versuch ein

Universaladhäsiv respektive das verwendete Universaladhäsiv *Peak universal*[®] den haltbarsten Verbund mit dem *Cerasmart*[®]-Plättchen und dem Komposit einging.

4.2.3 Komposite

Salerno et al. (2016) konnten an extrahierten, aufbereiteten Zähnen im in-vitro-Versuch nachweisen, dass die Verbundfestigkeit von *Enamel plus EF Hri function*[®] im Zugversuch zwischen 19,6 +/- 2,6 MPa lag. Eine etwas geringere Verbundfestigkeit mit Mittelwerten der zweiten und vierten Probenreihe von 11,2 MPa und 13,7 MPa konnte im Scherversuch der vorliegenden Arbeit nachgewiesen werden, jedoch nicht in Bezug auf Zahnhartsubstanz, sondern in Bezug auf das Restaurationsmaterial *Cerasmart*[®]. Eine Studie von Souza-Junior et al. (2012) zeigte, dass *PermaFlo DC*[®] – nach Vorbehandlung von Schmelz und Dentin – unter Scherbelastung eine Verbundfestigkeit zum Zahn zwischen 21,1 MPa und 23,4 MPa besitzt. Der in der vorliegenden Arbeit durchgeführte Versuch zeigt, dass *PermaFlo DC*[®] ebenfalls in Verbindung mit *Cerasmart*[®] eine höhere Verbundfestigkeit aufweist als das Komposit *Enamel plus EF Hri function*[®] in Verbindung mit *Cerasmart*[®]. Dies gilt allerdings nur für die dritte Probenreihe, die unter Verwendung von *Peak universal*[®] einen Scherspannungsmittelwert von 26,5 MPa aufweist. Die Verbindung von *PermaFlo DC*[®] in Verbindung mit *Ceramic Primer II*[®] – Probenreihe 1 – ist aufgrund des Scherspannungsmittelwertes von 12,1 MPa den Ergebnissen mit dem Komposit *Enamel plus EF Hri function*[®] vergleichbar.

4.2.4 Polymerisation

Die Polymerisation aller lichthärtenden Materialien wurde mit der LED-Polymerisationslampe *VALO*[®] durchgeführt. Sie zeichnet sich durch einen Wellenlängenbereich zwischen 395 und 480 nm aus (ZWP, 2010). Damit deckt sie ein größeres Wellenlängenspektrum als herkömmliche LED-Polymerisationslampen ab. Zudem besitzt sie eine höhere Bestrahlungsstärke als andere Lampen (Faria-E-Silva und Pfeifer, 2017) – unabhängig von der Schichtstärke der Keramik. Weiterhin weist die *VALO*[®] eine sehr homogene Polymerisation auf, so dass es zu einer ausreichenden Polymerisationstiefe im Komposit kommt und eine höhere Härte erzielt werden kann (Shimokawa et al., 2018). Durch ihren Einsatz kann im durchgeführten in-vitro-Versuch

sichergestellt werden, dass eine ausreichende Polymerisation gewährleistet ist und ein mögliches Verbundversagen nicht aufgrund einer unzureichenden Polymerisation auftritt.

4.3 Diskussion möglicher Fehlerquellen

Im Folgenden werden potenzielle Fehlerquellen erörtert, die sich durch fehleranfällige Herstellungsverfahren der Probenkörper, durch unzureichende Proben im Allgemeinen, durch Bearbeitungsspuren durch Sägeblätter sowie durch Wärmeentwicklung ergeben können.

4.3.1 Herstellung der Probenkörper

Bei den ersten Durchläufen der Herstellungsverfahren der Proben wurde nur an vereinzelten Stellen Klebewachs aufgetragen, um das Plättchen am Objektträger zu fixieren, was einen unzureichenden Halt zur Folge hatte: Während des Abbindeprozesses fielen ein paar Plättchen ab oder versanken teilweise bzw. vollständig im Kunststoff, so dass sie keine plane Oberfläche besaßen und demnach nicht zu verwenden waren. Daraufhin wurde das Verfahren derart modifiziert, dass das Plättchen nun vollständig mit Klebewachs fixiert wurde und infolgedessen keine unbrauchbaren Proben mehr auftraten.

Die Herstellung der Probenkörper wurde in den ersten Durchläufen aufgrund der Wahl von Kunststoff-Probenträgern zur Fixierung der *Cerasmart*[®]-Plättchen erschwert, weil der Kunststoff *Technovit 4004*[®] an manchen Stellen einen Verbund mit dem Probenträger einging. Aufgrund dessen konnten die Objektträger nur sehr schwer oder gar nicht vom *Cerasmart*[®]-Plättchen entfernt werden. Das anschließende Auftragen von Vaseline um die *Cerasmart*[®]-Plättchen herum zur Unterbindung des Verbundes, brachte kein befriedigendes Ergebnis. Aus diesem Grund wurde der Versuchsaufbau dahingehend verändert, dass anschließend Objektträger aus Glas verwendet wurden, da diese keinen Verbund mit dem *Technovit*[®]-Kunststoff eingehen.

4.3.2 Fehlerhafte Proben

In der zweiten Probenreihe unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®] konnte bei einer Probe – Probennummer 1100012-10 – kein Ergebnis ermittelt werden, weil das *Cerasmart*[®]-Plättchen so uneben im *Technovit*[®]-Kunststoff eingebettet war, dass ein haltbares Fixieren eines Knöpfchens nicht möglich war. Dies ist vermutlich auf den Einbettprozess zurückzuführen. Des Weiteren kam es bei einer Probe – Probennummer 1100022-04 – in der vierten Probenreihe von *Peak universal*[®] und *Enamel plus EF Hri function*[®] dazu, dass die Universalprüfmaschine keine Messung durchgeführt hat, allerdings haben die profilometrische Analyse und die optische Betrachtung kein Verbundversagen aufgezeigt, sondern bestätigt, dass es bei dieser Probe zu einem Ausbruch aus dem *Cerasmart*[®]-Plättchen gekommen ist. Bei dieser Probe liegt demnach ein Messfehler der Universalprüfmaschine mit ausgesparter Klinge nach ISO Norm 29022:2013 vor, wobei die Ursache dafür ungeklärt bleibt.

Es kann ausgeschlossen werden, dass die zwei Proben – Probennummer 1100012-04 und 1100012-09 – welche einen Verlust beim Thermocycling aufweisen und infolgedessen in Bezug auf die Verbundfestigkeit mit 0 MPa bewertet werden mussten, durch das Thermocycling geschwächt wurden. Eine Studie von Tróia et al. (2003) zeigt, dass das Thermocycling weder die Verbundfestigkeit des Adhäsivsystems noch – durch Tekçe et al. (2018) nachgewiesen – die Oberflächenstruktur von *Cerasmart*[®] beeinflusst.

4.3.3 Sägespuren

Die Referenzprofile einiger Proben weisen in ihren Rauheits- und Welligkeitswerten bei R_a/W_a und R_z/W_z hohe Werte auf. Die entsprechenden Proben wurden gesondert betrachtet, um mögliche Ursachen zu evaluieren. Eine Ursache liegt in Sägespuren begründet, die durch die Präzisionsmaschine Exakt 300 CP erzeugt wurden: Einige der Proben weisen bei der Betrachtung und Auswertung mittels Profilometrie Sägespuren auf, wie exemplarisch auf den Aufnahmen der Proben 1100021-06ref (siehe 3.3, Abb. 38) sichtbar. Bei diesen Proben sind gleichmäßige Strukturen in der Oberflächenmorphologie erkennbar, die aufgrund von Bearbeitungsspuren durch die Sägeblätter entstehen können. Diese Gleichmäßigkeit der Riefen ist durch ein bloßes händisch durchgeführtes Sandstrahlen nicht zu erwarten.

Aufgrund der erzielten Scherspannungswerte ebenso wie der Rauheits- und Welligkeitswerte kann bestätigt werden, dass diese oberflächenverändernden Prozesse keinen signifikanten Einfluss auf den adhäsiven Verbund haben, da bei diesen Proben kein schlechterer Verbund als bei Proben ohne diese deutlichen Bearbeitungsspuren nachgewiesen werden konnte.

4.3.4 Wärmeentwicklung

Da durch Reibung Energie entsteht, ist mit einer Wärmeentwicklung durch Reibungskraft zu rechnen (Rühlmann, 1876). Da bei dem Schneidprozess zur Herstellung der *Cerasmart*[®]-Plättchen Reibungsenergie auftritt, kann eine Wärmeentwicklung nicht ausgeschlossen werden, obwohl die Maschine Exakt 300 CP mit einer Wasserkühlung arbeitet.

Polymere besitzen die Eigenschaft, sich unter Wärmeentwicklung 5 bis 15-fach stärker als Metalle auszudehnen. Zudem vergrößern sich die Abstände der Moleküle unter Wärmezufuhr, so dass eine Wärmebewegung zustande kommt (Weißbach, 2012). Laut Herstellerangaben ist *Cerasmart*[®] in einer Temperaturspanne zwischen 5 und 55 Grad Celsius thermostabil (Firma GC, 2016b). In die Kunststoffmatrix der *Cerasmart*[®]-Blöcke wurden – entsprechend den Eigenschaften einer Nanohybridkeramik – Keramikfüllkörper der Größe 300 nm eingelassen. Mithilfe einer besonderen Verbundtechnologie, der sogenannten „Glasfüller-Technologie“ werden der Polymermatrix von *Cerasmart*[®] diverse Füllstoffe beigesetzt – als Glasfüller dienen dabei 300 nm große Barium-Borosilikat-Füllkörper sowie 20 nm große Siliziumdioxidpartikel (Dentaldialogue, 2016).

Bei der profilometrischen Betrachtung der Proben sind kreisrunde Einschlüsse in der Matrix zu erkennen. Dies deutet auf Füllkörper in der Matrix hin, die aufgrund von Wärmeentwicklung beim Schleifprozess stärker hervortreten.

5. Zusammenfassung

Das Ziel des vorliegenden in-vitro-Versuchs besteht darin, unter Verwendung unterschiedlicher Vorbehandlungsmethoden und Komposite den bestmöglichen adhäsiven Verbund zu dem neuartigen, im CAD/CAM-Verfahren bearbeiteten Restaurationsmaterial *Cerasmart*[®] zu untersuchen. An insgesamt 40 Proben mit jeweils 10 Proben pro Probenreihe werden unter Verwendung zweier adhäsiver Systeme – *Ceramic Primer II*[®] und *Peak universal*[®] (Universaladhäsiv) – sowie zweier Komposite – Befestigungskomposit *PermaFlo DC*[®] und Füllungskomposit *Enamel plus EF Hri function*[®] – Scherspannungswerte ermittelt. Die Scherspannungswerte werden mithilfe der Universalprüfmaschine nach ISO-Norm 29022:2013 aufgezeichnet und statistisch ausgewertet. Anschließend werden die Proben hinsichtlich ihrer Frakturzone und ihrer Oberflächenstruktur unter einem Lichtmikroskop und einem Profilometer untersucht.

Bei der Auswertung wird deutlich, dass das Universaladhäsiv *Peak universal*[®] im Vergleich zu *Ceramic Primer II*[®] die höheren Scherspannungswerte erreicht. Darüber hinaus weist die Kombination aus *Peak universal*[®] und *PermaFlo DC*[®] insgesamt die höchsten ermittelten Scherspannungswerte und somit die besten adhäsiven Verbundkräfte zum indirekten Restaurationsmaterial *Cerasmart*[®] auf. Die Ergebnisse der Scherspannungsuntersuchung korrelieren mit den Befunden der lichtmikroskopischen und profilometrischen Untersuchungen der Frakturzonen. In Bezug auf die beiden in diesem Versuch verwendeten Komposite zeigt sich, dass das Befestigungskomposit *PermaFlo DC*[®] stärkere adhäsive Verbundfestigkeiten zu *Cerasmart*[®] eingeht als das Füllungskomposit *Enamel plus EF Hri function*[®], da ausschließlich Kunststoffknöpfchen aus dem Füllungskomposit beim Thermocycling verloren gehen. Des Weiteren zeigt die profilometrische Untersuchung, dass eine Oberflächenkonditionierung von *Cerasmart*[®] zu einer Veränderung der Oberflächenmorphologie führt, da durch Sandstrahlen eine Glättung der Oberflächenstruktur des Materials bewirkt wird, welche unter Verwendung von *Peak universal*[®] stärker auftritt als unter Verwendung von *Ceramic Primer II*[®].

Aus den gewonnenen Ergebnissen der vorliegenden Arbeit kann gefolgert werden, dass das Universaladhäsiv *Peak universal*[®] in der Kombination mit *PermaFlo DC*[®] zu dem besten adhäsiven Verbund mit dem neuartigen Material *Cerasmart*[®] führt.

6. Anhang

Tab. 10: Sortierte Liste der Scherspannungswerte in MPa in Reihenbildung

Aufsteigende Reihung der Scherspan- nungswerte	Probenreihe 1: <i>Ceramic Primer II</i> [®] + <i>PermaFlo DC</i> [®] 1-1-0-0-0-1-1	Probenreihe 2: <i>Ceramic Primer II</i> [®] + <i>Enamel plus EF Hri</i> <i>function</i> [®] 1-1-0-0-0-1-2	Probenreihe 3: <i>Peak universal</i> [®] + <i>PermaFlo DC</i> [®] 1-1-0-0-0-2-1	Probenreihe 4: <i>Peak universal</i> [®] + <i>Enamel plus EF Hri</i> <i>function</i> [®] 1-1-0-0-0-2-2	Scherspannungswerte in MPa
1	3,2	Probe nicht verwendbar; Knöpfchen nicht fixierbar	12,9	kein Wert von Maschine gemessen bzw. angezeigt	
2	3,5	0,0 Verlust im Thermocycling	18,9	0,2	
3	7,0	0,0 Verlust im Thermocycling	21,5	6,5	
4	9,1	7,4	24,0	14,0	
5	9,6	11,0	26,0	14,9	
6	11,7	11,4	27,7	15,6	
7	11,8	11,4	27,7	16,1	
8	17,4	18,1	28,9	16,9	
9	22,4	20,6	30,9	17,2	
10	25,4	21,0	46,6	21,6	

7. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Klassifizierung und Einteilung dentaler Keramiken nach ihrer chemisch-kristallografischen Zusammensetzung (Eigene Darstellung, angelehnt an: Taschner und Lohbauer, 2016)	10
Abb. 2: Darstellung der Befestigung verschiedener Keramiken (Eigene Darstellung, angelehnt an: Kunzelmann et al., 2006)	18
Abb. 3: Aufnahme im Rasterelektronenmikroskop zur Darstellung der ultrafeinen Füllertechnologie von <i>Cerasmart</i> [®] (Firma GC, 2016b)	21
Abb. 4: Darstellung der Bruchenergie von <i>Cerasmart</i> [®] im Vergleich zu anderen CAD/CAM-Materialien (Firma GC, 2016b)	22
Abb. 5: Darstellung der thermischen Beständigkeit von <i>Cerasmart</i> [®] im Vergleich mit anderen CAD/CAM-Materialien (Firma GC, 2016b)	23
Abb. 6: Modifizierte Einmalspritze ohne Düse im Vergleich zur unbehandelten Einmalspritze	26
Abb. 7: Hergestellte Holzvorrichtung zum Einhängen der Einmalspritzen	27
Abb. 8: Unbefüllte Einmalspritzen in der Holzvorrichtung	27
Abb. 9: Mit Klebewachs fixierte <i>Cerasmart</i> [®] -Plättchen auf Glasobjektträgern	28
Abb. 10: Abgebundene Probe in der Einmalspritze	29
Abb. 11: Fertiger Probenkörper	29
Abb. 12: Aufkleben eines genormten Kunststoffknöpfchens auf dem eingespannten Probenkörper	31
Abb. 13: Vorrichtung nach ISO Norm 29022:2013 zum Aufkleben der Kunststoffknöpfe auf den Probenkörpern (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013); Legende: 1-Wellenfeder, 2-Gewindestab (1/4"-20), 3-Rändelmutter (1/4"-20), 4-Buchse, 5-Unterteil der Spannvorrichtung, 6-Oberteil der Spannvorrichtung, 7-Zylinderformeinsatz	32
Abb. 14: Fertiger Probenkörper mit aufgeklebtem Kompositknöpfchen	33
Abb. 15: Universalprüfmaschine nach ISO Norm 29022:2013 mit ausgesparter Klinge am Scherarm (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013); Legende: 1-Zahn, 2-ausgehärtetes Einbettungsmaterial, 3-ausgehärteter	

Kompositzylinder, 4-ausgehärtetes Adhäsiv, 5-Scherklinge mit Aussparung, 6-Prüfspannvorrichtung	35
Abb. 16: Aufteilung der Frakturzone in vier Quadranten	39
Abb. 17: Gestaltabweichungen von Oberflächen (Uhlmann, 2018)	40
Abb. 18: Aufsteigende Scherspannungswerte in MPa, gemäß sortierter Liste	44
Abb. 19: Scherspannungswerte der Probenreihe 1: <i>Ceramic Primer II</i> [®] + <i>PermaFlo DC</i> [®] 1-1-0-0-0-1-1	46
Abb. 20: Scherspannungswerte der Probenreihe 2: <i>Ceramic Primer II</i> [®] + <i>Enamel plus EF Hri function</i> [®] 1-1-0-0-0-1-2	46
Abb. 21: Scherspannungswerte der Probenreihe 3: <i>Peak universal</i> [®] + <i>PermaFlo DC</i> [®] 1-1-0-0-0-2-1	47
Abb. 22: Scherspannungswerte der Probenreihe 4: <i>Peak universal</i> [®] + <i>Enamel plus EF Hri function</i> [®] 1-1-0-0-0-2-2	48
Abb. 23: Scherspannungswerte der vier Probenreihen	49
Abb. 24: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Frakturzone an der Verbundfläche (Beispielaufnahme: Probe 1100011-09)	50
Abb. 25: 3D-Darstellung einer Frakturzone an der Verbundfläche (Beispielaufnahme: Probe 1100011-10)	51
Abb. 26: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Frakturzone im Kompositknöpfchen (Beispielaufnahme: Probe 1100021-04)	51
Abb. 27: 3D-Darstellung einer Frakturzone im Kompositknöpfchen (Beispielaufnahme: Probe 1100012-01)	52
Abb. 28: Lichtmikroskopische Aufnahme einer Frakturzone im <i>Cerasmart</i> [®] - Plättchen (Beispielaufnahme: Probe 1100021-02)	53
Abb. 29: 3D-Darstellung einer Frakturzone im <i>Cerasmart</i> [®] -Plättchen (Beispielaufnahme: Probe 1100022-01)	53
Abb. 30: Lichtmikroskopische Aufnahme einer kombinierten Frakturzone im Kompositknöpfchen sowie <i>Cerasmart</i> [®] -Plättchen (Beispielaufnahme: Probe 1100021-05)	54
Abb. 31: 3D-Darstellung einer kombinierten Frakturzone im Kompositknöpfchen und <i>Cerasmart</i> [®] -Plättchen (Beispielaufnahme: Probe 1100022-04)	54
Abb. 32: Frakturzonen an der Verbundfläche	58

Abb. 33: Frakturzonen im Kompositknöpfchen	59
Abb. 34: Frakturzonen im <i>Cerasmart</i> [®] -Plättchen	60
Abb. 35: Kombinierte Frakturzonen im Kompositknöpfchen und <i>Cerasmart</i> [®] - Plättchen	61
Abb. 36: Vier Arten an Frakturzonen in Relation zu den Scherspannungswerten	63
Abb. 37: Profilometrische Aufnahme einer gesandstrahlten Oberfläche (Beispielprobe: 1100012-09ref)	65
Abb. 38: Profilmetrische Aufnahme einer Oberfläche mit Bearbeitungsspuren (Beispielprobe: 1100021-06ref)	66
Abb. 39: R_a -Mittelwerte und Standardabweichungen der Referenzprofile der Proben aller vier Probenreihen	69
Abb. 40: W_a -Differenz-Mittelwerte und Standardabweichungen der vier Probenreihen	76
Abb. 41: Korrelationskoeffizient zwischen W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der Probenreihe 1	77
Abb. 42: Korrelationskoeffizient zwischen W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der Probenreihe 2	77
Abb. 43: Korrelationskoeffizient zwischen W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der Probenreihe 3	78
Abb. 44: Korrelationskoeffizient zwischen W_a -Differenzwerten und Scherspannungswerten der Probenreihe 4	78

8. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Codierung der verwendeten Vorbehandlungen und Materialien	36
Tab. 2: Codierung des vorliegenden Versuchssettings	37
Tab. 3: Urliste der Scherspannungswerte in MPa unter Angabe der Probennummer	43
Tab. 4: Auflistung der Proben und ihre jeweiligen Frakturzonen	56
Tab. 5: Rauheitsprofile der unbehandelten Leerprobe und gesandstrahlten Leerprobe	64
Tab. 6: Rauheitswerte für die Referenzwerte der Proben aller Probenreihen	67
Tab. 7: Welligkeitsprofile der unbehandelten Leerprobe und gesandstrahlten Leerprobe	70
Tab. 8: Welligkeitswerte der Referenzwerte aller Proben	70
Tab. 9: Welligkeitsprofile und Scherspannungswerte in MPa der vier Probenreihen	73
Tab. 10: Sortierte Liste der Scherspannungswerte in MPa in Reihenbildung	89

9. Literaturverzeichnis

- Akova T, Aytutuldu N, Yoldas O. The evaluation of different surface treatment methods for porcelain-composite bonding. *Int J Prosthodont* 2007; 27: 20-25
- Amaral M, Belli R, Cesar PF, Valandro LF, Petschelt A, Lohbauer U. The potential of novel primers and universal adhesives to bond to zirconia. *J Dent* 2014; 42: 90-98
- Arnetzl G. *Quintessenz Zahntech* 2016; 42: 2-10
- Attia A, Kern M. Effect of Cleaning Methods after Reduced-pressure Air Abrasion on Bonding to Zirconia Ceramic. *J Adhes Dent* 2011; 13: 561-567
- Azarbal A, Azarbal M, Engelmeier R, Kunkel T. Marginal Fit Comparison of CAD/CAM crowns milled from two different Materials. *J Prosthodont* 2018; 27: 421-428
- Barutcigil K, Barutcigil C, Kul E, Özarslan MM, Buyukkaplan US. Effect of Different Surface Treatments on Bond Strength of Resin Cement to a CAD/CAM Restorative Material. *J Prosthodont* 2019; 28: 71-78
- Bock T, Özcan M. Protocol for removal of clinically relevant contaminations from glass ceramic-based restorations. *J Adhes Dent* 2015; 17: 474-475
- Bowen R. Dental filling material comprising vinyl silane treated fused silica and a binder consisting of the reaction product of bis phenol and glycidyl acrylate. US patent 1962; 66-112
- Bowen R. Silica-resin direct filling material and method of preparation. US Patent 1965; 3: 194, 783 and 3: 194, 784
- Bowen R, Marjenhoff W. Dental Composites/ Glass Ionomers: the materials. *Adv Dent Res* 1992; 6: 44-49
- Buonocore MG. A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res* 1997; 34: 849-853
- BZÄK, 2014: DGZ Gutachten zur Adhäsivtechnik. https://www.bzaek.de/fileadmin/PDFs/goz/DGZ_Gutachten.pdf (Zugriffdatum: 30.07.2016)

Cramer N, Stansbury J, Bowman C. Recent Advances and Developements in Composite Dental Restorative Materials. J Dent Res 2011; 90: 402-416

Della Bonna A, Corazza PH, Zhang Y. Characterization of a polymer-infiltrated ceramic-network material. Dent Mat 2014; 30: 564-569

Dentaldialogue, 2016: Querdenken gefragt – Fachbeitrag. https://www.dentaldialogue.de/fachbeitraege/?tx_dentalarticle_newslist%5Barticle%5D=1049&tx_dentalarticle_newslist%5Baction%5D=show&tx_dentalarticle_newslist%5Bcontroller%5D=Article&cHash=2f835e412610209e6ec9a02ea0ee2237 (Zugriffsdatum: 30.5.2018)

DGZMK, 2007: Vollkeramische Restaurationen. http://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Vollkeramische_Restaurationen.pdf (Zugriffsdatum: 29.11.2017)

DGZMK, 2007: Zahnfarbene Restaurationen aus Keramik: Inlays, Teilkronen und Veneers. https://www.dgzmk.de/uploads/tx_szdgzmkdocuments/Zahnfarbene_Restaurationen_aus_Keramik_3A_Inlays__Teilkronen_und_Veneers.pdf (Zugriffsdatum: 11.11.2017)

DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013. Zahnheilkunde-Adhäsion-Verbundprüfung der Abscherfestigkeit mit ausgesparter Klinge (ISO 29022:2013)

DIN EN ISO 6872:2015-11, 2015. Dentistry - ceramic materials (ISO 6872:2015)

Elsabaka S. Bond strength of novel CAD/CAM restorative materials to self-adhesive resin cement: the effect of surface treatments. J Adhes Dent 2014; 16: 531-540

Faria-E-Silva AL, Pfeifer CS. Effectiveness of high-power LEDs to polymerize resin cements trough ceramics: An in-vitro study. J Prosthet Dent 2017; 118: 631-636

Firma GC, 2016a: Ceramic Primer II. http://cdn.gceurope.com/v1/PID/ceramicprimer2/ifu/IFU_CERAMIC_PRIMER_II_W.pdf (Zugriffsdatum: 28.11.2017)

Firma GC, 2016b: Cerasmart. http://www.gcamerica.com/lab/products/CERASMART/GCA_CERA_SMART_Bro-iPad.pdf (Zugriffsdatum: 28.11.2017)

Firma GC, 2017a: Ceramic Primer II. http://www.gcamerica.com/lab/products/CERAMIC_PRIMER_II/7index.php (Zugriffsdatum: 29.11.2017)

Firma GC, 2017 b: GC Primers – Indications Guide for Luting and Repair. http://cdn.gceurope.com/v1/PID/ceramicprimer/manual/MAN_GC_Primers_%20Indications_Guide_en.pdf (Zugriffsdatum: 29.11.2017)

Firma Micerium, 2017: Enamel plus function. http://www.micerium.com/amministrazione/repository/files/11/HRI%20ENG%20ISTR%20v5_06-2013.pdf (Zugriffsdatum: 29.11.2017)

Firma Ultradent Products, 2012: Adhäsivtechnik bei direkten Kompositrestaurationen mit dem Peak Universal-System – Total Etch. https://www.ultradent.com/de/Product%20Instruction%20Documents/SbyS_06_Adh%C3%A4stehn_Peak%20Universal_TE_2012-01-31.pdf (Zugriffsdatum: 29.11.2017)

Firma Ultradent Products, 2017: PermaFlo DC. <https://www.ultradent.com/de/Dental-Produkte/Kronen-und-Br%C3%BCcken/Komposit-Dualh%C3%A4rtend/PermaFlo-DC-und-PermaFlo-DC-Primer/Pages/default.aspx> (Zugriffsdatum: 29.11.2017)

Firma Ultradent Products, 2018: Peak universal Bond. <https://www.ultradent.com/de/Pages/SearchResources.aspx?k=Peak%20Universal%20Bond&cs=&u=https://www.ultradent.com/de> (Zugriffsdatum: 30.01.2018)

Fusayama T. New Concepts in Operative Dentistry. Tokyo: Quintessence Publishing Co., 1982, 61-156

Gernet W, Biffar R, Schwenzer N, Ehrenfeld M. Zahnärztliche Prothetik. 3. Überarbeitete Auflage. Stuttgart: Thieme Verlag, 2007

Giordano R. Dental ceramic restorative systems. Compend Contin Educ Dent 1995; 17: 779-782

Goujat A, Abouelleil H, Colon P, Jeannin C, Pradelle N, Seux D, Grosogeat B. Mechanical properties and internal fit of 4 CAD-CAM block materials. J Prosthet Dent 2018; 119: 384-389

Gröger S, Weißgerber M, 2017: XIV. Oberflächenkolloquium. <http://docplayer.org/49346472-Sophie-groeger-marco-weissgerber-hrsg-xiv-internationales-oberflaechenkolloquium.html> (Zugriffsdatum: 13.2.2018)

Hahn P. Kompromisse und Grenzen in der zahnärztlichen Behandlung. Balingen: Spitta Verlag GmbH & Co. KG, 2003

Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnheilkunde, 5. überarbeitete und erweiterte Auflage. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009

Hutsky A, 2011: Adhäsive Befestigung vollkeramischer Restaurationen. http://www.bzb-online.de/mai11/65_69.pdf (Zugriffsdatum: 12.11.2017)

Kamada K, Yoshida K, Atsuta M. Effect of ceramic surface treatments on the bond of four resin luting agents to a ceramic material. J Prosthet Dent 1998; Vol. 79, Issue 5: 508-513

Kato H, Matsumura H, Atsuta M. Effect of etching and sandblasting on bond strength to sintered porcelain of unfilled resin. J Oral Rehab 2000; 27: 103-110

Kern M. 2008. Kleben oder Zementieren?. ZWP extra 2008; 2: 10-13

Kömürçüoğlu M, Sagirkaya E, Tulga A. Influence of different surface treatments on bond strength of novel CAD/CAM restorative materials to resin cement. J Adv Prosthodont 2017; 9: 439-446

Kulzer-Technik, 2017: Technovit® & Co. Kunststoffe für die Materialographie. http://kulzer-technik.de/media/webmedia_local/kulzer_technique/media_4/metallo/downloads_5/Prospekt_Technovit_dt.pdf (Zugriffsdatum: 29.01.2018)

Kunzelmann K. Entscheidungsweg: Befestigungstechniken für vollkeramische Systeme. ZWR 2014; 123: 220-223

Kunzelmann KH, Kern M, Pospiech P, Mehl A, Frankenberger R, Reiss B, Wiedhan K. Vollkeramik auf einen Blick. Leitfaden zur Indikation, Werkstoffauswahl, Vorbereitung und Eingliederung von vollkeramischen Restaurationen. 2. Auflage. Ettlingen: Eigenverlag AG Keramik, 2006

Lee B, Oh KC, Haam D, Lee JH, Moon HS. Evaluation of the fit of zirconia copings fabricated by direct and indirect digital impression procedures. J Prosthet Dent 2018; <https://doi.org/10.1016/j.prosdent.2017.08.003> (Zugriffsdatum: 07.03.2018)

Lise DP, Van Ende A, De Munck J, Vieira L, Baratieri LN, Van Meerbeek B. Microtensile bond-strength of Composite Cement to Novel CAD/CAM Materials as a Function of Surface Treatment and Aging. *Oper Dent* 2017; 42: 73-81

Lung C, Matinlinna J. Aspects of silane coupling agents and surface conditioning in dentistry: An overview. *Dent Mat* 2012; 28: 467-477

Mahr GmbH, 1999: <http://langer-hydraulik.de/pdf/mahr/rauhigkeit.pdf> (Zugriffsdatum: 21.03.2018)

Matinlinna J, Özcan M, Lassila L, Vallittu P. Applications of trialkoxysilanes in dental biomaterials: A review. Erschienen in: Mittal, KL. Silanes and other coupling agents, Vol.4. London: CRC Press, 2007, 199-219

Menees TS, Lawson NC, Beck PR, Burgess JO. Influence of particle abrasion or hydrofluoric acid etching on lithium disilicate flexural strength. *J Prosthet Dent* 2014; 112: 1164-1170

Mosby's Dental Dictionary, 2008: <https://medical-dictionary.thefreedictionary.com/smear+layer> (Zugriffsdatum: 07.03.2018)

Naichuan S, Li Y, Yunmao L, Wenjia L, Hai Z, Xin L, Hang W, Jiefei S. The effect of various sandblasting conditions on surface changes of dental zirconia and shear bond strength between zirconia core and indirect composite resin. *J Adv Prosthodont* 2015; 7: 214-233

Nakabayashi N, Kojima K, Masuhara E. The promotion of adhesion by the infiltration of monomers into tooth substrates. *J Biomed Mater Sci* 1982; 16: 265-273

Nakabayashi N, Nakamura M, Yasuda N. Hybrid layer as a dentin-bonding mechanism. *J Esthet Dent* 1991; 3: 133-138

Noort R. Introduction to dental materials 3rd ed.. St. Louis: Mosby Elsevier, 2007

Pashley DH, Tay FR, Breschi L, Tjäderhane L, Carvalho RM, Carrilho M, Tezvergil-Mutluay A. State of the art etch-and-rinse adhesives. *Dent Mater* 2011; 27: 1-16

- Peumanns M, Valjakova EB, De Munck J, Mishevskaja CB, Van Meerbeek M. Bonding Effectiveness of Luting Composites to Different CAD/CAM materials. *J Adhes Dent* 2016; 18: 289-302
- Quaas A, Yang B, Kern M. Panavia F 2.0 bonding to contaminated zirconia ceramic after different cleaning procedures. *Dental Materials* 2007; 23: 506-512
- Ramos Nde C, Campos TM, Paz IS, Machado JP, Bottino MA, Cesar PF, Melo RM. Microstructure characterization and SCG of newly engineered dental ceramics. *Dent Mat* 2016; 32: 870-878
- Rinke S. Vollkeramik - Ein Praxiskonzept. Berlin: Quintessenz Verlag, 2011
- Rosentritt M, Lohbauer U, Illie N. Wie befestigen. *ZWR* 2016, 125: 224-227
- Rühlmann RM. Handbuch der mechanischen Wärmetheorie - 1. Band. 1st Edition – Nachdruck. Nikosia, Cyprus: TP Verone Publishing House Ltd., 1876
- Salerno M, Loria P, Matarazzo Gk, Tomè F, Diaspro A, Eggenhöfner R. Surface Morphology and Tooth Adhesion of a novel nanostructured Dental Restorative Composite. *Materials (Basel)* 2016; 9: 203
- Schmidseder J, Munz T. Farbatlant der Zahnmedizin - Ästhetische Zahnmedizin, 2. überarbeitete Auflage. Stuttgart-New York: Georg Thieme Verlag, 2008
- Shimokawa CAK, Turbino ML, Giannini M, Braga RR, Price RB. Effect of light curing units on the polymerization of bulk fill resin-based composites. *Dent Mater* 2018; 34: 1211-1221
- Shiu P, Souza-Zaroni de W, Paula Eduardo de C, Youssef M. Effect of Feldspat Ceramic Surface Treatments on Bond Strength to Resin Cement. *Photomed Laser Surg* 2007; 25: 291-296
- Siqueira F, Cardenas AM, Gutierrez MF, Malaquias P, Hass V, Reis A, Loquercio AD, Perdigao, J. Laboratory Performance of Universal Adhesive Systems for Luting CAD/CAM Restorative Materials. *J Adhes Dent* 2016; 18: 331-340
- Souza-Junior EJ, Borges BC, Montes MA, Alonso RC, Ambrosano GM, Sinhorette, MA. Influence of etching time and bonding strategies on the microshear bond strength of self- and light-cured pit- and- fissure sealants. *Braz Dent J* 2012; 23: 477-483

Spitznagel FA, Vuck A, Gierthmühlen PC, Blatz MB, Horvath SD. Adhesive Bonding to Hybrid Materials: An Overview of Materials and Recommendations. *Compend Contin Educ Dent* 2016; 37: 630-637

Stark H, 2001. Adhäsive Befestigung von Kronen. *DZZ* 56 2001; 11: 147-148

Strasser T, Preis V, Behr M, Rosentritt M. Roughness, surface energy, and superficial damages of CAD/CAM materials after surface treatment. *Clin Oral Investig* 2018; 22: 2787-2797

Taher N. Mechanical properties of flowable composites. *Saudi Dent J* 2001; Vol 13, No1: 20-24

Taschner M, Lohbauer U. Keramikwerkstoffe in der restaurativen Zahnmedizin. *Zahnmedizin up2date* 2016; 10: 233-249

Tekçe N, Fidan S, Tuncer S, Kara D, Demirci M. The effect of glazing and aging on the surface properties of CAD/CAM resin blocks. *J Adv Prosthodont* 2018; 10: 50-57

Tróia MG Jr, Henriques GE, Nóbilo MA, Mesquita MF. The effect of thermal cycling on the bond strength of low-fusing porcelain to commercially pure titanium and titanium-aluminium-vanadium alloy. *Dent Mater* 2003, 19: 790-796

Uhlmann E, 2018: Fertigungsgenauigkeit. <http://docplayer.org/20951032-Fertigungsgenauigkeit.html> (Zugriffsdatum: 21.03.2018)

Weißbach W. Werkstoffkunde. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 18. überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien GmbH, 2012

ZMK, 2011: Werkstoffe für die CAD/CAM-Bearbeitung – Teil 1. https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/digitale-praxis/story/werkstoffe-fuer-die-cadcam-bearbeitung--teil-1__401.html (Zugriffsdatum: 02.02.2018)

ZWP, 2010: VALO. The light. <https://media.zwp-online.info/archiv/pub/4f0b037678b23/#10> (Zugriffsdatum: 03.02.2018)

10. Danksagung

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Frentzen, die vorliegende Dissertation in der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie des Universitätsklinikums Bonn anfertigen zu dürfen sowie für seine hervorragende Betreuung der Doktorarbeit in der Zeit ihrer Entstehung.

Ausdrücklich möchte ich mich auch bei Frau Dr. Susanne Reimann, Frau Beate Schiermeyer-Dunkhase und Frau Anna Weber für die Unterstützung und Betreuung während der Abfassung der Dissertation bedanken.

Dr. med. dent. Gereon Josuweck und Dr. med. dent. Jörg Weiler möchte ich herzlich für die reibungslose Zusammenarbeit, die Unterstützung sowie die aufmunternden und Mut machenden Worte danken.

Von Herzen danke ich an dieser Stelle meinen Eltern Elke und Hartmut Dahlhaus. Ihr seid mir Ratgeber und Wegweiser. Danke für all eure Liebe und Unterstützung.

Ganz besonders soll an dieser Stelle mein Mann Christian erwähnt sein, der mich ermutigt, unterstützt, mir mit Rat und Tat zur Seite steht, der an mich glaubt und meine Pläne und Vorhaben mitträgt und dessen Liebe in mir das Beste weckt.