

In-vitro-Scherkraftuntersuchung zum Verbund eines neuartigen Kompositthybrids zu konventionellen Restaurationsmaterialien

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Hohen Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Marvin Peter Maria Amann

aus Aachen

2024

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter: Prof. Dr. med. dent. Helmut Stark
2. Gutachter: PD Dr. rer. nat. Jochen Winter

Tag der Mündlichen Prüfung: 24.07.2024

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffwissenschaften
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Helmut Stark

Für meine Familie

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungsverzeichnis	8
1.	Einleitung	9
1.1	Begriffsbestimmung: Füllungsreparatur, Reparaturfüllung	10
1.1.1	Indikationen für eine Reparaturfüllung	10
1.1.2	Voraussetzung für eine Reparaturfüllung	11
1.1.3	Vorbehandlungsmaßnahmen der bestehenden insuffizienten Füllung	12
1.2	Werkstoffklassen der Füllungsmaterialien	15
1.2.1	Glasionomerezemente	15
1.2.1.1	Zusammensetzung	16
1.2.1.2	Abbindereaktion	16
1.2.1.3	Adhäsive Verbindung zu der Zahnhartsubstanz	17
1.2.1.4	Modifikationen	17
1.2.2	Komposit	18
1.2.2.1	Zusammensetzung	19
1.2.2.2	Polymerisation	20
1.2.2.3	Adhäsivtechnik	21
1.2.2.4	Modifikationen	22
1.2.3	Komposithybrid	24
1.2.3.1	Zusammensetzung	24
1.2.3.2	Abbindereaktion	25
1.2.3.3	Adhäsive Verbindung zu der Zahnhartsubstanz	26
1.3	Ziel der vorliegenden Arbeit	26
2.	Material und Methoden	28
2.1	Verwendete Materialien	28
2.1.1	<i>ChemFil® Rock</i>	28

2.1.2	<i>Ceram.x Spectra™ ST</i>	29
2.1.3	<i>Surefil one™</i>	29
2.1.4	<i>Prime&Bond active®</i>	29
2.2	Prüfkörperherstellung	30
2.2.1	Probehalter	30
2.2.2	Substratfüllung	31
2.2.3	Vorbehandlung der Substratfüllung	33
2.2.4	Reparaturfüllung	36
2.3	Künstliche Alterung der Prüfkörper	38
2.4	Einteilung der Prüfgruppen	39
2.5	Auswertung der Verbundfestigkeit	40
2.5.1	Ermittlung der Scherspannungswerte	40
2.5.2	Brucharten	42
2.5.3	Vorgehen bei der statistischen Auswertung	46
3.	Ergebnisse	48
3.1	Scherkraftuntersuchung	49
3.1.1	Scherkraftuntersuchung der Prüfgruppen 1-16	50
3.1.2	Scherkraftuntersuchung der Prüfgruppen 17-32	52
3.1.3	Scherkraftuntersuchung der Prüfgruppen 33-48	54
3.2	Einfluss der Vorbehandlungsmaßnahmen	55
3.2.1	Einfluss des Universaladhäsives auf die Scherfestigkeit	56
3.2.2	Einfluss des Abstrahlens auf die Scherfestigkeit	56
3.3	Einfluss des Materials der Substratfüllung auf die Scherfestigkeit	57
3.4	Verteilung der Brucharten	58
4.	Diskussion	68
4.1	Methoden	68
4.1.1	Herstellung der Prüfkörper	69

4.1.1.1	Verwendete Materialien	69
4.1.1.2	Vorbehandlung der Oberfläche	70
4.1.1.3	Künstliche Alterung	72
4.1.2	Auswertung der Prüfkörper	73
4.1.3	Verteilung der Brucharten	75
4.2	Diskussion der Ergebnisse	76
4.3	Schlussfolgerung	80
5.	Zusammenfassung	82
6.	Abbildungsverzeichnis	84
7.	Tabellenverzeichnis	87
8.	Literaturverzeichnis	88
9.	Danksagung	103

Abkürzungsverzeichnis

BADEP	N,N'-Bis-acrylamido-N,N'-diethyl-1,3-propandiamin
Bis-GMA	Bisphenol A GlycidylMethAcrylate
Gew.-%	Gewichtsprozent
GIZ	Glasionomerzement
GPDM	Glycerinphosphatdimethacrylat
HEMA	Hydroxyethyl Methacrylate
LED	Light Emitting Diode
MDP	10-Methacryloyloxydecyldihydrogenphosphat
MOPOS	Modifiziertes Polysäure-System
PMMA	Polymethylmethacrylat
Silan	Methacryloxypropyl-trimethoxysilan
TEGDMA	Triethylenglycoldimethacrylat
UDMA	Urethandimethacrylat

1. Einleitung

Im zahnmedizinischen Alltag sind Komposite als Füllungsmaterialien aufgrund ihrer Ästhetik und Langlebigkeit nicht mehr wegzudenken. Jedoch besitzen sie in ihrer Anwendung eine große Techniksensitivität und sind in ihrer Verarbeitung im Gegensatz zu anderen Materialien, wie Glasionomerkemente oder Amalgam, mit einem größeren Zeitaufwand verbunden. Die werkstoffkundliche Forschung legt deshalb den Fokus darauf die positiven Eigenschaften der Komposite mit denen der einfachen Verarbeitung anderer Restaurationsmaterialien zu kombinieren.

Das neuartige Komposithybrid *Surefill oneTM* (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) weist eine geringe Techniksensitivität beim Verarbeiten des Materials im Vergleich zu herkömmlichen Kompositen auf (Van Meerbeek et al., 2020). Gleichzeitig konnte in Studien zu Verbundfestigkeit zu Zahnhartsubstanzen und mechanischer Festigkeit vergleichbare Ergebnisse wie mit herkömmlichen Kompositen erreicht werden (Yao et al., 2020a).

Da das heutige Verständnis der Zahnmedizin zu möglichst minimalinvasive Therapieoptionen tendiert, werden insuffiziente bzw. reparaturbedürftige Füllungen, z. B. aufgrund von Sekundärkaries, nicht mehr vollständig entfernt, sondern nur soweit bis der bestehende Füllungsteil wieder von gesunder Zahnhartsubstanz umfasst ist (Brendeke und Ozcan, 2007). Andernfalls würde bei einem noch bestehenden kraftschlüssigen Verbund und übereinstimmender farblicher Adaption eines intakten Füllungsteil unweigerlich gesunde Zahnhartsubstanz weggeschliffen und somit der Zahn an Stabilität und Frakturwiderstand verlieren (Krejci et al., 1995). Durch die minimalinvasive und defektorientierte Methode wird die präparationsbedingte Reizung der Pulpa, durch Vibration, Druck, Temperaturerhöhung und Austrocknung des Dentins, so gering wie möglich gehalten (Gordan et al., 2003; Hellwig et al., 2013).

In einer zahnmedizinischen Praxis ist eine zeiteffiziente Therapieoption besonders gefordert, da Patienten, die eine reparaturbedürftige Füllung aufweisen, meistens unplanmäßig zu den normalen Behandlungszeiten kommen. Dabei ist im Idealfall eine kostensparende und trotzdem den aktuellen zahnmedizinischen Standards entsprechende Therapie für

die Patienten anzubieten, die über den einheitlichen Bewertungsmaßstab für zahnärztliche Leistungen (BEMA) mit der gesetzlichen Krankenversicherung abrechenbar ist und keine Mehrkostenvereinbarung mit dem Patienten getroffen werden muss. Diese Behandlungseffektiven und ökonomisch vorteilhaften Eigenschaften präferieren die Methode der Füllungsreparatur gegenüber dem vollständigen Austausch der Füllung (Kamann und Gängler, 2000). Die verringerte Behandlungsbelastung für den Patienten darf dabei auch nicht außer Acht gelassen werden (Mjör, 1993).

1.1 Begriffsbestimmung: Füllungsreparatur, Reparaturfüllung

Eine Füllungsreparatur benötigt nicht immer die Applikation eines Füllungsmaterial, sondern kann auch aus einer Korrektur der bestehenden Füllung bestehen. Zum Beispiel ist dies eine rein subtraktive Methode durch die Anpassung eines überstehenden Füllungsrandes. Eine Reparaturfüllung ist immer eine additive Methode, bei der nach vorhergegangener Präparation der bestehenden Füllung, der Substanzdefekt mit einem Füllungsmaterial ausgeglichen wird (Kamann, 2010). Nach Kamann kann man die Reparaturfüllung des Weiteren nach ihrer Topografie klassifizieren. Dabei unterscheidet man die zentrale Reparaturfüllung bzw. Einschlussfüllung, die vollständig von der bestehenden Füllung umfasst ist, von der peripheren Reparaturfüllung, die sowohl an die bestehende Füllung als auch an die natürliche Zahnhartsubstanz grenzt.

Eine weitere Differenzierung liegt in der Verwendung des Materials für die Reparaturfüllung, ist dieses aus derselben Werkstoffgruppe wie das der bestehenden Füllung spricht man von einer homotypen Reparaturfüllung. Bei Zugehörigkeit zu einer anderen Werkstoffgruppe spricht man von einer heterotypen Reparaturfüllung.

1.1.1 Indikationen für eine Reparaturfüllung

Es gibt mehrere Ursachen die zu der Indikation einer Reparaturfüllung führen. Zu dem jeweiligen Kariesrisiko des Patienten kommen bei Kompositfüllungen die Techniksensitivität bei der Füllungsprozedur, Abrasionen, Frakturen, postoperative Hypersensibilitäten und Randspaltbildung hinzu. Die Randspaltbildung wird dabei durch die entstehende Spannung bei der Schrumpfung während der Polymerisation und den jeweiligen C-Faktor der Kavität beeinflusst, die letztendlich zu Sekundärkaries führen kann (Opdam et al., 2010). Opdam konnte in einer retrospektiven Studie eine 12-Jahres-Überlebensrate von

84,7 % für Klasse-II-Füllungen aus Komposit und 75,6 % für gleichgroße Amalgamfüllungen ermitteln. Mjör und Gordan (2002) konnten die Sekundärkaries, eine neugebildete Karies am oberflächlichen Grenzbereich von Zahnhartsubstanz und Füllung, als häufigste Ursache für die Insuffizienz einer Füllung verantwortlich machen. In einer Studie von Hickel et al. (2013) wird zusätzlich die Fraktur als ein Hauptgrund aufgeführt. Weitere Indikationen sind ein nicht vorhandener oder zu leichter Approximalkontakt, störende Randverfärbungen, „Re-surfacing“ von Frontzahnfüllungen oder die Sofortkorrektur von Mängeln bei der Herstellung einer Primärfüllung (Haller, 2020).

Eine Reparaturfüllung ist daher indiziert, um die Funktion und Ästhetik der bestehenden Füllung wieder zu verbessern und dadurch deren Liegedauer zu verlängern. Kanzow und Wiegand (2020) konnten in ihrer retrospektiven Studie zeigen, dass die 15-Jahres-Überlebensrate der Füllungen von 68,3 % auf 80,4 % durch Reparaturfüllungen angehoben werden konnte. Opdam et al. (2012) konnten auch eine gesteigerte Überlebensrate nachweisen, wobei diese bei einer Fraktur als Reparationsgrund geringer ausfiel als bei einer Füllung, die aufgrund von Sekundärkaries insuffizient war. Moncada et al. (2009) zeigten in einer 3-jährigen Longitudinalstudie, dass Füllungsreparaturen eine gleiche Überlebensrate wie ein vollständiger Austausch der insuffizienten Füllungen erreichen.

Aufgrund der Vorzüge ist der Anteil der Universitäten in Deutschland, die diese Art der konservativen Zahnbehandlung in ihren Lehrplan aufgenommen haben, in den Jahren von 2000 bis 2018 um 40 % auf 90 % gestiegen (Kanzow et al., 2018).

1.1.2 Voraussetzung für eine Reparaturfüllung

Bevor eine Füllungsreparatur vollzogen wird, müssen einige Aspekte für die Entscheidung bedacht werden. Um eine lange Lebensdauer der reparierten Füllung zu gewährleisten und eine permanente Lösung für den Patienten zu realisieren.

Dazu muss die benötigte Adhäsivtechnik durchführbar sein und der Zahn in ästhetischen und funktionellen Belangen wiederherstellbar sein (Frankenberger, 2012). Nach Frankenberger (2012) ist eine Reparaturfüllung ungeeignet, wenn der insuffizienten Füllung eine systematische Ursache zugrunde liegt, wie zum Beispiel Bruxismus. Daneben sind eine nicht durchführbare Matrizentechnik, keine mögliche Wiederherstellung des Approximalkontaktes und multiple Defekte an einer Füllung weitere Ausschlusskriterien.

Die Defektgröße und Lage sind ebenfalls von Bedeutung, da gewährleistet werden muss, dass die Reparaturfüllung einen kraftschlüssigen Verbund eingeht und wenn der Defekt subgingival liegt, dass die biologische Breite eingehalten und eine trockene Oberfläche während der Reparatur erreicht werden kann (Kanzow et al., 2017).

Im Jahr 2007 veröffentlichte die *FDI World Dental Federation* einen Katalog mit klinischen Bewertungskriterien, ob eine Füllung ersetzt, repariert oder erhalten werden kann (Hickel et al., 2010). Diese Kriterien teilen sich in eine ästhetische, funktionelle und biologische Hauptgruppe auf, die insgesamt 16 Bewertungskriterien aufweisen. Bei den ästhetischen Kriterien ist zum Beispiel der Oberflächenglanz, die Verfärbung des Füllungsrandes oder die ästhetische anatomische Form zu bewerten. Die funktionellen Kriterien beinhalten unter anderem die Beurteilung der Retention, der Randpassung, der okklusalen Gestaltung sowie des Verschleißes. Bei den biologischen Kriterien werden die Zahnvitalität, die angrenzende Gingiva, die Auswirkung der Füllung auf das Parodontium und die allgemeine Mundgesundheit beachtet.

Wenn nicht alle Entscheidungskriterien sicher und überzeugend zu beantworten sind, kann eine Füllungsreparatur höchstens provisorisch durchgeführt und muss anschließend ggf. durch eine indirekte Restauration ersetzt werden.

1.1.3 Vorbehandlungsmaßnahmen der bestehenden insuffizienten Füllung

Die Vorbehandlungsmaßnahmen der bestehenden insuffizienten Füllung haben das Ziel den Verbund zur Reparaturfüllung zu steigern. Dies kann durch mikromechanische Retention und chemisch-physikalische Haftung durch Adhäsive, die als Haftvermittler fungieren, verbessert werden (Brosh et al., 1997; Papacchini et al., 2007).

Für die mikromechanische Retention kann das Anrauen der bestehenden Füllung mit einem Diamantfräser oder zusätzlich durch Sandstrahlen erfolgen (Crumpler et al., 1989; Shahdad und Kennedy, 1998). Als Material zum Sandstrahlen wird Aluminiumoxid oder mit Silizium beschichtetes Aluminiumoxid verwendet (Bouschlicher et al., 1997). Bei der Verwendung des siliziumbeschichteten Aluminiumoxids muss darauffolgend ein Silan zur Bindung aufgetragen werden.

Bei den Diamantfräsern sind feine Rotring- (mittlere Körnung von 46 µm) bis zu größeren Grünring-Diamantfräser (mittlere Körnung 151 µm) zum Anrauen der bestehenden Füllung indiziert. Dabei führen die unterschiedlichen Körnungen zu keinen nennenswerten

Diskrepanzen in den gemessenen Haftwerten (da Costa et al., 2012). Nach da Costa et al. (2012) war das dadurch erreichte mikromechanische Retentionsmuster für die unterschiedlichen Körnungsgrade vergleichbar. Bei jeder Präparation eines Zahnes entsteht eine 1-5 µm dicke Schmierschicht (Smearlayer) aus Dentin-, Schmelzpartikeln, Zelltrümmern u.a. und hindert so den Verbund zu einem Füllungsmaterial (Hellwig et al., 2013). Tani und Finger (2002) stellten eine Proportionalität der Dicke der Schmierschicht zur gröber werdenden Körnung der verwendeten Diamantfräses fest. Da eine größere Schmierschicht den Verbund zu adhäsiven Füllungsmaterialien stärker negativ beeinflusst, sollte ein feinkörniger Diamantfräser (mittlere Körnung von 46 µm) zur Präparation für eine Füllungsreparatur genutzt werden, wenn diese auch am Zahn befestigt werden muss.

Als beste Variante zur Schaffung einer mikroretentiven Oberfläche hat sich das intraorale Sandstrahlen bewiesen (Loomans et al., 2011). Dabei wird die zu reparierende Füllungsoberfläche mit 25-50 µm Aluminiumoxidpartikeln mittels eines intraoralen Sandstrahlers abgestrahlt. Mit dieser Methode kann zudem die Schmierschicht auf der Füllungsoberfläche nach der Verwendung von Diamantfräsern entfernt werden. Der positive Effekt des Sandstrahlen der Füllung wird nur durch zusätzliches Auftragen eines Adhäsives erreicht (Bouschlicher et al., 1997).

Eine makromechanische Retention der Reparaturfüllung durch erzeugte Unterschnitte oder Schwalbenschwanzpräparationen macht keinen Sinn. Frankenberger et al. (2003) konnten dies in einer Studie zur Geometrie der Präparation für eine Reparaturfüllung zeigen, da aufgrund des höheren C-Faktors eine größere innere Spannung der Reparaturfüllung resultiert. Dies hat abnehmende Haftwerte zu der umliegenden Zahnhartsubstanz oder Füllungsmaterialien zufolge.

Das Auftragen von Phosphorsäure auf die Füllungsoberfläche hat auf den Verbund der Reparatur nur einen geringen bis gar keinen Einfluss (Fawzy et al., 2008; Bonstein et al., 2005). Durch ein derartiges Konditionieren der Füllung kann nur eine zusätzliche Reinigung der Oberfläche erreicht werden. Die primäre Indikation für die Verwendung einer 37 % Phosphorsäure ist eher die Entfernung der Schmierschicht auf Schmelz und Dentin und deren Oberflächenvergrößerung sowie Erhöhung der Benetzbarkeit (Hellwig et al.,

2013). Dennoch besteht die Gewissheit, dass ein ungewolltes Applizieren der Phosphorsäure auf die Füllungsoberfläche keine haftkraftmindernden Auswirkungen hat (Loomans et al., 2011).

Eine Vorbehandlung der zu reparierenden Füllung mit Flusssäure besitzt je nach Art des Füllungsmaterials eine unterschiedliche Wirkung. Zu Mikrohybridkompositen konnten in einer Studie die Haftwerte dadurch gesteigert werden, jedoch war der Verbund zu siloran-basierten Kompositen signifikant schlechter (Wiegand et al., 2012). Der Kontakt der Flusssäure auf Dentin und Schmelz muss bei der Applikation unbedingt vermieden werden, da dies in signifikant geringere Haftwerte für den Verbund zu der Füllung resultiert (Loomans et al., 2010). Auf das umliegende Gewebe des Zahnes, wie zum Beispiel die Gingiva oder Mukosa, wirkt die Flusssäure als starkes Kontaktgift, das eine fortschreitende Gewebezerstörung mit großen Schmerzen auslösen kann (Ohata et al., 2005). Daher sollte Flusssäure nur unter Verwendung eines Kofferdams (Spanngummi zur Isolation eines Zahnes zur restlichen Mundhöhle) und absoluter Trockenlegung aufgetragen werden. Durch den höheren Aufwand und negativen Auswirkungen auf Schmelz und Dentin kommt die Flusssäure als Vorbehandlungsmaßnahme nicht in Betracht.

Der wichtigste Parameter für den Verbund zu einer insuffizienten Füllung ist die Applikation eines Adhäsivs (Valente et al., 2016). Die Monomere des Adhäsivs können in die bereits polymerisierte Matrix der bestehenden Füllung infiltrieren und so einen mikromechanischen Verbund herstellen. Die wachsenden Polymerketten des Adhäsivs vernetzen sich während der Lichthärtung mit den Polymerketten der bestehenden Füllung (Tezvergil et al., 2003). Eine chemische Verbindung durch direkte Verlängerung der Polymerketten ist unwahrscheinlich, da die freien Doppelbindungen mit dem Alter der Kompositfüllung kontinuierlich abnehmen (Kamann und Gängler, 2000). Diese Art der Verbindung ist nur bei einer Reparatur bzw. Korrektur der Füllung in der gleichen Sitzung, in der die Primärfüllung gelegt wurde, zu erwarten. Die Art des verwendeten Adhäsivs, ob Mehrschrittsysteme, selbstkonditionierende, selbstprimende oder Universaladhäsive, ist zu vernachlässigen, da alle Arten ähnliche Haftwerte erreichen (Rathke et al., 2009; Iversen et al., 2011).

1.2 Werkstoffklassen der Füllungsmaterialien

Im folgenden theoretischen Teil sollen die Werkstoffgruppen beschrieben werden, aus denen das Komposithybrid eine Mischung bildet. Das selbstadhäsive Komposithybrid *Surefil oneTM* kombiniert dabei die geringe Techniksensitivität des Glasionomerzements in Bezug auf Selbstadhäsion und Bulk-Fill-Eignung mit der Verschleißfestigkeit eines Komposits (Latta et al., 2020a). Vertreter der jeweiligen Werkstoffgruppe werden in dieser Studie als Füllungsmaterial für die zu reparierende Füllung verwendet. Dabei soll die Auswirkung der unterschiedlichen Füllungsmaterialzusammensetzung und die daraus möglichen resultierenden Bindungsarten auf die Verbundhaftwerte betrachtet werden.

1.2.1 Glasionomerzemente

Glasionomerzemente, auch als Polyalkenoatzemente bezeichnet, basieren auf einer Weiterentwicklung des Silikatzementes. Sie wurden in den späten 1960er Jahren im Laboratory of the Government in London entwickelt (Wilson und Kent, 1972). Dabei war das Hauptaugenmerk, die Pulpentoxizität der Silikatzemente durch deren hohen Anteil an Phosphorsäure zu reduzieren und schwächere Säuren wie die Polycarbonsäuren zu verwenden.

Das Indikationsspektrum umfasst die Versorgung von dentin- und zementbegrenzten Klasse-V-Kavitäten, Klasse-II-Kavitäten im Milchzahngebiss und interimsmäßige Versorgung von Klasse-II-Kavitäten im bleibenden Gebiss. Als permanente restaurative Versorgung im Seitenzahnbereich bleibender Zähne sind Glasionomerzemente aufgrund ihrer niedrigen Biegefestigkeit von 15-20 MPa, im Vergleich zu circa 100 MPa von Kompositen, nicht geeignet (Marolf, 1984). Des Weiteren kann die Befestigung von indirekten Restaurationen als zusätzliche Indikation genannt werden (Hellwig et al., 2013). Eine hochvisköse Variante der Glasionomerzemente wird speziell in Entwicklungsländern zur Kariestherapie verwendet, da dort nicht immer das technische Equipment für eine korrekte Kavitätenpräparation und Kariesexkavation zur Verfügung steht (Dorri et al., 2017). Zusätzlich kann die Fluoridabgabe der Glasionomerzemente Sekundärkaries vorbeugen.

1.2.1.1 Zusammensetzung

Die konventionellen Glasionomerzemente bestehen aus drei Bestandteilen: einem anorganischen Anteil bestehend aus einem Kalzium-Aluminium-Silikat-Glas, einem organischen Anteil aus einer Polycarbonsäure bzw. Polyacrylsäure und ggf. weiteren Kopolymeren und einem dritten Anteil, der den Flüssigkeitsanteil bildet. Dieser kann aus destilliertem Wasser oder wässriger Weinsäure bestehen (Kappert und Eichner, 2008).

Die Glaskomponente besitzt zusätzlich noch einen Fluorid- und Strontiumanteil. Fluorid setzt einerseits beim Herstellungsprozess die Fusionstemperatur der Gläser herab und wirkt andererseits im abgebundenen Zustand der Füllung kariesprotektiv. Diese antikariogene Fähigkeit resultiert aus der Freisetzung von Fluoridionen aus der Füllung, die wie ein „Akku“ durch Fluoridierungsmaßnahmen wieder aufgeladen werden kann. Mit längerer Liegedauer der Füllung nimmt der Ionenaustauschprozess jedoch immer mehr ab (Rolim et al., 2019). Der Strontiumanteil dient dazu, die Radioopazität des Füllungsmaterials zu erhöhen.

Der organische Anteil liegt meist in gefriergetrockneter Form vor und kann so dem pulvrigen anorganischen Anteil beigemischt werden. Dadurch ist eine genaue Dosierung zur wässrigen Komponente erleichtert. Als Kopolymere neben der Polyacrylsäure finden sich Malein- und Itakonsäure in der Zusammensetzung. Diese verhindern ein vorzeitiges Gellieren und beschleunigen die Abbindereaktion (Wilson und McLean, 1988).

Der dritte Anteil, die Flüssigkeitskomponente, setzt nach Aktivierung bzw. Mischen des Glasionomerzementes die Säure-Base- bzw. Abbindereaktion in Gang.

1.2.1.2 Abbindereaktion

Die Abbindereaktion der Hauptbestandteile erfolgt in einer Säure-Base-Reaktion, bei der die freigesetzten Protonen der Polyacrylsäure von dem Kalzium-Aluminium-Silikat-Glas aufgenommen werden und sich im Gegenzug Aluminium- und Kalziumionen aus dem Glas lösen. Die Kalziumionen werden dabei schneller gelöst und liegen in einer höheren Konzentration vor. Daher reagieren die positiv geladenen Kalziumionen zuerst mit der negativ geladenen Polyacrylsäure und vernetzen diese durch Kalziumbrücken. In dieser anfänglichen Abbindephase, die nach ungefähr 10 min eintritt, entsteht so ein Kalzium-Polykarboxylatgel (Marxkors et al., 2008). Dieses ist sehr feuchtigkeitsempfindlich. Daher

ist es angezeigt, die Füllungsoberfläche mit einem speziellen Lack oder Bonding zu schützen. Ein zu hoher Flüssigkeitskontakt in dieser Abbindephase hat eine verlängerte Abbindereaktion, verringerte Druckfestigkeit und Härte sowie Verlust der Transluzenz zufolge (Hellwig et al., 2013).

Durch die verzögerte Einlagerung der Aluminiumionen in die Matrix kommt es zur Bildung des dreidimensional vernetzten Kalzium-Aluminium-Polykarboylatgels, zu einer Reduktion der Feuchtigkeitsempfindlichkeit und zu einer Stabilisierung des Komplexes. Der Abschluss dieser zweiten Abbindephase ist nach circa 24 h erreicht.

1.2.1.3 Adhäsive Verbindung zu der Zahnhartsubstanz

Da für den Haftmechanismus der Glasionomerzemente keine weiteren Haftvermittler bzw. Adhäsivsysteme und keine absolute Trockenlegung benötigt werden, besitzen sie eine geringe Techniksensitivität in ihrer Verarbeitung. Die Entfernung der Schmierschicht nach Präparation der Kavität und Exkavation der Karies ist für einen guten Verbund zur Zahnhartsubstanz jedoch unausweichlich (Rai et al., 2017). Dazu sind die Verwendung feiner Rotring-Diamantfräser oder eine Konditionierung der Oberfläche mit 10 %iger Polyacrylsäure indiziert, um eine saubere und gut benetzbare Oberfläche als Notwendigkeit für einen guten Verbund zu schaffen (Mount, 1998).

Die chemische Bindung zur Zahnhartsubstanz erfolgt dabei über ionische und kovalente Bindungen zwischen den Carboxylgruppen der Polyacrylsäure, die nicht in die Bildung des dreidimensionalen Netzwerks involviert sind, und den anorganischen Bestandteilen des Hydroxylapatit von Dentin und Schmelz. Dabei sind die erreichten Haftwerte an Dentin nur halb so groß wie an Schmelz (Lohbauer und Krämer, 2009). Die Haftwerte zum Schmelz betragen circa 5 MPa und liegen somit das drei- bis sechsfache unter den Haftwerten, die mittels eines Adhäsivs in Kombination mit einem Komposit erreicht werden.

1.2.1.4 Modifikationen

Ab Mitte der 80er Jahre des letzten Jahrhunderts hat man durch verschiedene Modifikationen in der Zusammensetzung versucht die Eigenschaften der konventionellen Glasionomerzemente zu optimieren. Fokus wurde dabei auf eine Verbesserung der Biegefestigkeit und Abrasionsbeständigkeit gelegt.

Ein Ansatz war es durch Sinterung Metallpartikel in den Glasanteil einzuschmelzen. Werden in dieser Art und Weise behandelte Gläser als anorganischer Bestandteil des Glasionomerzementes verwendet, bezeichnet man diese als metallverstärkte Glasionomerzemente oder Cermet-Zemente (McLean und Gasser, 1985). Diese Abkürzung setzt sich aus „ceramic“ und „metal“ zusammen. Studien zur Erprobung dieser Cermet-Zemente ergaben jedoch, dass dies zu keiner wesentlichen Verbesserung der Werkstoffparameter führte (Hickel und Voss, 1988).

Ende der 80er wurden durch Anlagerung von Methacrylatgruppen an die Polyacrylsäure eine bessere Steuerung der Abbindereaktion und eine Steigerung der Biegefestigkeit erzielt (Frankenberger und Krämer, 1999). Zusätzlich wurde ein photopolymerisierbares Monomer als Bestandteil hinzugefügt. Dies war meist HEMA (Hydroxy-Ethyl-Methacrylat) (Attin et al., 1996). Durch die Modifikation wurde diese Art der Glasionomerzemente, die als kunststoffmodifizierte Glasionomerzemente bezeichnet werden, dualhärtend. Neben der beginnenden lichtinduzierten Polymerisation, die zusätzlich die Feuchtigkeitsempfindlichkeit herabsetzt, erfolgt über einen längeren Zeitraum die Säure-Basen-Reaktion als bei den konventionellen Glasionomerzementen (Marxkors et al., 2008).

Eine weitere Abwandlung der konventionellen Glasionomerzemente sind die hoch viskösen oder stopfbaren Glasionomerzemente. Verwendung finden sie vor allem bei der ART-Technik (= „atraumatic restorative treatment“), die, wie oben bereits erwähnt, bei mangelnden elektrischen Equipment in Entwicklungsländern genutzt werden (Hellwig et al., 2013). Dabei wurde die Viskosität des Materials durch Verwendung kleinerer Korngrößen und Zugabe von gefriergetrockneter Polyacrylsäure in das Pulver erhöht, sodass es stopfbar wurde (Frankenberger und Krämer, 1999). Weitere Vorteile im Vergleich zu den konventionellen Glasionomerzementen sind eine bessere Abrasionsbeständigkeit und eine erhöhte Biegefestigkeit und Ermüdungsresistenz (Lohbauer und Krämer, 2009).

1.2.2 Komposit

Komposite sind die Weiterentwicklung von zuvor verwendeten Polymethylmethacrylaten. 1962 entwickelte Bowen ein neuartiges Füllungsmaterial, das auf einer Kombination eines Epoxidharzes und der Methylmethacrylsäure basierte. Dieses neue Monomer wird als Dimethacrylat bzw. Bis-GMA (= Bisphenol A Diglycidylmethacrylat) bezeichnet. Dadurch

gelang es die Polymerisationsschrumpfung und Abrasionsbeständigkeit der zuvor verwendeten PMMA-Kunststoffe zu verbessern (Hellwig et al., 2013).

Die heutigen Komposite weisen aufgrund ihrer guten Ästhetik und physikalischen Eigenschaften einen universellen Indikationsbereich auf. Sie werden als direktes oder indirektes Restaurationsmaterial oder zur Befestigung von Wurzelkanalstiften, Inlays, Kronen, Brücken oder kieferorthopädischen Apparaturen verwendet.

1.2.2.1 Zusammensetzung

Der Begriff Komposit stammt aus dem Englischen und heißt übersetzt Verbundwerkstoff. Dabei wird der Verbund der organischen Matrix zu den anorganischen Füllstoffen durch die Verwendung von Silan (= Methacryloxypropyl-trimethoxysilan) als Haftvermittler erreicht.

Als organische Matrix werden neben Bis-GMA auch UDMA (Urethandimethacrylat) als Monomer verwendet, da dieser eine geringere Hydrophilie besitzt und somit eine geringere Kompositquellung unter intraoralen Verhältnissen erreicht wird (Roeters et al., 2009). Als Verdünner werden Monomere wie TEGDMA (Triethylenglycoldimethacrylat) benutzt, die die Viskosität des Komposits herabsetzen (Frankenberger et al., 2021). Entsprechend den unterschiedlichen Polymerisationstypen, ob Auto- und/oder Photopolymerisation, sind verschiedene Initiatoren beigefügt.

Die anorganischen Füllstoffe werden auch als disperse Phase bezeichnet. Die Füllstoffe bestehen aus Quarz, Glas und Keramik und lassen sich je nach Größe in Makro- und Mikrofüller differenzieren. Sie sind maßgeblich für die physikalischen Eigenschaften, die Polymerisationsschrumpfung und die Verarbeitungsfähigkeit verantwortlich (Frankenberger et al., 2021).

Das Silan kann durch seine Methoxylgruppen eine Bindung zu dem Silizium in der Oberfläche der Füllstoffe eingehen. Die Doppelbindungen dieses Moleküls beteiligen sich zusätzlich an der Polymerisation der organischen Matrix und können so den Verbund der zwei Phasen herstellen (Marxkors et al., 2008).

Weitere Bestandteile der Komposite sind Stabilisatoren, die einen vorzeitigen Polymerisationsstart inhibieren, Pigmente, die durch Zugabe von Metalloxide zur Farbgebung dienen, und weitere Additiva wie optische Aufheller und Lichtschutzmittel (Hellwig et al., 2013).

1.2.2.2 Polymerisation

Die Abbindereaktion bzw. Polymerisation kann je nach Komposit durch eine lichtinduzierte oder chemische Reaktion gestartet werden. Bei der Photopolymerisation ist der organischen Phase Kampferchinon als Initiator-molekül beige-fügt, das nach Lichtinduktion Radikale bildet, die das Kettenwachstum starten. Für die chemische oder Autopolymerisation ist der organischen Phase Benzoylperoxid beige-mengt, das durch Mischung mit einem weiteren Aktivator ebenfalls Radikale bildet. Bei manchen Kompositen sind auch beide Initiatorarten beinhalten, um eine Aushärtung in größeren Schichten oder in für ein LED-Polymerisationsgerät schwerzugänglichen Bereichen zu gewährleisten (Guggenberger und Weinmann, 2000).

Die gebildeten Radikale reagieren mit den Doppelbindungen der Monomere. Bei dieser Reaktion entstehen neue Radikale und das Kettenwachstum bzw. die Polymerisation wird gestartet. Es reagieren nie alle Monomere und es kommt somit nicht zu einer kompletten Aushärtung. Der Konversionsgrad gibt den Anteil der umgewandelten Doppelbindungen der Monomere an und liegt in etwa bei 50-75 % (Daronch et al., 2005). Dem gegenüber steht der Restmonomergehalt, der die nicht an der Polymerisation beteiligten Monomere einschließt. Für möglichst gute physikalische und biokompatible Eigenschaften des Komposits ist ein hoher Konversionsgrad bzw. niedriger Restmonomergehalt nach der Aushärtung anzustreben (Peutzfeldt, 1997).

Durch die Öffnung der Doppelbindung und Polymerisation der Monomere lagern sich diese enger zusammen als im nicht ausgehärteten Zustand. Diese Volumenabnahme wird als Polymerisationsschrumpfung bezeichnet, die bei modernen Kompositen zwei bis drei Volumenprozent beträgt (Schmalz und Arenholt-Bindslev, 2004). Diese führt zu erhöhte Spannungen innerhalb des Komposits und kann zu einer schlechteren Randadaption der Füllung führen (van Dijken und Pallesen, 2014).

Sauerstoff wirkt bei der Polymerisation als Inhibitor, sodass die oberflächliche Schicht der Kompositfüllung nicht vollständig aushärtet. Diese enthält nicht reagierte Monomere, die für eine weitere Polymerisation genutzt werden können (Shawkat et al., 2009). In der Inkrementtechnik oder bei Reparaturfüllung, die innerhalb der ersten 14 Tagen erfolgen, kann so ein weiteres Wachstum der Polymerketten erfolgen. Nach 14 Tagen nehmen die

oberflächlichen Restmonomere und somit die Anzahl ungesättigter Doppelbindungen signifikant ab (Dall'Oca et al., 2007).

1.2.2.3 Adhäsivtechnik

Im Gegensatz zu den hydrophilen Glasionomerkomponenten benötigen die hydrophoben Komposite einen Haftvermittler bzw. ein Adhäsiv, das den Verbund zum hydrophilen Dentin herstellt. Der Verbund zum hydrophoben Schmelz ist theoretisch ohne Haftvermittler möglich. Dieser Haftvermittler baut hauptsächlich eine mikromechanische Retention auf. Daneben sind außerdem chemische Bindungen möglich, die jedoch eine untergeordnete Rolle spielen (Poitevin et al., 2013). Die Basis für die Adhäsivtechnik schaffte Buonocore Mitte der 1950er Jahre. Dabei stellte er fest, dass durch eine Vorbehandlung der Schmelzoberfläche mit Phosphorsäure Prismen aus dieser gelöst werden und eine Oberflächenvergrößerung und gesteigerte Benetzbarkeit resultiert (Buonocore, 1955). Dies ermöglicht, dass ungefüllte und gefüllte Adhäsive Tags und eine interkristalline Haftung aufbauen (Van Meerbeek, 2010). Der Schmelz-Adhäsiv-Verbund ist im Vergleich zum Dentin-Adhäsiv-Verbund als besser einzustufen. Der Verbund zum Dentin ist bedeutend schwieriger zu bewerkstelligen. Gründe dafür sind einerseits der verringerte Prismenanteil und andererseits die hydrophile Eigenschaft des Dentins. Die Hydrophilie entsteht durch die Dentintubuli, die Odontoblastenfortsätze sowie den ausströmenden Dentinliquor, der die extrazelluläre Flüssigkeit der Pulpa darstellt (Schroeder, 2000). Des Weiteren muss die bei der Präparation entstandene Schmierschicht durch Verwendung von Phosphorsäure für einen guten Verbund entfernt werden. Die Ätzung der Phosphorsäure legt zudem das Kollagennetzwerk und den oberflächlichen Bereich der Dentintubuli frei. Dies kann von einem Primer, der hydrophile Monomere enthält, infiltriert werden. Der infiltrierte Bereich des Kollagennetzwerkes wird als Hybridschicht bezeichnet und hat einen größeren Einfluss auf die Verbundkraft als die in den Dentintubuli entstehenden Tags oder Zotten (Hellwig et al., 2013). Als nächster Schritt wird ein Adhäsiv aufgetragen, das an die Methacrylat-Gruppen der hydrophilen Monomere des Primers bindet. Die oben beschriebene Adhäsivtechnik wird als Etch-and-Rinse-Technik beschrieben, da nach der Ätzung die Präzipitate weggespült werden. Eine neuere Variante der Adhäsivtechnik ist die Self-Etch-Technik, bei der Adhäsive, die milde Säuren beinhalten, verwendet werden. Diese

Säuren besitzen ebenfalls eine Ätzwirkung auf die Oberfläche, sodass eine Oberflächenvergrößerung und partielles Auflösen der Schmierschicht entsteht. Die gelösten Bestandteile werden jedoch nicht weggespült und somit in die Adhäsivschicht integriert (Van Meerbeek et al., 2020). Für das Dentin erreichen Self-Etch-Adhäsive vergleichbare Haftwerte im Vergleich zu einer Etch-and-Rinse-Verwendung. Im Verbund zum Schmelz soll jedoch eine vorhergehende Konditionierung mit Phosphorsäure erfolgen. Dies wird als Selectiv-Etch-Technik bezeichnet, da die Dentinoberfläche im Gegensatz zu der oben beschriebenen Total-Etch-Technik ausgespart wird (Yamauchi et al., 2019). Als Universaladhäsive werden Haftvermittler bezeichnet, die selbstkonditionierend sind, in einem einzigen Schritt aufgetragen werden und zudem den Verbund zu anderen Werkstoffen wie Metall, Zirkoniumdioxid oder Silikatkeramik herstellen können (Cardoso et al., 2019).

1.2.2.4 Modifikationen

Durch mehrere Veränderungen in der Zusammensetzung der Komposite hat man versucht die Verarbeitungsfähigkeit und physikalischen Eigenschaften der Komposite stetig zu verbessern. Je nach Größe des Durchmessers der verwendeten anorganischen Füllkörper und des Füllkörpergehalt werden die Komposite weiter klassifiziert. Hierbei werden konventionelle Makrofüller- von Mikrofüller-, Hybrid- und modernen Nanofüllerkompositen unterschieden. Die Durchmesser der Füllkörper erstrecken sich von 5-10 µm bei Makrofüller bis zu 7-40 nm bei Nanofüllerkompositen. Der Füllkörpergehalt der modernen Nanofüllerkompositen beträgt circa 85 Gew.-% (Hellwig et al., 2013).

Durch die Nutzung eines neuartigen Monomersystems konnte bei den Siloranen die Polymerisationsschrumpfung auf unter 1 % reduziert werden (Weinmann et al., 2005). Die Bezeichnung Siloran leitet sich aus den beiden Bestandteilen Siloxan, ein Silikon, und Oxiran, ein Epoxid, ab (Guggenberger und Weinmann, 2000). Die Polymerisation bei den Siloranen läuft nicht wie bei den konventionellen Kompositen radikalisch, sondern kationisch ab. Während der Polymerisation kommt es zu einer Ringöffnung der Oxirane, die in einer geringeren Volumenreduktion als bei den konventionellen Kompositen resultiert (Borges et al., 2012; Papadogiannis et al., 2009). Aufgrund der Verwendung andersartiger Monomere muss ein speziell abgestimmtes Adhäsivsystem verwendet werden (Mine et al., 2010). Eine Reduktion der Polymerisationsschrumpfung wird zudem bei den ormocer-basierten Kompositen erreicht. Ormocere sind organisch modifizierte, nichtmetallische

anorganische Werkstoffe (= organically modified ceramic) (Erdilek et al., 2009; Hennig et al., 2004). Die ormocerbasierten Komposite bestehen aus einem anorganischen vorpolymerisierten Netzwerk, in das polymerisierbare organische Methacrylatgruppen eingebracht sind. Während der Polymerisation entsteht dadurch ein zweites Netzwerk aus den organischen Monomeren. Aus diesem lassen sich weniger Restmonomere als aus konventionellen Kompositen eluieren. Daher besitzen ormocerbasierte Komposite eine hohe Biokompatibilität (Marxkors et al., 2008).

Eine andere Weiterentwicklung sind die Kompomere. Kompomere sind Polyalkensäure modifizierte Komposite. Sie bilden ein Hybrid aus Kompositen und Glasionomorzementen (Krejci et al., 1995). Im Unterschied zu den kunststoffmodifizierten Glasionomorzementen, die ein Zwei-Komponenten-Material sind, enthalten sie als Ein-Komponenten-Material kein Wasser im System. Wasser wird für die Säure-Basen-Reaktion benötigt. Die Adhäsion an der Zahnhartsubstanz muss dabei ebenfalls über ein Adhäsivsystem erfolgen. Die Säure-Base-Reaktion kann erst nach der radikalischen Polymerisation ablaufen. Während der radikalischen Polymerisation muss das Kompomermaterial vor Wasserkontakt geschützt werden (Zimmerli et al., 2010). Somit kann die Säure-Basen-Reaktion lediglich an der Oberfläche, die Kontakt zu Speichel hat, erfolgen. Diese hydrophile Eigenschaft ermöglicht es Fluorid aus dem anorganischen Glasanteil der Glasionomerkomponente abzugeben. Die Fluoridabgabe liegt bis zu dem sechsfachen über der Fluoridabgabe der Komposite, aber bis zu dem zehnfachen unter dem Wert, den konventionelle Glasionomorzemente erreichen (Hellwig et al., 2013).

Eine neuere Modifikation zeigt sich in den selbstadhäsiven Kompositmaterialien, die ohne ein Adhäsivsystem in der Verarbeitung auskommen. Um einen Verbund zur Zahnhartsubstanz herstellen zu können besitzen sie spezielle funktionelle Monomere. Durch saure Phosphat- oder Carboxylatgruppen kann eine mikroretentive Oberfläche geschaffen und gleichzeitig eine chemische Bindung zu Calciumionen des Hydroxylapatits der Zahnhartsubstanz eingegangen werden (Oltramare et al., 2022). In Studien, die die Haftkräfte zu Schmelz und Dentin untersuchten, wurden im Vergleich zu einem herkömmlichen Komposit, das in Kombination mit einem Adhäsivsystem verarbeitet wurde, deutlich niedrigere Werte erreicht (Vichi et al., 2013). Ein befriedigendes Randverhalten wurde nur bei kleinen schmelzbegrenzten Kavitäten festgestellt (Gorseta et al., 2019).

1.2.3 Komposithybrid

Die neuartige Werkstoffklasse der Komposithybride, der das selbstadhäsive Füllungsma-
terial *Surefil one*TM laut Herstellerangaben zuzuordnen ist, besitzt eine enge Verwandt-
schaft zu den oben beschriebenen kunststoffmodifizierten Glasionomern, den Kom-
pomeren und den selbstadhäsiven Kompositen. Eine Differenzierung besteht jedoch in
der besseren Verbindung zwischen dem kovalenten Netzwerk, das während der radikali-
schen Polymerisation entsteht, und dem ionischen Netzwerk, das durch die Säure-Basen-
Reaktion entsteht (Klee et al., 2020).

1.2.3.1 Zusammensetzung



Abb. 1: Zusammensetzung der Mischkapsel von *Surefil one*TM

Die Zusammensetzung der Komposithybride soll nachfolgend anhand der Betrachtung
von *Surefil one*TM dargelegt werden. *Surefil one*TM ist ein Zwei-Komponenten-Material und
besteht aus einem pulvrigen und einem wässrigen Hauptteil. Einer der wesentlichen Be-
standteile des organischen Anteils ist eine Polyacrylsäure, die polymerisierbare Gruppen
besitzt. Der Hersteller bezeichnet dies als modifiziertes Polysäure-System (=MOPOS).
Über die funktionellen sauren Gruppen ist das Monomer an der Haftung zur Zahnhart-
substanz beteiligt und gleichzeitig auch zur Bindung der Füllkörper (Firma Densply Sirona,

2022a). Zusätzlich kann es durch die polymerisierbaren Gruppen eine Verbindung zum radikalisch polymerisierten Netzwerk eingehen. Ein weiterer Bestandteil sind Verdünner, die sich von TEGDMA der konventionellen Composite unterscheiden. Aufgrund der Poly-säuren in diesem Füllungsmaterial müssen wasserlösliche und hydrolysestabile Mono-mere verwendet werden. Der verwendete Verdünner wird als BADEP (N,N'-Bis-ac-rylamido-N,N'-diethyl-1,3-propandiamin) bezeichnet und besitzt zwei polymerisierbare Gruppen sowie hydrolysestabile Amidbindungen. BADEP findet durch seine hydrolyse-stabile Eigenschaft zudem Verwendung in einigen Self-Etch- und Universaladhäsiven (Firma Densply Sirona, 2022b). Den anorganischen Anteil bilden reaktive und nicht reak-tive Glasfüller. Als reaktive Glasfüller wird Aluminium-Phosphor-Strontium-Natrium-Fluo-ro-silikatglas ähnlich der Glasionomerzemente und als nicht reaktive Glasfüller silanisier-tes hochdisperses Siliziumdioxid verwendet. Weitere Bestandteile sind die Initiatoren Kampferchinon und Kaliumperoxodisulfat, die die radikalische Polymerisation durch Bil-dung von Radikalen starten können. Außerdem sind Stabilisatoren und Ytterbiumfluorid, das die Röntgenopazität erhöht, in der Zusammensetzung vorhanden (Yao et al., 2020b).

1.2.3.2 Abbbindereaktion

Surefill oneTM ist wie oben geschildert ein Zwei-Komponenten-Material, das dualhärtend ist. Die selbsthärtende Reaktion wird direkt nach dem Anmischen aktiviert. Die Selbsthär-tung wird durch die Säure-Basen-Reaktion, wie bei den Glasionomerzementen, und die radikalische Polymerisation, die mithilfe der von Kaliumperoxodisulfat gebildeten Radika-len gestartet wird, erreicht. Mittels eines LED-Polymerisationsgerätes kann zusätzlich die Lichthärtung in dem Bereich des Materials induziert werden, der nicht mehr als 4 mm von der Bestrahlungsoberfläche entfernt ist. Der lichtempfindliche Initiator Kampferchinon wird durch die Bestrahlung aktiviert und reagiert mit Reduktionsmitteln unter Ausbildung wei-terer Radikale (Firma Densply Sirona, 2022a). Die auf die Weise initiierte radikalische Polymerisation ist schneller als die der Selbsthärtung, sodass nach der Belichtungszeit die Füllung sofort ausgearbeitet werden kann. Die Dauer der Selbsthärtung beträgt nach Herstellerangaben 6 min. Das MOPOS verknüpft dabei über die reaktiven Doppelbindun-gen und die Carbonsäuregruppen das ionische Netzwerk und das kovalente Netzwerk. Außerdem werden die Glasfüller über ionische Interaktionen in die Matrix eingebaut (Fran-cois et al., 2020). Zusätzlich wirkt BADEP mit seinen polymerisierbaren Gruppen als ein

weiterer Vernetzer des kovalenten Netzwerkes. Diese Verlinkungen führen im Vergleich zu anderen kunststoffmodifizierten Glasionomern zu einer besseren mechanischen Festigkeit (Lohbauer und Belli, 2020). Mit Beginn der Säure-Basen-Reaktion werden zudem die Metallionen aus dem Aluminium-Phosphor-Strontium-Natrium-Fluorosilikatglas gelöst und das Füllungsmaterial kann Fluoridionen an seine wässrige Umgebung abgeben und so Sekundärkaries verhindern (Francois et al., 2020). In einer Untersuchung zur Toxizität des Materials konnten im abgebundenen Zustand keine austretenden Restmonomere nachgewiesen werden, was auf eine gute Biokompatibilität schließen lässt (Marigo et al., 2022).

1.2.3.3 Adhäsive Verbindung zu der Zahnhartsubstanz

Für den Verbund zu der Zahnhartsubstanz wird kein weiterer Haftvermittler benötigt, da das Material selbstadhäsiv ist. Wie bei der Applikation eines Glasionomernzementes ist es wichtig, die Schmierschicht auf der präparierten Zahnhartsubstanz zu entfernen. Latta und Radniecki (2020) konnten in ihrer Studie feststellen, dass die Haftwerte bei belassener Schmierschicht geringer sind als bei einer Zahnoberfläche ohne Schmierschicht. Laut Herstellerangaben sollen die Polysäuren des MOPOS die Oberfläche von Dentin und Schmelz durch ihre Ätzwirkung anrauen, sodass eine mikroretentive Verankerung möglich wird. Van Meerbeek et al. (2020) stellten in elektronenmikroskopischen Untersuchungen der Grenzflächen zwischen Füllungsmaterial und Zahnhartsubstanz jedoch nur sehr geringe Anzeichen für eine Demineralisation und Ausbildung einer Hybridschicht fest. Durch die Carbonsäuregruppen der Polyacrylsäuren erfolgt eine ionische Bindung zu den anorganischen Bestandteilen von Schmelz und Dentin. Die Haftwerte, die im Verbund zur Zahnhartsubstanz ermittelt wurden, betrugen circa 15 MPa (Yao et al., 2020a). Daher ist es in Hinblick auf die Haftwerte über den Glasionomernzementen und unter den Kompositen einzuordnen.

1.3 Ziel der vorliegenden Arbeit

Ziel der Arbeit ist es, den Verbund, den das neuartige selbstadhäsive Komposithybrid *Surefil oneTM* als Reparaturmaterial bei der Therapie von insuffizienten Füllungen erreichen kann, zu bestimmen. Dabei soll der Einfluss von unterschiedlichen Vorbehandlungsmaßnahmen, die im klinischen Alltag gebräuchlich sind, eingeschätzt werden, um eine

Empfehlung für die erfolgversprechendste Methode zu geben. Als Vorbehandlungsmaßnahmen sollen das Anrauen durch Beschleifen, das Abstrahlen der bestehenden Füllung und das Auftragen eines selbstkonditionierenden Universaladhäsives dienen. Diese In-vitro-Untersuchung betrachtet außerdem die Konsequenz der Alterung auf den Verbund, indem die Probenkörper in einem Thermocycler bei 5 °C und 55 °C künstlich gealtert werden. Als reparationsbedürftige Füllung sollen Materialien aus den Werkstoffgruppen Glasionomerzement, Komposit und Komposithybrid verwendet werden. Die unterschiedliche Auswirkung auf den Verbund soll auch dabei betrachtet werden. Parallel zu jeder Prüfgruppe soll eine Kontrollgruppe durchgeführt werden, um den Einfluss der jeweils gewählten Vorbehandlungsmethode und des Materials abschätzen zu können.

2. Material und Methoden

Die bei der Untersuchung der Scherkraft verwendete Methodik gemäß DIN EN ISO 29022:2013 (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013) und die Herstellung der Prüfkörper soll in diesem Kapitel erläutert werden. Dazu sollen zuerst die verwendeten Materialien betrachtet werden. Um diese Studie unter standardisierten Laborbedingungen durchzuführen, wurden nur Materialien derselben Charge verwendet und es wurde strikt auf einen identischen Herstellungs- und Auswertungsprozess geachtet. Dabei wurden alle Materialien nach Anleitung des Herstellers verarbeitet.

Tab. 1: Angaben zu den verwendeten Materialien

Material	Referenznummer	Lot/Charge	Verfallsdatum
<i>ChemFil® Rock</i>	606.06.592	2009000134	2023-05-31
<i>Ceram.x Spectra™ ST</i>	607.01.552N	2107000219	2024-06-30
<i>Surefil one™</i>	603.00.302	2106000301	2022-12-31
<i>Prime&Bond active®</i>	606.67.341	2107000340	2023-06-30

2.1 Verwendete Materialien

2.1.1 *ChemFil® Rock*

ChemFil® Rock (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) ist ein Füllungsmaterial und gehört der bereits geschilderten Werkstoffklasse der Glasionomerzemente an. Laut Herstellerangaben liegt die Indikation hauptsächlich in der Verwendung als semipermanentes Füllungsmaterial im Seitenzahnbereich. Dabei zeichnet es sich als ein hochfestes Material aus, das eine Randdichtigkeit in Schmelz und Dentin vergleichbar zu Komposit und eine Widerstandsfähigkeit gegenüber Fraktur und Abrasion besitzt (Firma Dentsply Sirona, 2022c).

2.1.2 *Ceram.x Spectra™ ST*

Ceram.x Spectra™ ST (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) ist dem im theoretischen Teil aufgeführten Klasse der Komposit-Füllungsmaterialien zuzuordnen. Dieses ist als direktes und indirektes Restaurationsmaterial geeignet. Dabei besitzt es die Eigenschaften, dass es eine gute Adaption an die Kavitätenränder und eine hohe Standfestigkeit erfüllt. Dies wird durch eine neuartige *SphereTEC®* Füllertechnologie erreicht, die kugelförmige, granuliert Glaspartikeln beinhaltet, die kleiner als einen Mikrometer sind (Firma Dentsply Sirona, 2018).

2.1.3 *Surefil one™*

Surefil one™ (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) ist das in dieser Studie zu untersuchende Füllungsmaterial, auf das im theoretischen Teil bereits eingegangen wurde. Nach Angaben des Herstellers ist es als selbstadhäsives Komposit einzuordnen. Dieses haftet ohne ein weiteres Adhäsivsystem an Schmelz und Dentin. Daneben setzt es Fluoridionen frei, die kariesprophylaktisch wirken. Die Abbindeung des Füllungsmaterials kann dualhärtend erfolgen. Aufgrund dieser Eigenschaft ist *Surefil one™* zum Füllen ohne Schichten geeignet. Die alleinige chemische Aushärtung beträgt nach Aktivierung der Kapsel gemäß ISO 9917-2 für Füllungsmaterialien Zemente der Klasse III 6 min. Die Lichthärtung beträgt bei einer Polymerisationslampe mit einem Spektrum der Wellenlänge von 440-480 nm 20 s bei einer Leistung von mindestens 800 mW/cm². Die Aushärtung mittels Polymerisationslampe ist auf eine Schichtdicke von 4 mm beschränkt. Gemäß der Norm ISO 4049:2009 (Typ1, Klasse III) weist *Surefil one™* die erforderliche Biegefestigkeit für direkte Kompositrestaurationen auf (Firma Dentsply Sirona, 2020).

2.1.4 *Prime&Bond active®*

Prime&Bond active® (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) ist ein Universaladhäsiv, das als Etch&Rinse- (Total-Etch), Selectiv-Etch- oder Self-Etch-Adhäsiv verwendet werden kann. Es ist bei direkten und indirekten Restaurationen indiziert. Dabei besteht eine Anwendungsmöglichkeit auf Schmelz, Dentin, Komposit, Zirkoniumdioxid und Metall. Daher ist es laut der Gebrauchsanweisung des Herstellers zur

Verwendung im Rahmen einer Reparatur von Komposit-, Keramik- und Amalgamfüllungen geeignet (Firma Densply Sirona, 2021).

2.2 Prüfkörperherstellung

2.2.1 Probehalter

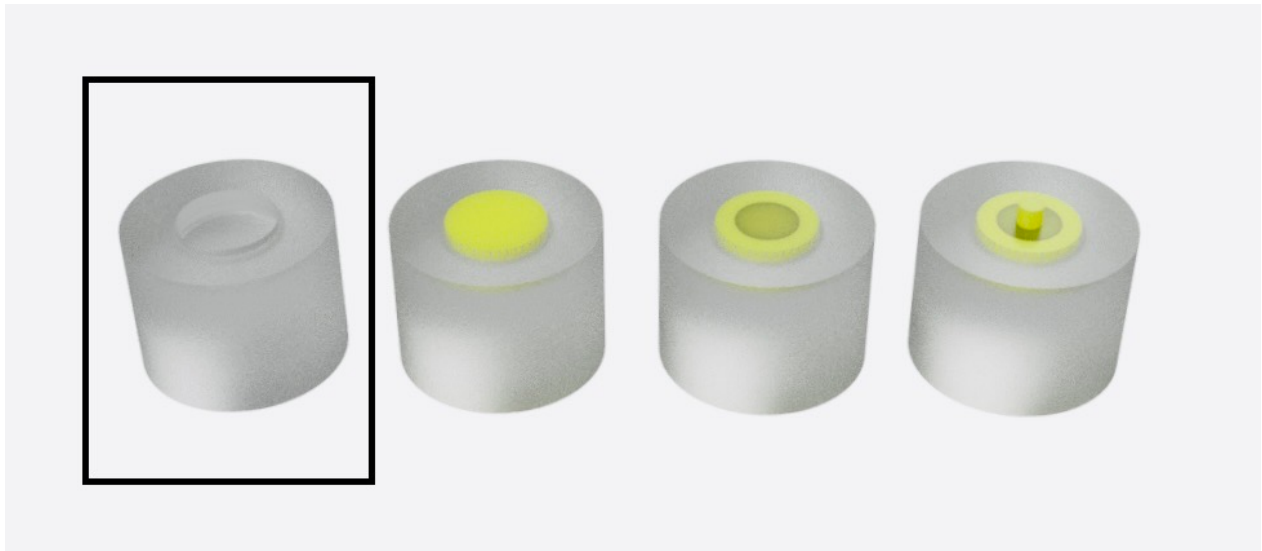


Abb. 2: Herstellungsschritte der Prüfkörper; 1. Schritt: Probehalter

Die Probehalter dienen zur Aufnahme der Substrat-, und Reparaturfüllung. Diese wurden aus PMMA-Kunststoff *PalaXpress*® (Firma Kulzer GmbH, Hanau, Deutschland) hergestellt. Der Rohling des Probehalters wurde aus *pico-rock*®-Zahnkranzgips (Firma Pico-dent® Dental-Produktions- und Vertriebs-GmbH, Wipperfürth, Deutschland) konstruiert. Der Durchmesser des zylindrischen Probehalters beträgt 2 cm und die Höhe $1,5 \pm 0,1$ cm. Er weist eine runde Aussparung, welche als Depot für die Substratfüllung dient, mit dem Durchmesser von 0,95 cm und einer Tiefe von 0,3 cm auf. Zur besseren Retention der Substratfüllung wurde mittels eines Rosenbohrers ein Unterschnitt in der Innenfläche der Aussparung erzeugt. Dieser Rohling wurde durch Dubliertechnik mit Dubliersilikon (Firma ORBIS Dental Handelsgesellschaft mbH, Münster, Deutschland) vervielfältigt. So wurde eine Dublierform geschaffen, die 10 Negativformen des Probehalters beinhaltet. Diese wurde mit *PalaXpress*®, das nach Herstellerangaben dosiert und verarbeitet wurde, aufgefüllt. Die anschließende Polymerisation erfolgte im Drucktopf *Palamat*® *pratic EL T*

(Firma Heraus Kulzer GmbH) bei 2 bar Druck, einer Wassertemperatur von 55 °C und über einen Zeitraum von 20 min. Abschließend wurden die hergestellten Probehalter auf Qualität des Kunststoffes und auf die Maße kontrolliert. Gegebenenfalls wurde die Höhe der Probehalter basal, gegenüberliegend der Aussparung, durch einen Bandschleifer angepasst.

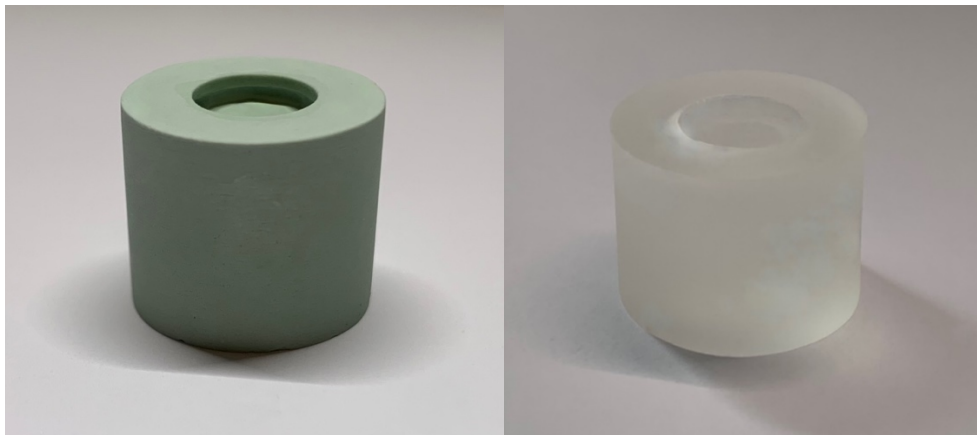


Abb. 3: links: Rohling des Probehalters aus Gips; rechts: Probehalter aus PMMA

2.2.2 Substratfüllung

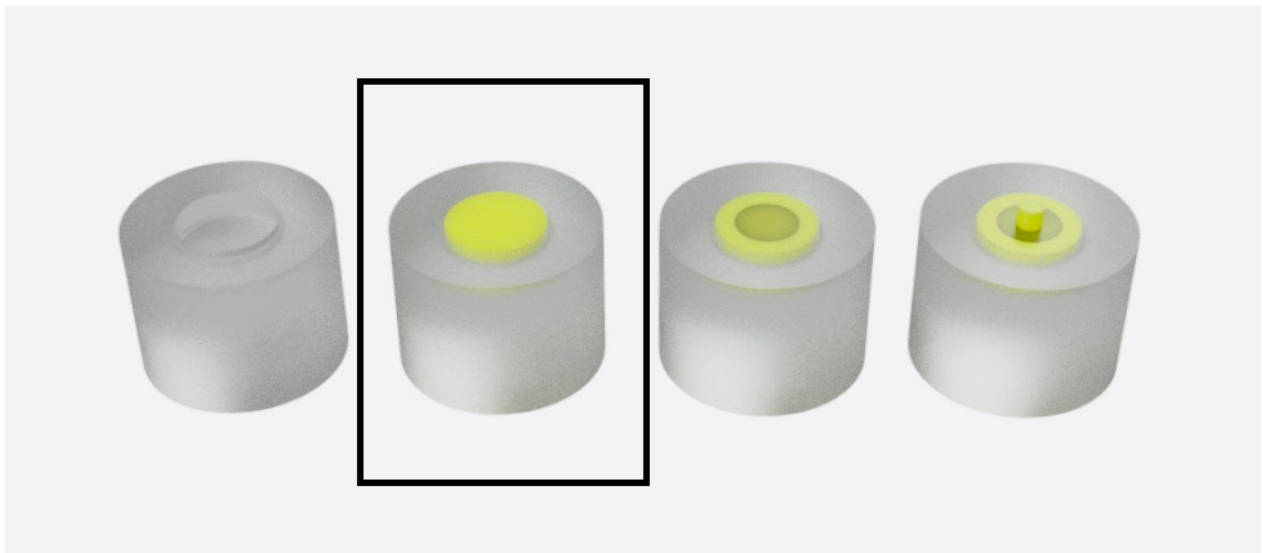


Abb. 4: Herstellungsschritte der Prüfkörper; 2. Schritt: Substratfüllung

Für die Substratfüllung wurde je nach Prüfgruppe eine der drei verschiedenen Füllungs-materialien verwendet. Die Substratfüllung nimmt die Aussparung im Probehalter vollständig ein und ist in diesem Versuchsaufbau als die zu reparierende Füllung anzusehen.

Für die Herstellung der Substratfüllung mit *ChemFil® Rock*, wurde der Kolben der Kapsel zur Aktivierung eingedrückt und die Kapsel für 15 s im Kapselmischgerät *CapMix™* (Firma 3M ESPE, St. Paul, USA) gemischt. Im Anschluss wurde die Kapsel in den *Capsule Extruder 2* (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) eingesetzt und der Kapselinhalt in die Aussparung des Probehalters appliziert. Nach dem Einbringen wurde der Überschuss entfernt, damit sich eine einheitliche Fläche zwischen Probehalter und Substratfüllung bildet. Da der Glasionomerzement in den ersten 24 h der Abbindephase eine hohe Empfindlichkeit gegenüber Austrocknung besitzt, wurde eine Atmosphäre mit einer hohen Luftfeuchtigkeit bei 37 °C geschaffen. Dies wurde durch eine Aufbewahrung der Prüfkörper in einer verschließbaren Kunststoffbox, die am Boden mit einem feuchten Tuch ausgelegt war, erreicht. Diese Kunststoffbox wurde für 24 h in einem Thermoschrank bei 37 °C aufbewahrt.

Für die Anfertigung der Substratfüllung aus *Ceram.x Spectra™ ST* wurde dies in zwei Schichten durchgeführt, da die maximale Schichtdicke bei diesem Komposit zur Polymerisation 2 mm nicht überschreiten darf. Zur Polymerisation wurde das LED-Polymerisationsgerät *Bluephase® Style* (Firma Ivoclar Vivadent AG, Schaan, Lichtenstein) verwendet. Dieses wurde in der vorliegenden Studie für die Polymerisation aller lichthärtenden Materialien genutzt. Jede Schicht des Komposits wurde bei einer Leistung des LED-Polymerisationsgerät von 1200 mW/cm² für 10 s belichtet.

Für die Substratfüllung aus dem Komposithybrid *Surefil one™* wurde der Kolben der Kapsel zur Aktivierung eingedrückt und in dem Kapselmischgerät *PROMIX one™* (Firma Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland) für 12 s gemischt. Die Kapsel wurde danach in den *Capsule Extruder 2* eingesetzt und das Füllungs-material durch die Kanülenspitze in die Aussparung des Probehalters appliziert und zu den Rändern abgestrichen. Überschüsse wurden entfernt und die Substratfüllung mit dem LED-Polymerisationsgerät *Bluephase® Style* für 20 s zur Polymerisation belichtet.



Abb. 5: vordosierte Mischkapsel des Kompositthybrides *Surefil one*™ mit Aktivierungskolben und Kanülenspitze zum Einbringen des Materials

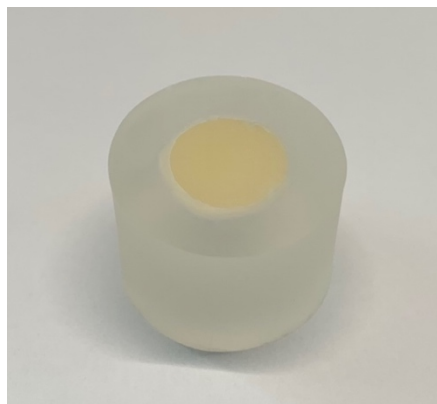


Abb. 6: Probehalter mit eingebrachter Substratfüllung

2.2.3 Vorbehandlung der Substratfüllung

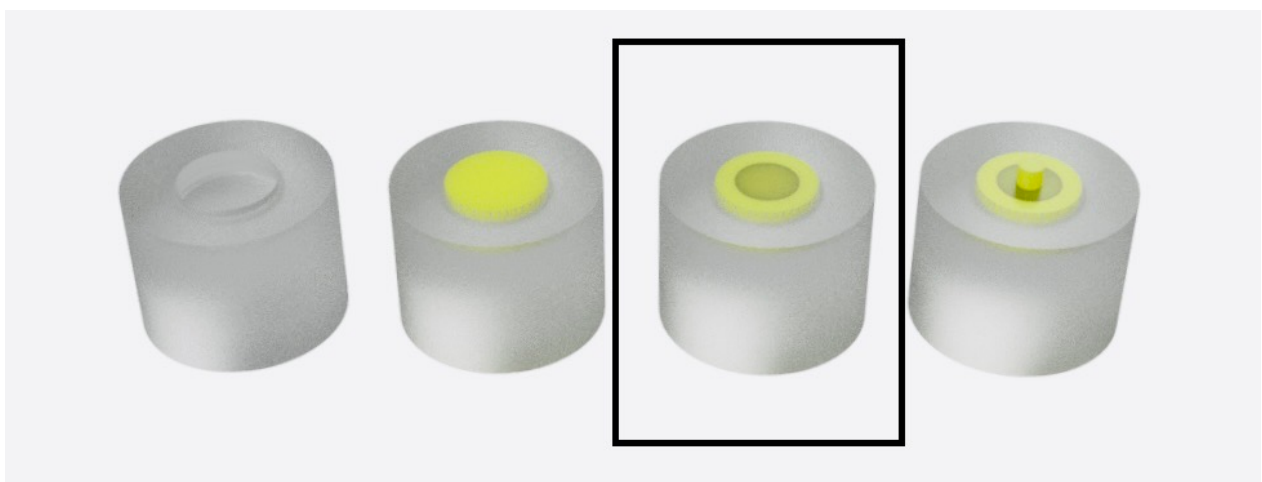


Abb. 7: Herstellungsschritte der Prüfkörper; 3. Schritt: Vorbehandlung der Substratfüllung

Die Vorbehandlung der Substratfüllung, vor dem Aufbringen der Reparaturfüllung, simuliert unterschiedliche Möglichkeiten, die einem Zahnarzt zu einer Reparatur einer intraoralen Füllung zur Verfügung stehen.

Alle Prüfkörper wurden in der Schleifmaschine *Phoenix 4000* (Firma Wirtz-Buehler GmbH, Düsseldorf, Deutschland) mit einem Schleifpapier der Körnung P320 unter Wasserkühlung angeraut. Dies erzeugt die gleiche Rauigkeit wie es ein Rot-Ring Präparationsdiamant an einer intraoralen Füllung erzeugen würde. Nach DIN EN ISO 7711-1:2022-02 besitzt dieser Schleifkörper eine Körnung von 46 µm. Alle Probenkörper wurden auf ein homogenes Schliffbild kontrolliert und nach dem Beschleifen gründlich unter Wasser abgespült.



Abb. 8: Anrauen der Prüfkörper durch die Schleifmaschine Phoenix 4000

Je nach Prüfgruppe wurden die Prüfkörper als weiterer Schritt zusätzlich mit dem Sandstrahlgerät *Basic Master* (Renfert GmbH, Hilzingen, Deutschland) abgestrahlt. Dies simuliert die intraorale Vorbehandlungsmöglichkeit mittels eines Sandstrahlers. Dazu wurde als Strahlmittel Aluminiumoxid *Korox*® (Firma BEGO GmbH & Co. KG, Bremen, Deutschland) mit einer Partikelgröße von 50 µm verwendet. Die Prüfkörper wurden aus 10 mm Abstand rechtwinklig bei einem Druck von 2,1 bar abgestrahlt. Die Dauer des Abstrahlens betrug 10 s pro Prüfkörper.

Eine weitere Vorbehandlungsoption besteht im Auftragen des selbstkonditionierenden Universaladhäsives *Prime&Bond active*® (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland). Dieses wurde entweder direkt nach dem Anrauen der Prüfkörper mittels Schleifpapiers oder additiv nach Abstrahlen angewandt. Vor dem Aufbringen des Adhäsivs wurden die Prüfkörper für 15 s mit einer Multifunktionsspritze *KaVo 3-F* (Firma KaVo Dental GmbH, Biberach/Riß, Deutschland), wie sie in gleicher oder ähnlicher Bauart in jeder zahnärztlichen Behandlungseinheit integriert ist, mit einem Wasserstrahl gereinigt und im Anschluss für 10 s trockengeblasen. Ein Applikator wurde mit dem Universaladhäsiv benetzt und das Adhäsiv für 20 s unter Bewegung auf die Substratfüllung aufgetragen. Mit der Multifunktionsspritze wurde das aufgebrachte Adhäsiv für 5 s mit einem Luftstrahl verblasen, sodass eine einheitlich glänzende Oberfläche erzeugt wurde. Als letzten Schritt wurde das Universaladhäsiv mit dem LED-Polymerisationsgerät für 10 s lichtgehärtet.

2.2.4 Reparaturfüllung

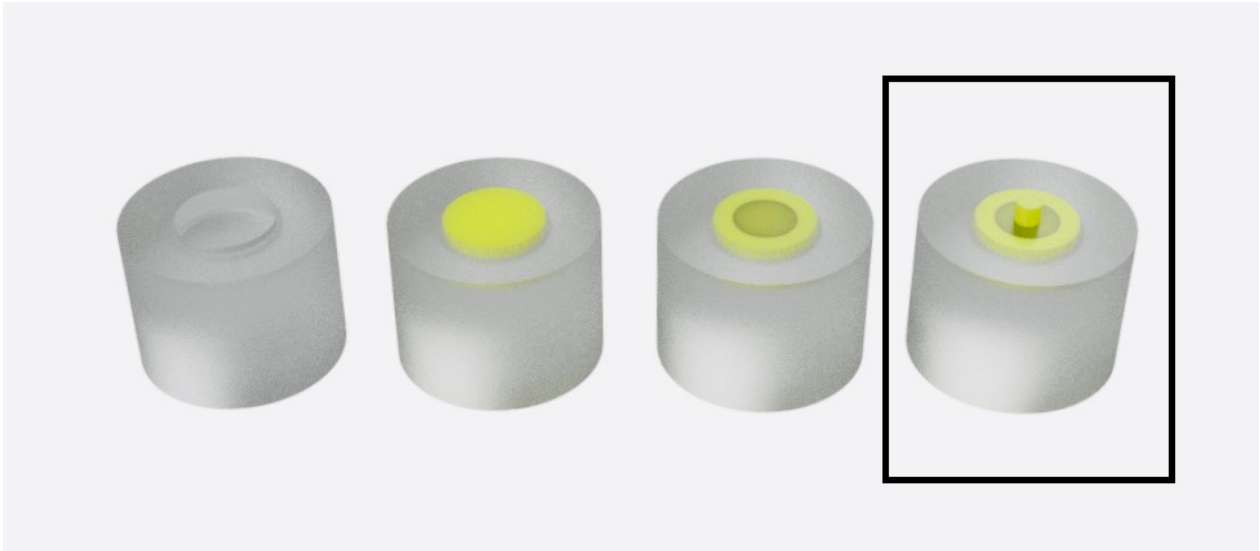


Abb. 9: Herstellungsschritte der Prüfkörper; 4. Schritt: Reparaturfüllung

Nach der Vorbehandlung der Substratfüllungsoberfläche wurde die Reparaturfüllung auf den Prüfkörper aufgebracht. Dazu wurde eine genormte Menge des Kompositenhybrids *Surefil one™* mithilfe der Spannvorrichtung *Bonding Clamp* (Firma Ultradent Products GmbH, Köln, Deutschland) und der *Bonding Mold Inserts* (Firma Ultradent Products GmbH, Köln, Deutschland) verklebt. Die *Bonding Mold Inserts* besitzen eine zylindrische Aussparung mit der Dimension von $2,38 \pm 0,03$ mm Durchmesser und 2 mm Höhe. Diese Maße sind nach ISO-Norm 29022:2013 definiert. Die Prüfkörper wurden in die *Bonding Clamp* positioniert und die *Bonding Mold Inserts* zentral über die Substratfüllung ausgerichtet. Diese Position wurde über die Flügelmuttern fixiert. Die Kapsel des Kompositenhybrids wurde wie oben bereits beschrieben aktiviert und mit der Kanülenspitze der Kapsel in die zylindrische Aussparung eingebracht. Die Lichthärtung erfolgte wieder für 20 s.

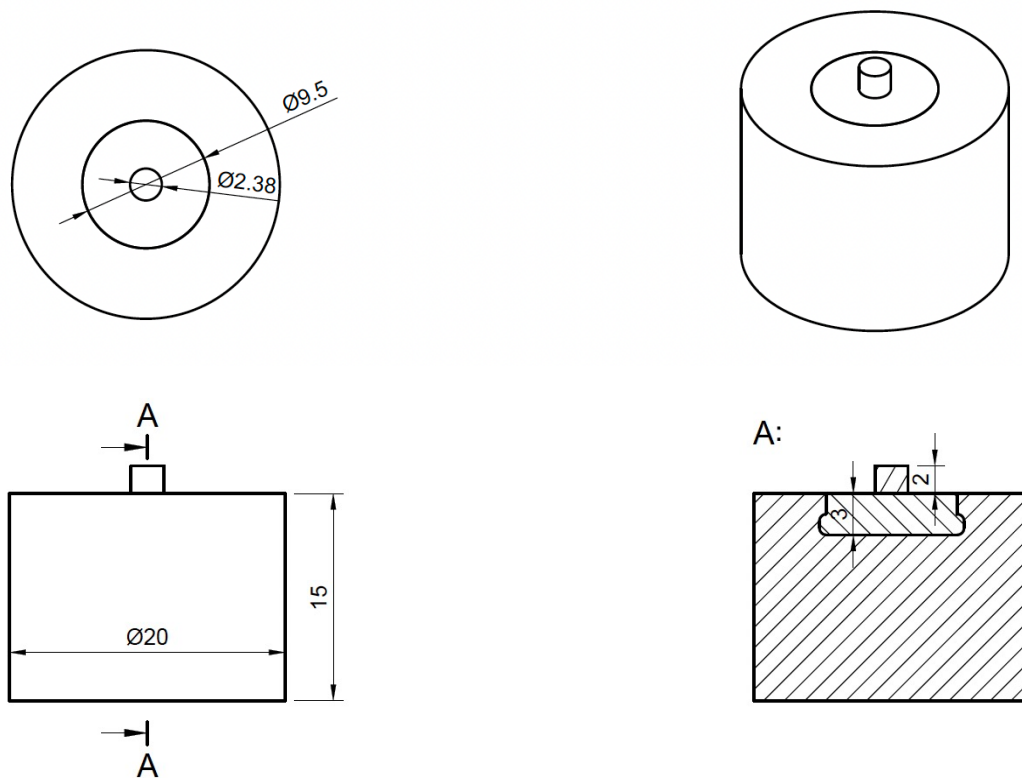


Abb. 10: technische Zeichnung des Prüfkörpers; A: Querschnitt; Maße in mm

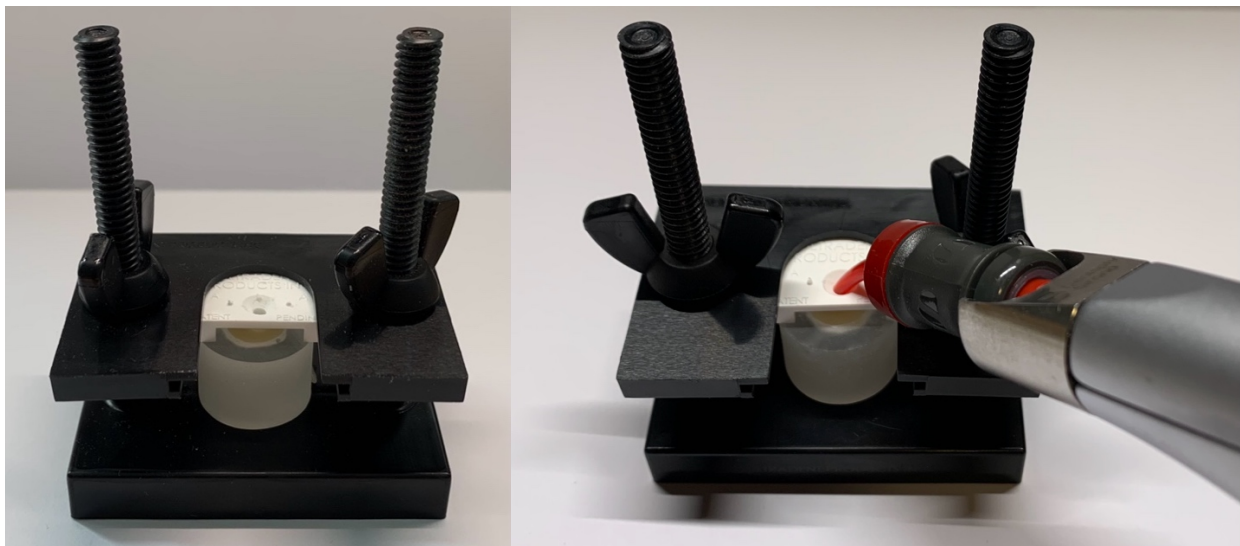


Abb. 11: links: Bonding Clamp und Bonding Mold Inserts; rechts: Einbringen der Reparaturfüllung

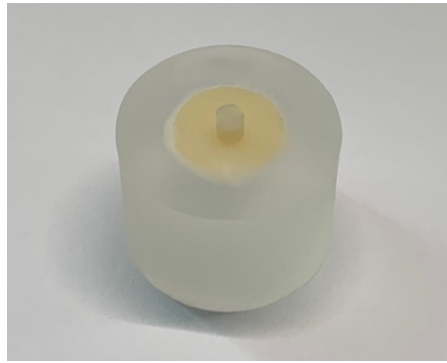


Abb. 12: vollständiger Prüfkörper

2.3 Künstliche Alterung der Prüfkörper

Je nach Einteilung der Prüfkörper in die Prüfgruppen wurden diese einer künstlichen Alterung unterzogen. Diese soll die im Mund entstehende Alterung simulieren. Im *Thermocycler THE1000* (Firma SD Mechatronik GmbH, Feldkirch-Westerham, Deutschland) wurden die Prüfkörper für 10.000 Zyklen zwischen zwei Bädern mit destilliertem Wasser und einer Temperatur von 5 °C und 55 °C gealtert. Die Eintauchzeit pro Wasserbad betrug 30 s pro Zyklus. Hinzu kamen 12 s Abtropfzeit und 3 s Überführungszeit pro Wasserbadwechsel.

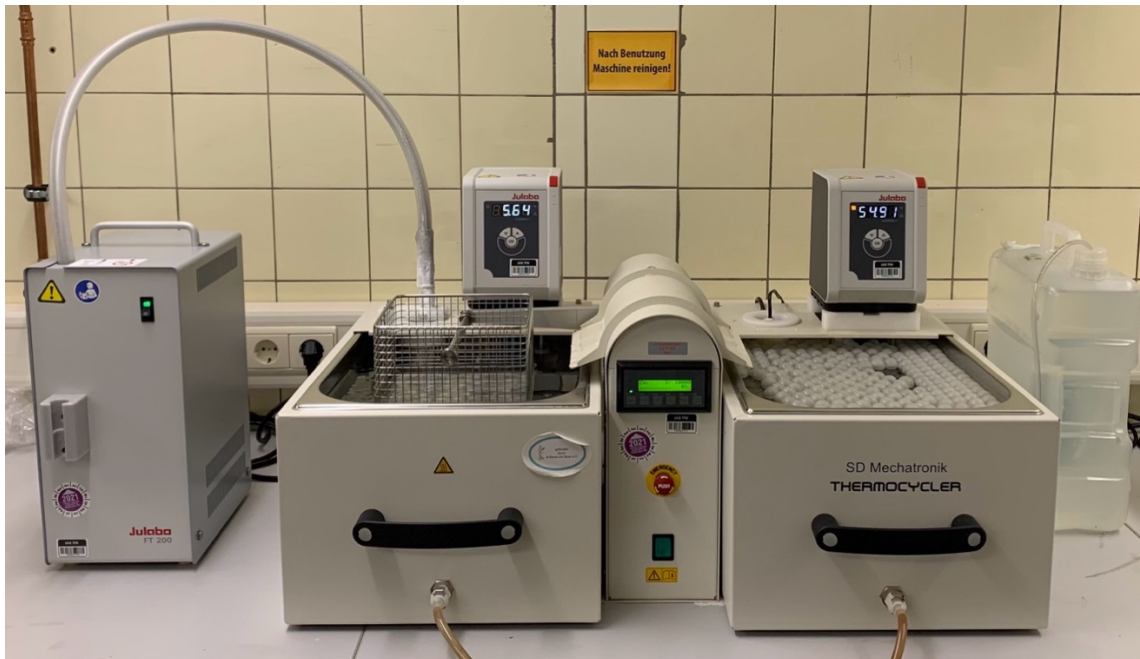


Abb. 13: Thermocycler zur künstlichen Alterung der Prüfkörper

2.4 Einteilung der Prüfgruppen

Durch die Herstellung der Substratfüllung aus drei unterschiedlichen Materialien ergaben sich drei Hauptgruppen.



Abb. 14: Gliederung der Prüfgruppen in drei Hauptgruppen

Diese drei Hauptgruppen wurden jede für sich weiter unterteilt. Im nächsten Schritt wurden die Substratfüllungen entweder einer künstlichen Alterung unterzogen oder blieben ungealtert. Die ungealterten Substratfüllungen dienten als Kontrollgruppe. Die nächste Einteilung erfolgte nach Art der Vorbehandlung, ob die Substratfüllung nur in der Schleifmaschine angeraut oder noch zusätzlich abgestrahlt wurde.

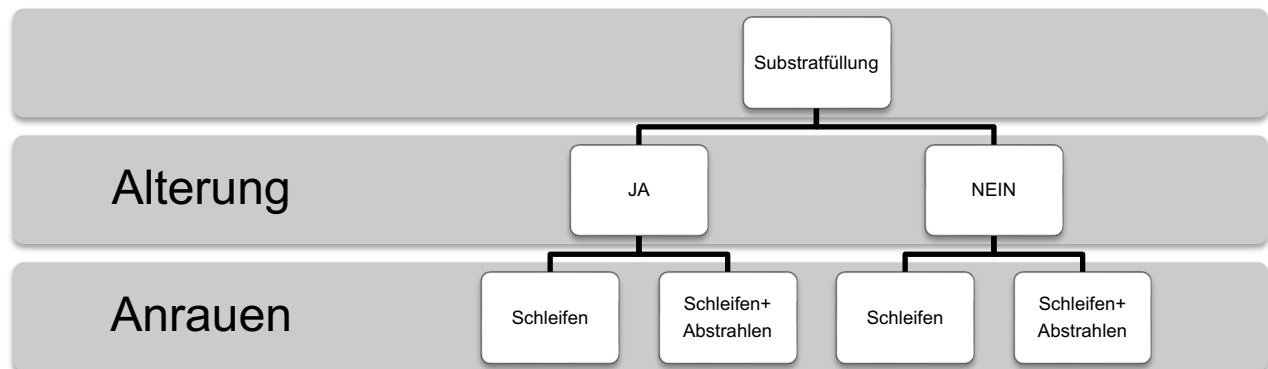


Abb. 15: Gliederung der Prüfgruppen durch Alterung und Anrauen

Nach diesem Schritt wurde die Hälfte der Prüfkörper der jeweiligen Gruppen mit dem Universaladhäsiv vor dem Aufbringen der Reparaturfüllung behandelt oder als Kontrollgruppe unbehandelt belassen. Die letzte Unterteilung lag in der Alterung der Reparaturfüllung, bei der jeweils die Hälfte der Prüfkörper pro Gruppe gealtert oder als Kontrollgruppe ungealtert belassen wurde.

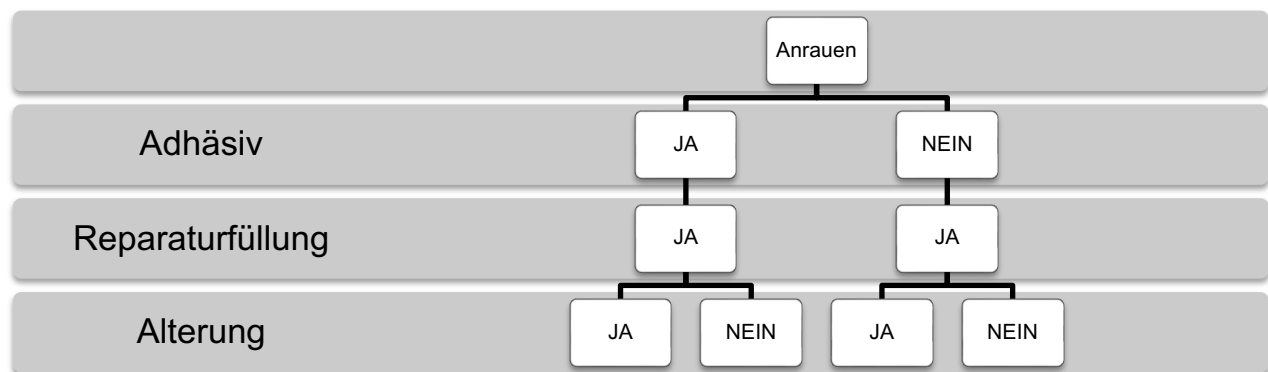


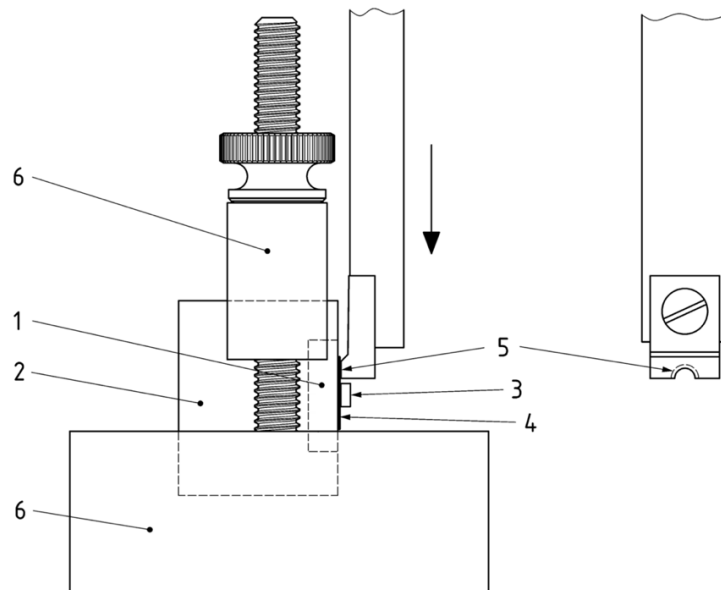
Abb. 16: Gliederung der Prüfgruppen durch Auftragen eines Adhäsivs und Alterung

Durch die unterschiedlichen Materialien, Vorbehandlungsoptionen sowie Kontrollgruppen ergaben sich insgesamt 48 Prüfgruppen. Pro Gruppe wurden insgesamt 9 Prüfkörper angefertigt. Insgesamt ergab dies folglich 432 Prüfkörper.

2.5 Auswertung der Verbundfestigkeit

2.5.1 Ermittlung der Scherspannungswerte

Die Ermittlung der Scherspannungswerte erfolgte nach ISO-Norm 29022:2013. Vor der Abscherung wurden die Prüfkörper für 24 h in 37 °C warmen destilliertem Wasser gelagert. Die Prüfkörper wurden einzeln in eine Prüfspannvorrichtung festgeschraubt und in die Universal-Abzugsmaschine *ZMART.PRO*® (Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) eingebracht. Dabei wurde der Prüfkörper so ausgerichtet, dass der Komposithybridzylinder möglichst nah, aber ohne Kontakt, in die Aussparung der Scherklinge positioniert war.



Legende: 1: Substratfüllung; 2: Probehalter; 3: Reparaturfüllung; 4: Universaladhäsiv; 5: Scherklinge mit Aussparung; 6: Prüfspannvorrichtung

Abb. 17: modifizierte Abbildung der Prüfspannvorrichtung nach ISO-Norm 29022:2013 (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013) mit ausgesparter Klinge des Scherarms



Abb. 18: Prüfspannvorrichtung mit angenäherter Scherklinge eingebracht in der Zwick Universal-Abzugsmaschine

Während des Prüfvorgangs wurden der Prüfkörper und der Scherarm mit einer Vorschubgeschwindigkeit von $1,0 \pm 0,1$ mm/min angenähert bis es zum Versagen des Verbunds

zwischen Reparaturfüllung und Substratfüllung kam. Mithilfe der Prüfsoftware *testXpert®* // (Firma Zwick GmbH & Co. KG, Ulm, Deutschland) wurde die maximale Scherkraft, die benötigt wurde um den Verbund beider Materialien aufzulösen, für jeden einzelnen Prüfkörper aufgezeichnet. Die Verbundfestigkeit bzw. die Scherspannung kann mit folgender Formel errechnet werden:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

mit

σ : Scherspannung in MPa

F : Scherkraft in N

A : Verbundfläche in mm²

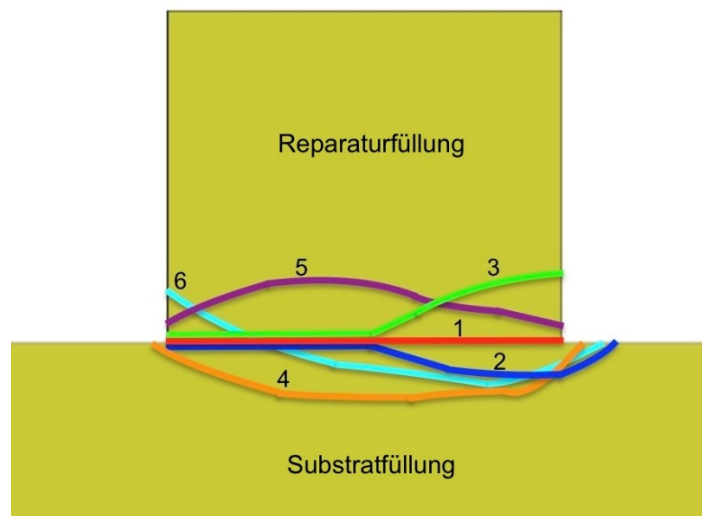
Die Verbundfläche in mm² konnte durch den bekannten Durchmesser der Aussparung des Molding Inserts von 2,38 mm berechnet werden:

$$A = \pi \times r^2 = \pi \times (1,19 \text{ mm})^2 = 4,45 \text{ mm}^2$$

Falls sich ein Komposithybridzylinder bereits während der künstlichen Alterung im Thermocycler gelöst hatte, wurde dieser Prüfkörper mit 0 MPa erfasst.

2.5.2 Brucharten

Zur weiteren Beurteilung der Schwachstelle des Verbundes zwischen Substratfüllung und Reparaturfüllung wurden die Prüfkörper nach der Abscherung unter dem Lichtmikroskop untersucht. Unter 25-facher Vergrößerung wurde die Bruchstelle mithilfe des Lichtmikroskops *Leica Stereo Wild* und der Leuchtquelle *KL 2500 LCD* (Firma Leica Camera AG, Wetzlar, Deutschland) betrachtet und der Verlauf des Bruchs zwischen den Füllungen klassifiziert. Ein adhäsiver Bruch lag vor, wenn die beiden Füllungen genau in der Verbundfläche getrennt wurden. Bei einem kohäsiven Bruch verlief die Frakturlinie entweder nur innerhalb eines der beiden Materialien oder durch beide, jedoch nicht entlang der Verbundfläche. Als Mischbruch wurde der Frakturverlauf, der sich zuerst als adhäsiver Bruch zeigte und dann in einen kohäsiven Bruch übergang, bezeichnet.



Legende: 1: Adhäsionsbruch durch die Verbundfläche; 2: Mischbruch Typ 1 durch Verbundfläche und Substratfüllung; 3: Mischbruch Typ 2 durch Verbundfläche und Reparaturfüllung; 4: Kohäsionsbruch Typ 1 durch die Substratfüllung; 5: Kohäsionsbruch Typ 2 durch die Reparaturfüllung; 6: Kohäsionsbruch Typ 3 durch beide Füllungen

Abb. 19: schematische Darstellung der entstandenen Brucharten bei der Abscherung



Abb. 20: Beispiel für einen Adhäsionsbruch (Prüfgruppe 2, Prüfkörper 3), Bruchverlauf entlang der Verbundfläche

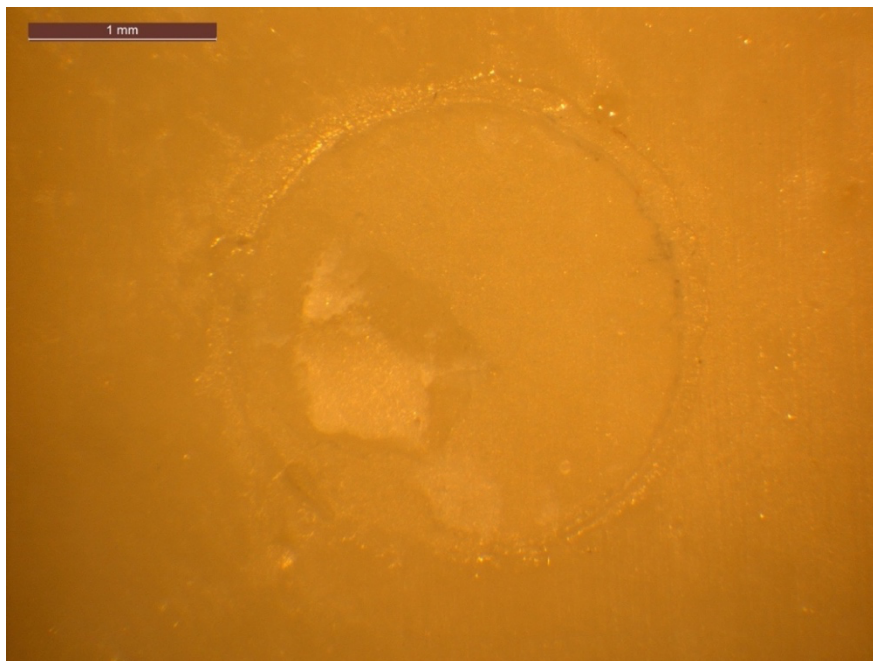


Abb. 21: Beispiel für einen Mischbruch Typ 1 (Prüfgruppe 4, Prüfkörper 4), Bruchverlauf entlang der Verbundfläche (oben rechts) und innerhalb der Substratfüllung (unten links)

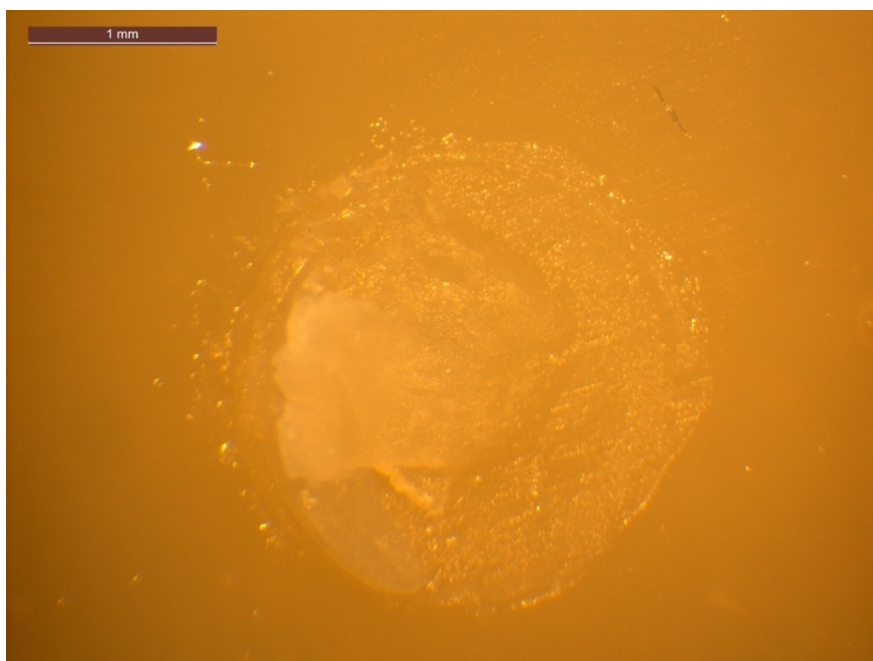


Abb. 22: Beispiel für einen Mischbruch Typ 2 (Prüfgruppe 20, Prüfkörper 7), Bruchverlauf entlang der Verbundfläche (rechts) und innerhalb der Reparaturfüllung (links)

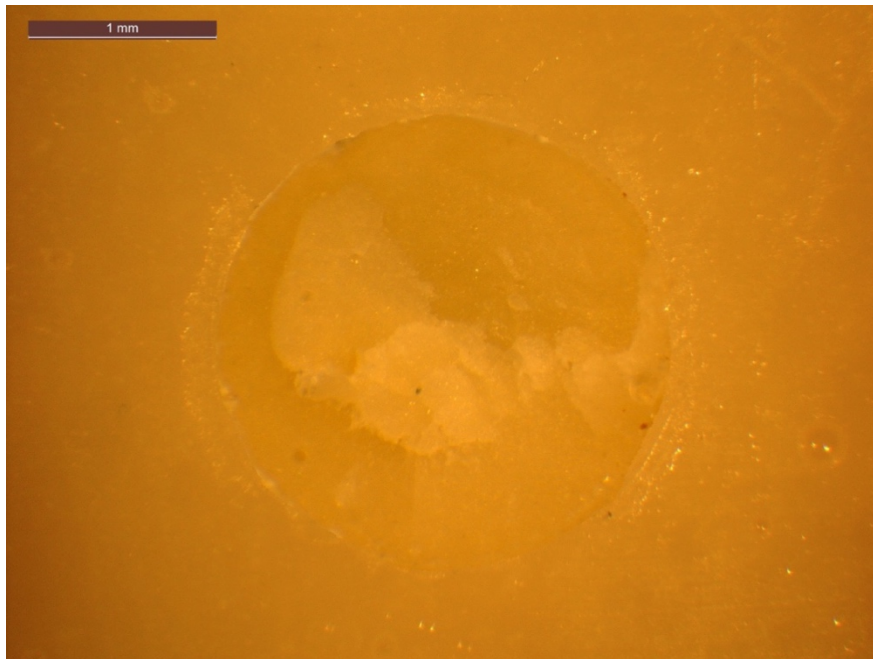


Abb. 23: Beispiel für einen Kohäsionsbruch Typ 1 (Prüfgruppe 16, Prüfkörper 9), Bruchverlauf durch die Substratfüllung

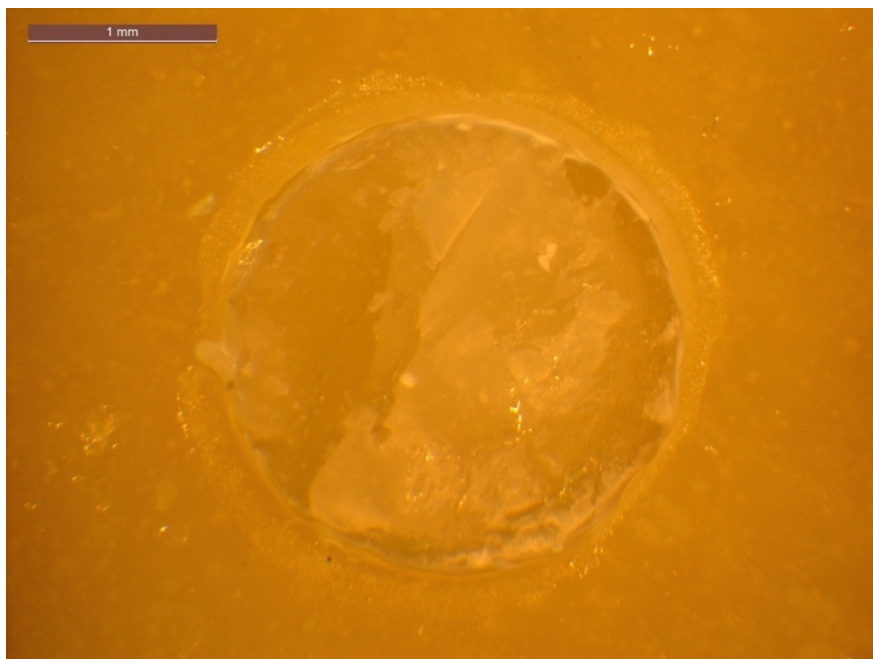


Abb. 24: Beispiel für einen Kohäsionsbruch Typ 2 (Prüfgruppe 32, Prüfkörper 2), Bruchverlauf durch die Reparaturfüllung

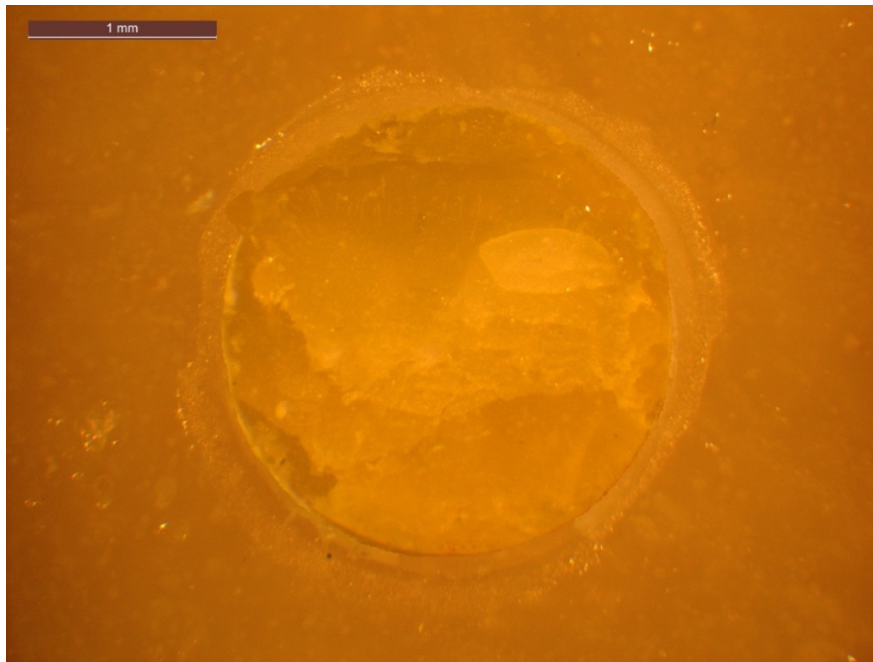


Abb. 25: Beispiel für einen Kohäsionsbruch Typ 3 (Prüfgruppe 32, Prüfkörper 3), Bruchverlauf durch die Substratfüllung (oben) und Reparaturfüllung (unten)

2.5.3 Vorgehen bei der statistischen Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Computerprogramm *Prism 9* (Firma Graph-Pad Software, San Diego, USA).

Zuerst wurden die Prüfgruppen auf Normalverteilung überprüft und die Mittelwerte und Standardabweichungen ermittelt. Diese wurden in einer deskriptiven Auswertung zusammengefasst. Nachfolgend ist die Darstellung durch ein Säulendiagramm anhand einer Beispielgruppe erläutert.

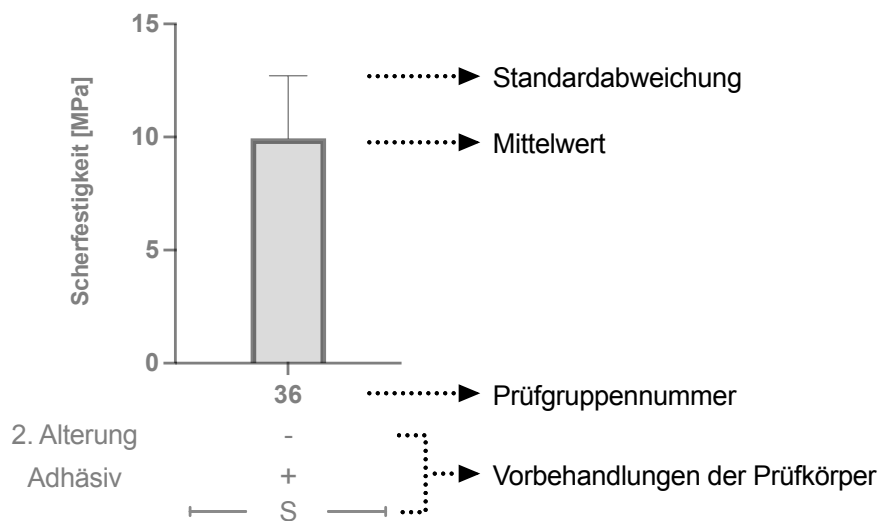


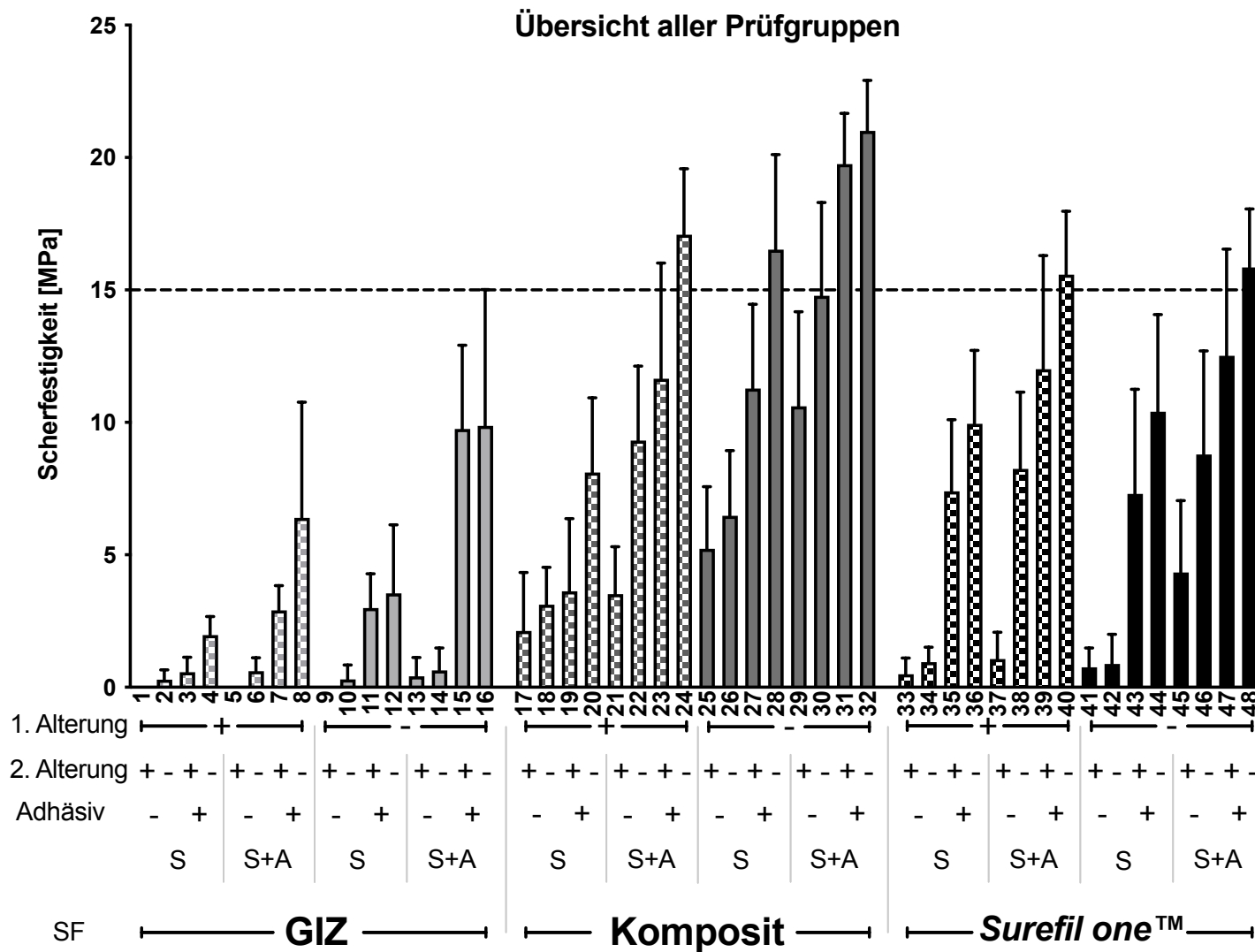
Abb. 26: Erläuterung der grafischen Darstellung

Um die Auswirkung der unterschiedlichen Vorbehandlungsmaßnahmen auswerten zu können, wurde für den Vergleich des Einflusses der Substratfüllung entweder bei zwei zu untersuchenden Gruppen ein t-Test oder bei mehr als zwei Prüfgruppen eine einfaktorielle Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Zur Überprüfung von Unterschieden zwischen mehreren Prüfgruppen wurde der Tukey-Test als Post-Hoc-Test angewandt. Dadurch wurden die Mittelwerte der Prüfgruppen verglichen und signifikante Unterschiede aufgezeigt.

Die Analyse der Brucharten erfolgte in einer deskriptiven Evaluation, indem das jeweilige Verhältnis der aufgetretenen Brucharten pro Prüfgruppe in Relation zum Mittelwert dargestellt wurde.

Als Signifikanzniveau wurde für alle Test $p < 0,05$ gewählt.

3. Ergebnisse



Legende: X-Achse: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; GIZ: Glasionomerzement; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 27: grafische Darstellung der Scherfestigkeiten aller Prüfgruppen

3.1 Scherkraftuntersuchung

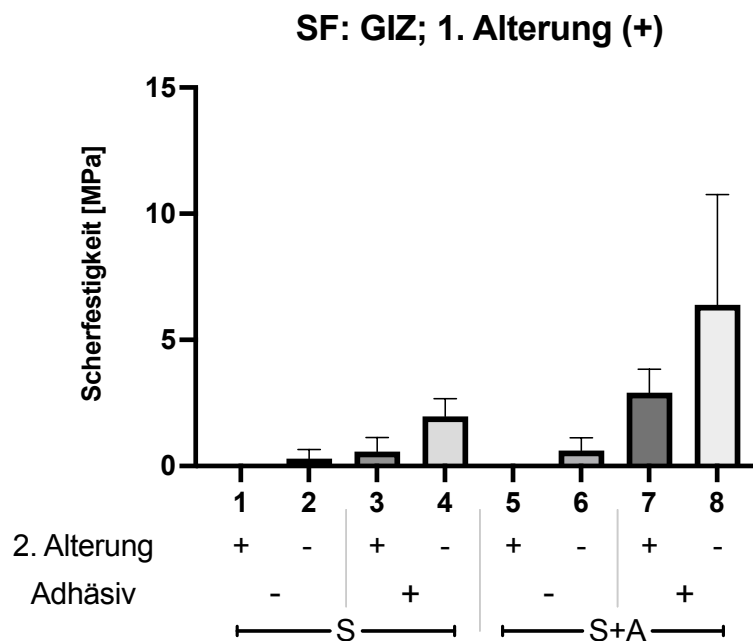
Das Säulendiagramm in Abbildung 27 stellt einen Überblick der ermittelten Scherfestigkeitswerte für alle Prüfgruppen dar. Dabei werden die Mittelwerte und die Standardabweichungen betrachtet. Im Folgenden werden die Werte für die Standardabweichung in Klammern aufgeführt.

Grundsätzlich zeigen sich bei allen Materialien der Substratfüllungen die höchsten Scherfestigkeiten bei den Prüfgruppen, bei denen weder die Substratfüllung noch die Reparaturfüllung gealtert wurden, die Substratfüllung abgeschliffen, abgestrahlt und das Universaladhäsiv aufgetragen wurden. Die höchsten Scherfestigkeiten wurden bei der Substratfüllung aus Komposit ermittelt, dann folgte *Surefil one*TM und zuletzt Glasionomerzement. Die eingezeichnete gestrichelte Linie in dem Diagramm soll die anzustrebende Scherfestigkeit einer reparierten Füllung verdeutlichen. Diese Scherfestigkeit sollte nach Jafarzadeh Kashi et al. (2011) der minimalen Haftfestigkeit von Komposit zu Schmelz entsprechen, die bei 15 MPa einzuordnen ist. In Relation der Orientierungslinie zu den Säulendiagrammen wird deutlich, dass nur die Prüfgruppen 24, 28, 31, 32, 40 und 48 diese überlegen. Dies entspricht 12,5 % aller Prüfgruppen.

Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass die Prüfgruppe 32 mit einem Mittelwert von 21,00 MPa ($\pm 1,91$ MPa) die höchste Scherfestigkeit erreicht hat. Bei den Prüfkörper dieser Prüfgruppe wurde als Substratfüllung Komposit verwendet, als Vorbehandlungsmaßnahme die Oberfläche abgeschliffen, abgestrahlt und zusätzlich Universaladhäsiv aufgetragen. Weder die Substratfüllung noch die Reparaturfüllung wurden gealtert. Bei den Prüfgruppen, bei denen *Surefil one*TM als Substratfüllung verwendet wurde, wies Prüfgruppe 48 die höchsten Werte mit 15,85 MPa ($\pm 2,22$ MPa) auf. Die Vorbehandlungsmaßnahmen bei dieser Prüfgruppe waren identisch zu der Prüfgruppe 32. Unter der Verwendung von Glasionomerzement als Substratfüllung konnten in der Prüfgruppe 16 mit 9,87 MPa ($\pm 5,15$ MPa) die größten Haftwerte ermittelt werden. Hierbei waren die Vorbehandlungsmaßnahmen ebenfalls identisch zu den Prüfgruppen 32 und 48.

Die Mittelwerte und Standardabweichung aller Prüfgruppen sind in der Tabelle 2 im Abschnitt 3.3 aufgeführt.

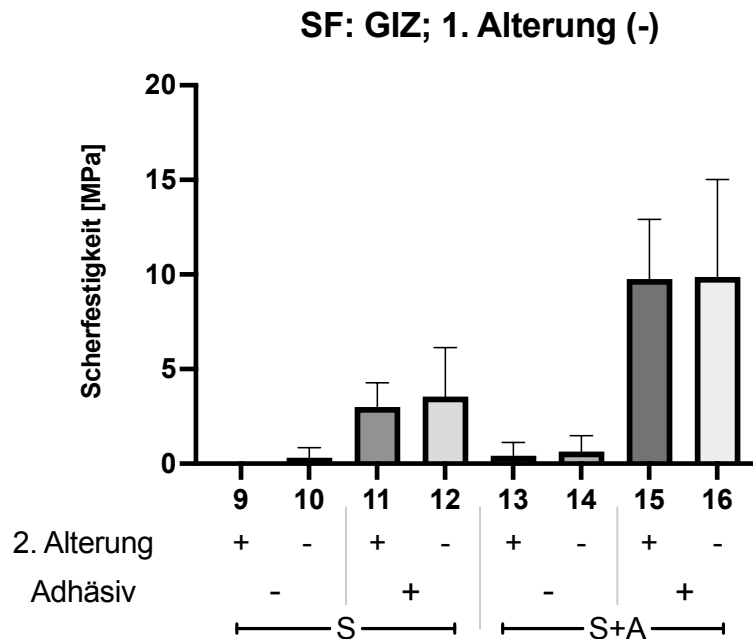
3.1.1 Scherkraftuntersuchung der Prüfgruppen 1-16



Legende: X-Achse: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; GIZ: Glasionomerzement; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 28: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 1-8

Bei den Prüfgruppen 1-8, bei denen Glasionomerzement für die Substratfüllung verwendet und diese zudem im Thermocycler gealtert wurde, erreichte die Prüfgruppe 8 mit 6,39 MPa ($\pm 4,37$ MPa) die höchste Scherfestigkeit. Als Vorbehandlung wurden die zugehörigen Prüfkörper abgeschliffen, abgestrahlt, Adhäsiv aufgetragen und die Reparaturfüllung nicht gealtert. Unter den Prüfgruppen, die nicht abgestrahlt wurden, erreichte die Prüfgruppe 4 mit 1,97 MPa ($\pm 0,70$ MPa) die größten Haftwerte. Ansonsten waren die Vorbehandlungsmaßnahmen der Prüfgruppe 4 und 8 identisch. Bei den Prüfgruppen 1 und 5 kam es bei allen Prüfkörpern zu einem Versagen des Verbundes von Reparatur- und Substratfüllung. Bei beiden wurde die Reparaturfüllung künstlich gealtert und kein Adhäsiv verwendet. Prüfgruppe 5 wurde zusätzlich abgestrahlt.

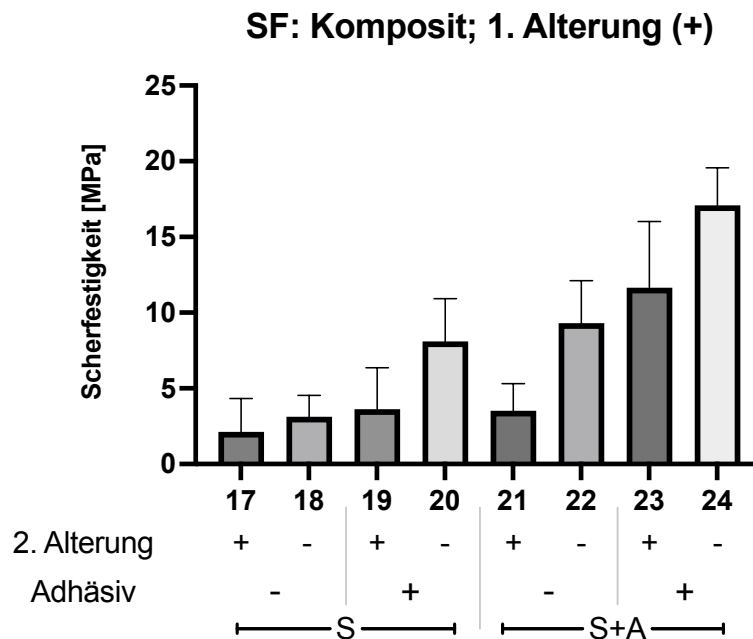


Legende: X-Achse: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; GIZ: Glasionomerzement; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 29: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 9-16

Unter den Prüfgruppen 9-16, bei denen die Substratfüllung bestehend aus Glasionomerzement nicht gealtert wurde, erreichte wie bereits oben erwähnt die Prüfgruppe 16 die höchsten Haftwerte mit 9,87 MPa ($\pm 5,15$ MPa). Prüfgruppe 15 erreicht mit 9,75 MPa ($\pm 3,16$ MPa) ähnliche Werte bei einer Alterung der Reparaturfüllung, die bei Prüfgruppe 16 ausblieb. Ohne die Verwendung von Adhäsiv konnten Werte von 0,42 MPa ($\pm 0,71$ MPa) für Prüfgruppe 13 und 0,64 MPa ($\pm 0,85$ MPa) für Prüfgruppe 14 ermittelt werden. Bei Prüfgruppe 9, bei der die Substratfüllung vor Aufbringen der Reparaturfüllung nicht abgestrahlt wurde, kam es bei allen Prüfkörpern zu einem Ablösen der Reparaturfüllung bereits während der Alterung.

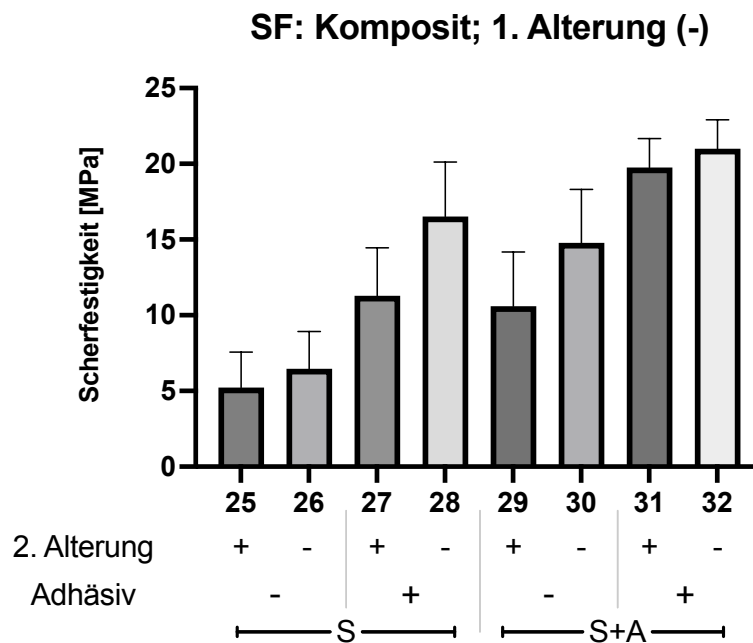
3.1.2 Scherkraftuntersuchung der Prüfgruppen 17-32



Legende: X-Achse: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 30: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 17-24

Bei den Prüfgruppen 17-24, deren Substratfüllung aus Komposit besteht und die im Thermocycler gealtert wurde, konnte Prüfgruppe 24 mit 17,08 MPa ($\pm 2,49$ MPa) die höchste Scherspannung aufzeigen. In Relation zu allen Prüfgruppen waren dies die dritthöchsten Werte. Die Prüfkörper dieser Gruppe wurden vor Aufbringen der Reparaturfüllung abgeschliffen, abgestrahlt und Adhäsiv aufgetragen. Des Weiteren wurde die Reparaturfüllung nicht gealtert. Die Prüfgruppe 23, zu der der einzige Unterschied die Alterung der Reparaturfüllung war, verzeichnete eine Scherfestigkeit von 11,65 MPa ($\pm 4,36$ MPa). Unter den Prüfgruppen die nur abgeschliffen und nicht abgestrahlt wurden, besaß Prüfgruppe 20 mit 8,11 MPa ($\pm 2,82$ MPa) die höchsten Haftwerte. Prüfgruppe 17, bei der die Prüfkörper weder abgestrahlt wurden noch Adhäsiv aufgetragen und die Reparaturfüllung zusätzlich gealtert wurde, verzeichnete mit 2,12 MPa ($\pm 2,21$ MPa) die geringste Scherfestigkeit.

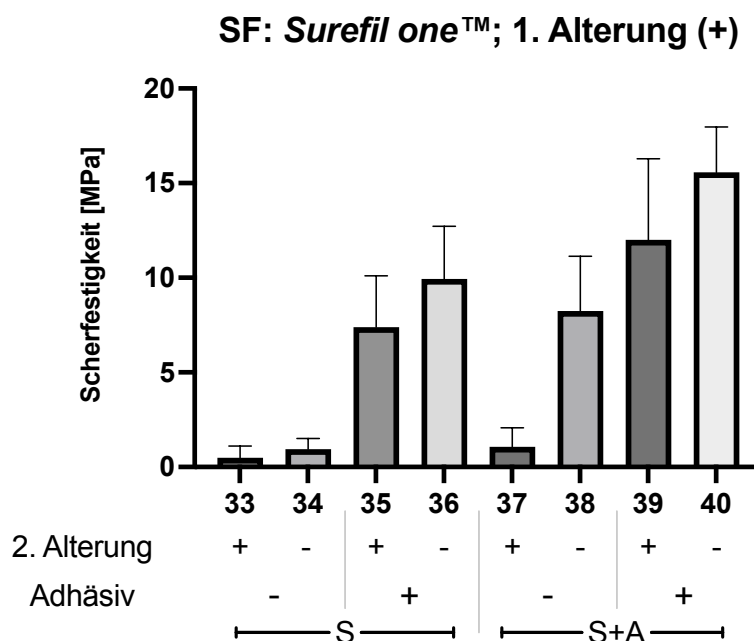


Legende: X-Achse: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 31: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 25-32

Bei der Untersuchung der Prüfgruppen 25-32, deren Substratfüllung aus Komposit besteht und nicht gealtert wurde, wurde, wie oben bereits erwähnt, für die Prüfgruppe 32 die höchsten Werte mit 15,85 MPa ($\pm 2,22$ MPa) ermittelt. Bei der Betrachtung der Prüfgruppe 31 wurden die zweithöchsten Werte aller Prüfgruppen mit 19,75 MPa ($\pm 1,92$ MPa) festgestellt. Der Unterschied in den Vorbehandlungsmaßnahmen zu der Prüfgruppe 32 lag in der Alterung der Reparaturfüllung. Bei den Prüfgruppen, deren Prüfkörper nicht zusätzlich abgestrahlt wurden, wurde für die Prüfgruppe 28 mit 16,52 MPa ($\pm 3,59$ MPa) die größten Haftwerte erreicht. Dabei wurde bei den Prüfkörpern dieser Prüfgruppe Adhäsiv aufgetragen und die Reparaturfüllung nicht gealtert. Mit Alterung der Reparaturfüllung und Weglassen des Adhäsiv sank die Scherfestigkeit auf 5,23 MPa ($\pm 2,35$ MPa).

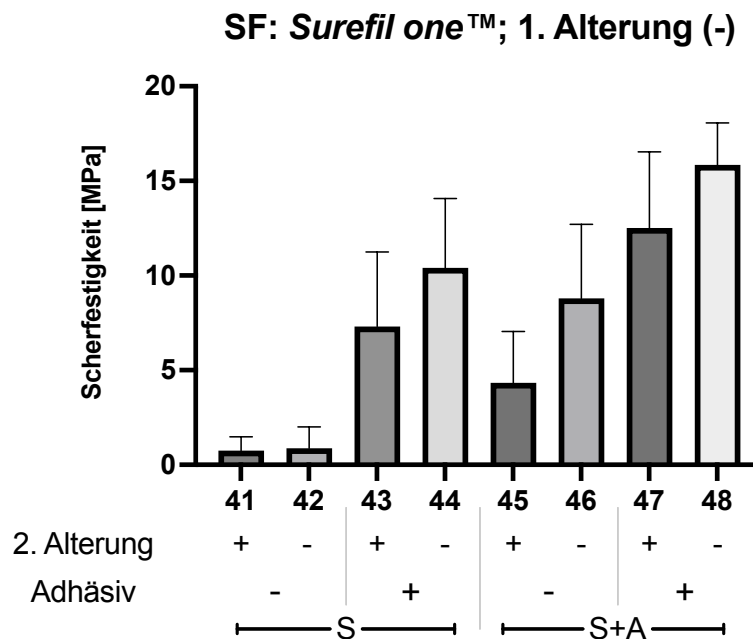
3.1.3 Scherkraftuntersuchung der Prüfgruppen 33-48



Legende: X-Achse: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 32: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 33-40

Unter den Prüfgruppen 33-40, bei denen *Surefil one*™ als Substratfüllung verwendet und diese künstlich gealtert wurde, wies die Prüfgruppe 39 mit 12,01 MPa ($\pm 4,29$ MPa) die höchste Scherfestigkeit aller Prüfgruppen auf, bei denen sowohl die Substratfüllung als auch die Reparaturfüllung gealtert wurde. Die Scherfestigkeit lag jedoch unter der bereits erwähnten anzustrebenden Scherfestigkeit einer Reparaturfüllung von 15 MPa. Die Prüfkörper der Prüfgruppe 39 wurden abgeschliffen, abgestrahlt und Adhäsiv aufgetragen. Durch Ausbleiben der Alterung der Reparaturfüllung stieg die Scherfestigkeit auf 15,57 MPa ($\pm 2,39$ MPa) und stellt somit den höchsten Wert für den Haftverbund der Prüfgruppen 33-40 dar. Durch Ausbleiben des Abstrahlens der Prüfkörper der Prüfgruppe 36 sank die Haftfestigkeit auf 9,94 MPa ($\pm 2,77$ MPa) bei sonst gleichen Vorbehandlungsmaßnahmen. Durch zusätzliche Alterung der Reparaturfüllung und Weglassen des Adhäsivs vermindert sich die Scherfestigkeit weiter auf 0,49 MPa ($\pm 0,62$ MPa).



Legende: X-Achse: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 33: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 41-48

Die Substratfüllung der Prüfgruppen 41-48 besteht aus *Surefil one™* und wurde nicht gealtert. Die höchste Scherfestigkeit mit 15,85 MPa ($\pm 2,22$ MPa) wies die Prüfgruppe 48 auf, deren Prüfkörper abgeschliffen, abgestrahlt und Adhäsiv aufgetragen wurde. Zudem wurde die Reparaturfüllung nicht gealtert. Die Prüfgruppe 47, bei der die Reparaturfüllung gealtert wurde, wies die zweithöchsten Haftwerte mit 12,51 MPa ($\pm 4,03$ MPa) auf. Bei den Prüfgruppen, die nicht abgestrahlt wurden, verzeichnete Prüfgruppe 44 mit 10,40 MPa ($\pm 3,67$ MPa) die höchsten Werte. Durch Auslassen des Auftragens des Adhäsivs und Alterung der Reparaturfüllung sanken die Haftwerte in Prüfgruppe 41 auf 0,75 MPa ($\pm 0,73$ MPa).

3.2 Einfluss der Vorbehandlungsmaßnahmen

Die künstliche Alterung der Substratfüllungen und Reparaturfüllungen führte zu geringeren Mittelwerten in Bezug auf die Scherfestigkeit als bei den ungealterten Kontrollgruppen. Ein signifikanter Unterschied durch die Untersuchung mittels t-Test wurde bei etwas mehr

als 50 % der Prüfgruppen nachgewiesen. Die Auswirkung der unterschiedlichen Vorbehandlungsmaßnahmen soll in den folgenden Abschnitten geschildert werden.

3.2.1 Einfluss des Universaladhäsives auf die Scherfestigkeit

Für die Prüfgruppen, bei denen Universaladhäsiv aufgetragen wurde, konnte zu 96 % ein positiver signifikanter Einfluss im Vergleich zu den Kontrollgruppen ohne Adhäsiv nachgewiesen werden. Lediglich zwischen den Prüfgruppen 17 zu 19 wurde kein signifikanter Unterschied festgestellt, auch wenn der Mittelwert von 2,12 MPa ($\pm 2,21$ MPa) auf 3,63 ($\pm 2,74$) durch Verwendung des Adhäsivs stieg.

3.2.2 Einfluss des Abstrahlens auf die Scherfestigkeit

Durch Abstrahlen der Oberfläche der Substratfüllung konnte der Haftverbund bei 75 % der Prüfgruppen im Vergleich zu den Kontrollgruppen gesteigert werden.

Zwischen den Prüfgruppen 1 und 5, 2 und 6, 9 und 13, 10 und 14, 17 und 21 und 33 und 37 bestand kein signifikanter Unterschied. Bei allen Prüfkörpern dieser Prüfgruppen wurde die Reparaturfüllung ohne vorheriges Auftragen des Universaladhäsives aufgebracht. In Kombination des Abstrahlens mit der Verwendung des Adhäsivs konnte zu 100 % ein signifikanter Unterschied zwischen den Prüfgruppen zu den Kontrollgruppen nachgewiesen werden.

3.3 Einfluss des Materials der Substratfüllung auf die Scherfestigkeit

Tab. 2: Übersicht der Scherfestigkeiten und der signifikanten Unterschiede nach ANOVA und Tukey-Test

Vorbehandlung			GIZ				Komposit				Surefil one™			
			PG	MW	SD	Tukey	PG	MW	SD	Tukey	PG	MW	SD	Tukey
1.A (+)	S	UA (-)	1	0,00	±0,00	a	17	2,12	±2,21	a	33	0,49	±0,62	
			2	0,29	±0,36	a	18	3,12	±1,42	a,b	34	0,95	±0,57	b
		UA (+)	3	0,57	±0,56	a,b	19	3,63	±2,74	a,c	35	7,40	±2,70	b,c
			4	1,97	±0,70	a,b	20	8,11	±2,82	a	36	9,94	±2,77	b
		UA (-)	5	0,00	±0,00	a	21	3,51	±1,79	a,b	37	1,06	±1,01	b
			6	0,61	±0,51	a,b	22	9,31	±2,81	a	38	8,24	±2,90	b
	S + A	UA (-)	7	2,91	±0,93	a,b	23	11,65	±4,36	a	39	12,01	±4,29	b
			8	6,39	±4,37	a,b	24	17,08	±2,49	a	40	15,57	±2,39	b
		UA (+)	9	0,00	±0,00	a	25	5,23	±2,35	a,b	41	0,75	±0,73	b
			10	0,30	±0,54	a	26	6,47	±2,47	a,b	42	0,88	±1,12	b
		UA (+)	11	2,99	±1,29	a,b	27	11,28	±3,17	a	43	7,30	±3,95	b
			12	3,55	±2,59	a,b	28	16,52	±3,59	a,c	44	10,40	±3,67	b,c
1.A (-)	S	UA (-)	13	0,42	±0,71	a,b	29	10,60	±3,58	a,c	45	4,33	±2,71	b,c
			14	0,64	±0,85	a,b	30	14,78	±3,52	a,c	46	8,79	±3,91	b,c
		UA (+)	15	9,75	±3,16	a	31	19,75	±1,92	a,b	47	12,51	±4,03	b
			16	9,87	±5,15	a,b	32	21,00	±1,91	a,c	48	15,85	±2,22	b,c
	S + A	UA (-)	17	0,00	±0,00	a	18	3,12	±1,42	a,b	34	0,95	±0,57	b
			19	3,63	±2,74	a,c	35	7,40	±2,70	b,c				
		UA (+)	20	8,11	±2,82	a	36	9,94	±2,77	b				
			21	3,51	±1,79	a,b	37	1,06	±1,01	b				
		UA (-)	22	9,31	±2,81	a	38	8,24	±2,90	b				
			23	11,65	±4,36	a	39	12,01	±4,29	b				

Legende: PG: Prüfgruppe; GIZ: Glasionomerzement; 1. A: Alterung der Substratfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; UA: Universaladhäsiv; RF: Reparaturfüllung; 2. A: Alterung der Reparaturfüllung; MW: Mittelwert; SD: Standardabweichung; Prüfgruppen in gleicher Zeile mit gleichem Buchstaben in Spalte „Tukey“ unterscheiden sich signifikant voneinander

Mit Hilfe der ANOVA und des anschließenden Tukey-Tests wurde die Auswirkung der Werkstoffklasse der Substratfüllung als unabhängige Variable der Prüfgruppen untersucht.

Aus der Tabelle 2 ist ersichtlich, dass die Reparaturfüllungen, die auf eine Substratfüllung aus Komposit aufgebracht wurden, zu 100 % eine signifikant höhere Scherfestigkeit aufwiesen als bei einer Substratfüllung aus Glasionomermzement. Bei der Verwendung von *Surefil one*TM als Substratfüllung konnte bei 75 % der Prüfgruppen signifikant höhere Haftwerte im Vergleich zu Substratfüllungen aus Glasionomermzement ermittelt werden.

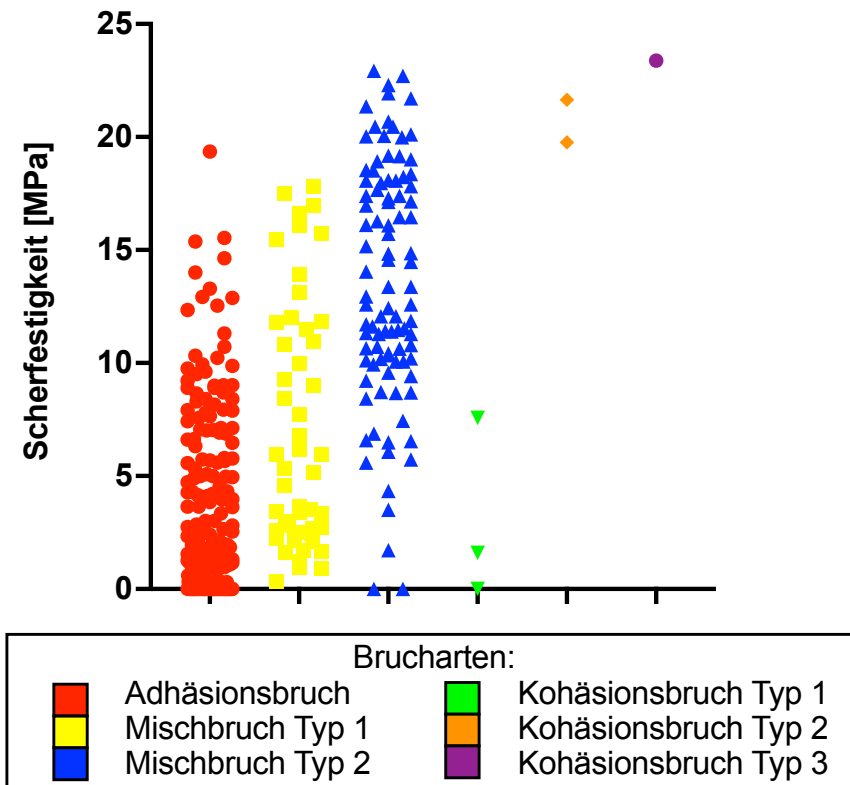
Die Scherfestigkeiten zwischen den Werkstoffklassen Komposit und *Surefil one*TM als verwendete Substratfüllung unterschieden sich zu 75 % signifikant voneinander. Dabei wies die Prüfgruppe 35, welche *Surefil one*TM als Substratfüllung verwendet, mit 7,40 MPa ($\pm$ 2,70 MPa) einen signifikant höheren Haftverbund als die Prüfgruppe 19 auf. Bei allen anderen signifikanten Unterschieden zwischen diesen beiden Werkstoffklassen, waren stets die ermittelten Werte für die Prüfgruppen mit der Substratfüllung aus Komposit höher.

3.4 Verteilung der Brucharten

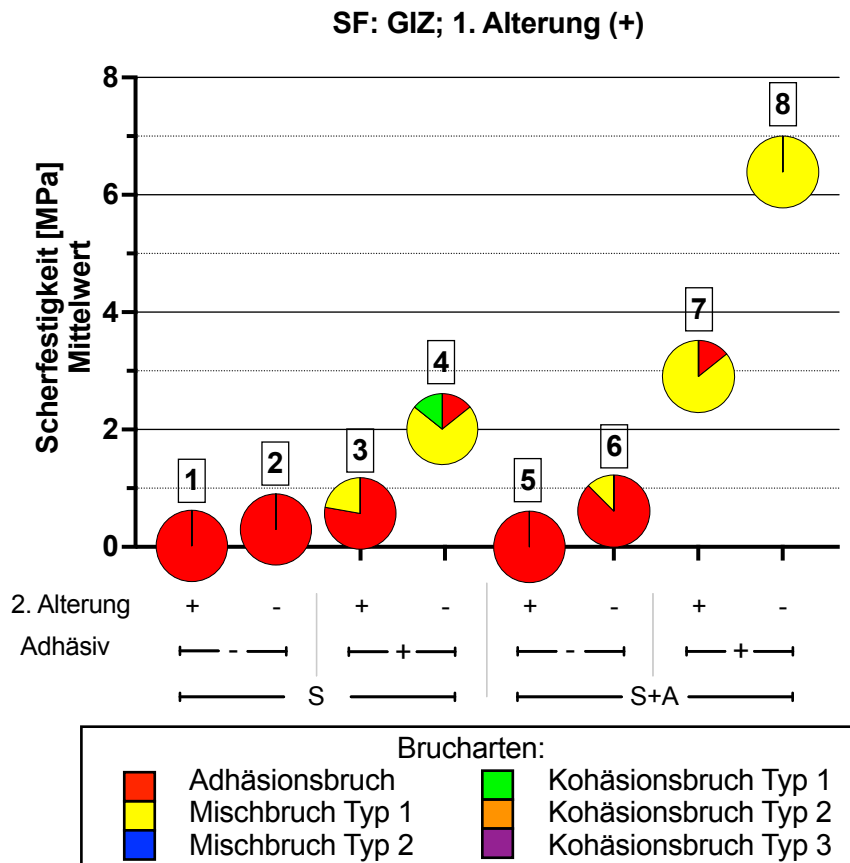
Tab. 3: Auftreten der jeweiligen Bruchart

Bruchart	Anzahl
Adhäsionsbruch	223
Mischbruch Typ 1	49
Mischbruch Typ 2	95
Kohäsionsbruch Typ 1	3
Kohäsionsbruch Typ 2	2
Kohäsionsbruch Typ 3	1

Verteilung der Scherhafterfestigkeit in Bezug zur Bruchart

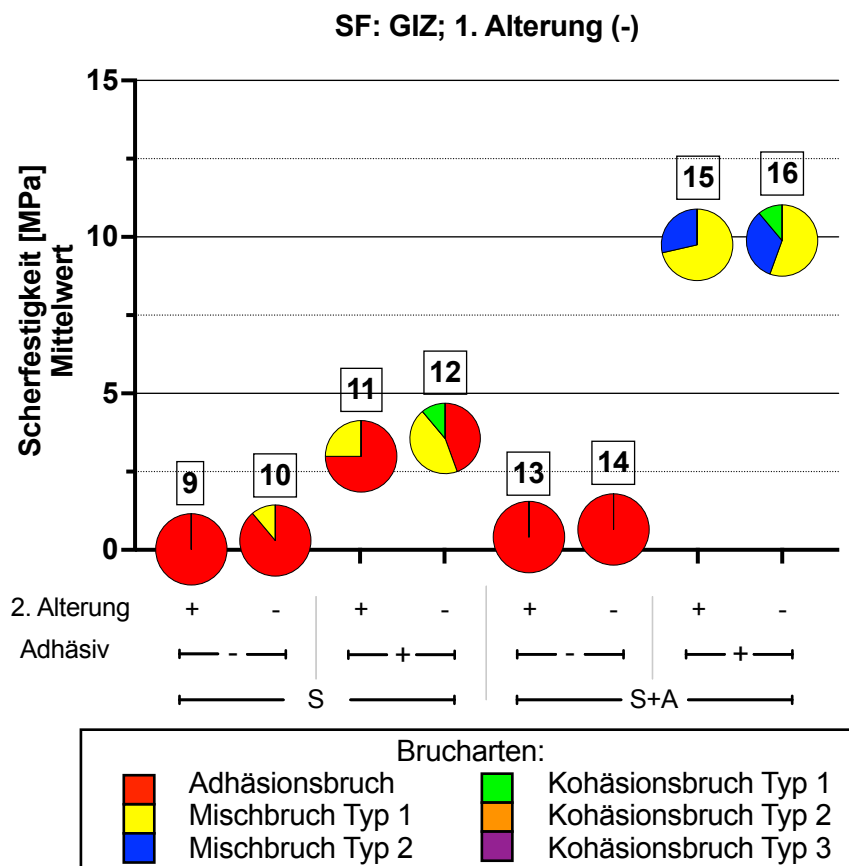
**Abb. 34:** Verteilung der Scherhafterfestigkeit in Bezug zur Bruchart

Aus der Tabelle 3 und der Abbildung 34 wird ersichtlich, dass die häufigste Bruchart, die bei der Abscherung der Reparaturfüllung entstanden ist, der Adhäsionsbruch war. Der Anteil betrug 60 % aller Prüfkörper. Der Adhäsionsbruch trat, wie in der Abbildung erkennbar ist, am häufigsten bei geringer Scherhafterfestigkeit auf. Die gemischten adhäsiv-kohäsiv Brüche entstanden bei höherer Scherhafterfestigkeit. Die kohäsiven Brucharten sind in dieser Untersuchung nur in sehr geringer Anzahl aufgetreten und kommen normalerweise bei hoher Scherhafterfestigkeit vor.



Legende: ☐: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; GIZ: Glasionomierzement; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 35: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 1-8

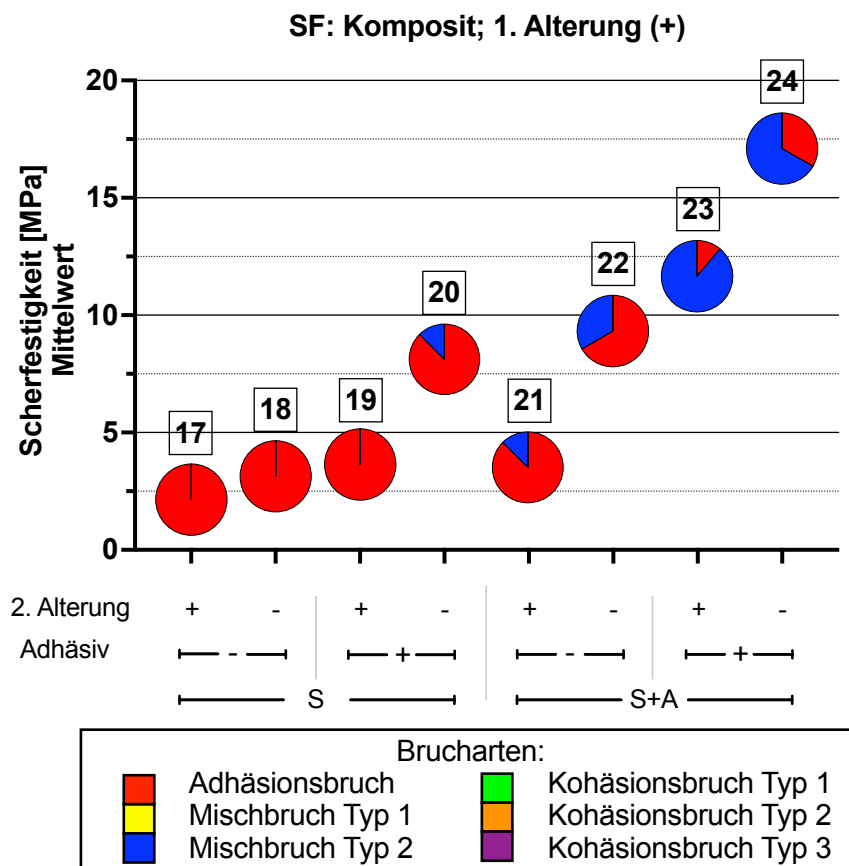


Legende: $\boxed{x}$: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; GlZ: Glasionomerzement; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 36: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 9-16

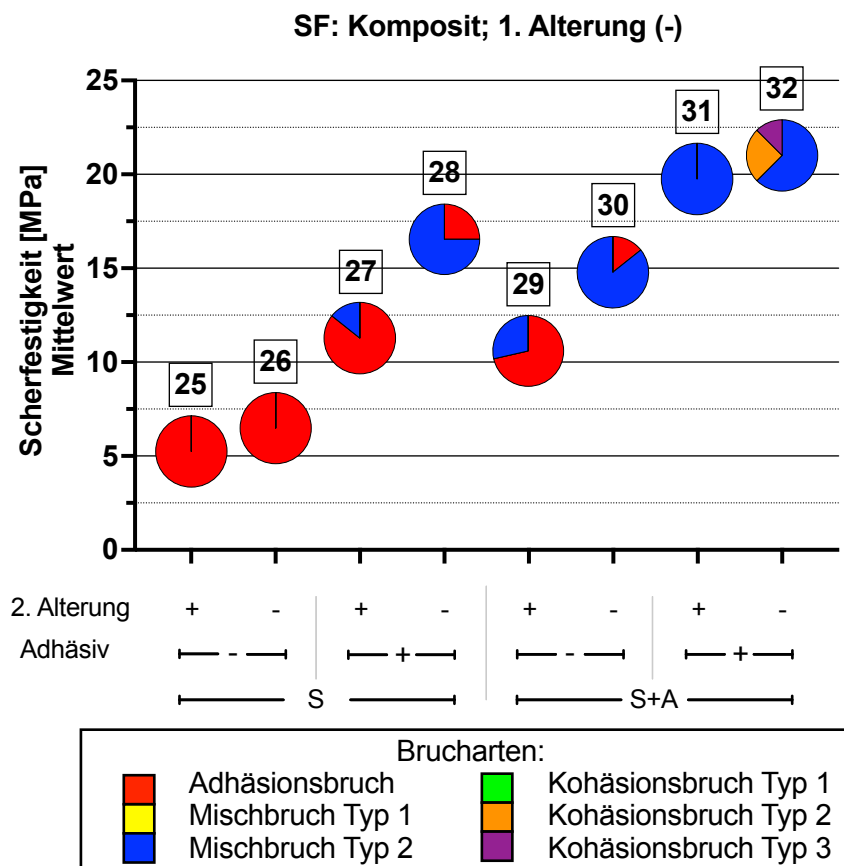
Bei der Betrachtung der abgebildeten Bruchanalyse für die Prüfgruppen mit der Substratfüllung bestehend aus Glasionomerzement zeigte sich, dass die Prüfkörper, die lediglich abgeschliffen wurden (Prüfgruppen 1, 2, 9, 10), bis auf Prüfgruppe 10 (88 %) ein rein adhäsives Versagensmuster aufzeigten. Bei zusätzlichem Auftragen des Universaladhäsives wurde der Anteil der adhäsiven Bruchart geringer und der Anteil des gemischt adhäsiv-kohäsiven Bruchart, Mischbruch Typ 1 durch die Verbundfläche und die Substratfüllung, von 22 % (Prüfgruppe 3) bis 77 % (Prüfgruppe 4) größer. Dabei stieg die Scherfestigkeit auf circa 3 MPa. Zu einem geringen Anteil (11 %) konnte ein kohäsives Versagensmuster durch die Substratfüllung bei Prüfkörpern ohne Alterung der Reparaturfüllung (Prüfgruppe 12) festgestellt werden.

Bei den Prüfgruppen, die neben dem Abschleifen zusätzlich abgestrahlt, aber nicht mit Universaladhäsiv vorbehandelt wurden (Prüfgruppen 5, 6, 13, 14), wurde ebenfalls fast ausschließlich ein adhäsiver Bruch festgestellt. Nur Prüfgruppe 6 wies zu 13 % einen Mischbruch Typ 1 auf. Bei einem additiven Auftragen eines Universaladhäsives wurde als überwiegender Anteil, 55 % (Prüfgruppe 16) bis 100 % (Prüfgruppe 8), eine gemischt adhäsiv-kohäsive Bruchart, Mischbruch Typ 1, durch die Verbundfläche und die Substratfüllung, festgestellt. In einem geringeren Ausmaß 27-33 % zeigte sich der Mischbruch Typ 2 durch die Verbundfläche und die Reparaturfüllung. Dies trat nur bei den Prüfgruppen 15 und 16 auf. Bei diesen Prüfgruppen wurde die Substratfüllung nicht gealtert und die höchste Scherfestigkeit (circa 10 MPa) der untersuchten Prüfkörper bestehend aus einer Substratfüllung mit Glasionomierzement aufgezeichnet. In der Prüfgruppe ohne Alterung der Reparaturfüllung (Prüfgruppe 16) wurde zudem mit einem Anteil von 11 % ein kohäsiver Bruch durch die Substratfüllung nachgewiesen.



Legende: ☐: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 37: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 17-24

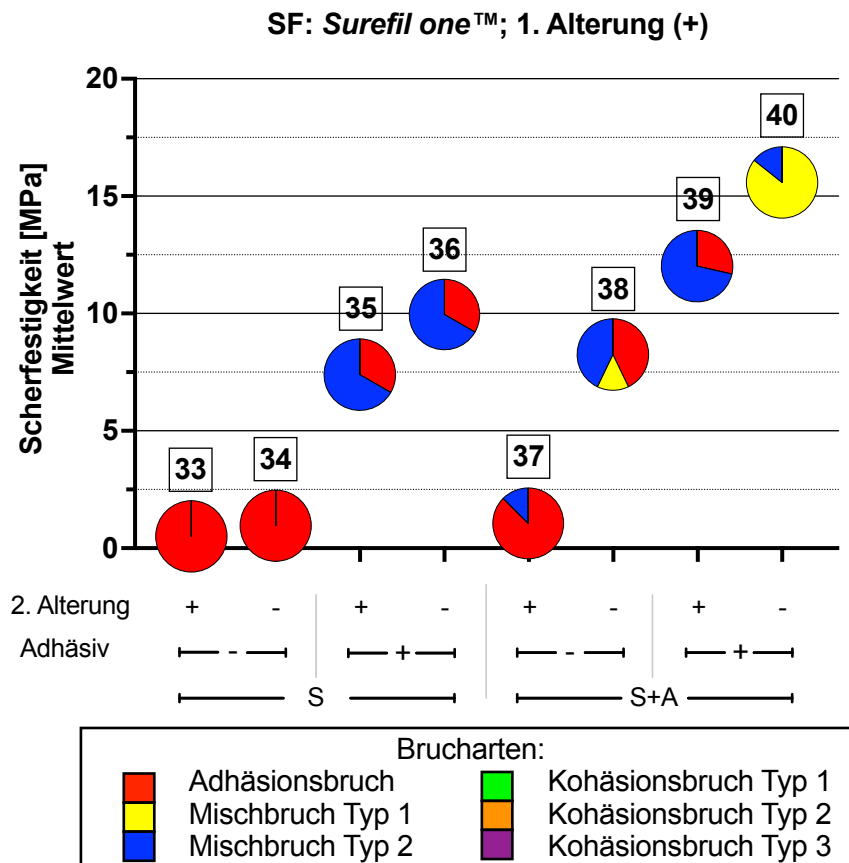


Legende: ☐: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 38: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 25-32

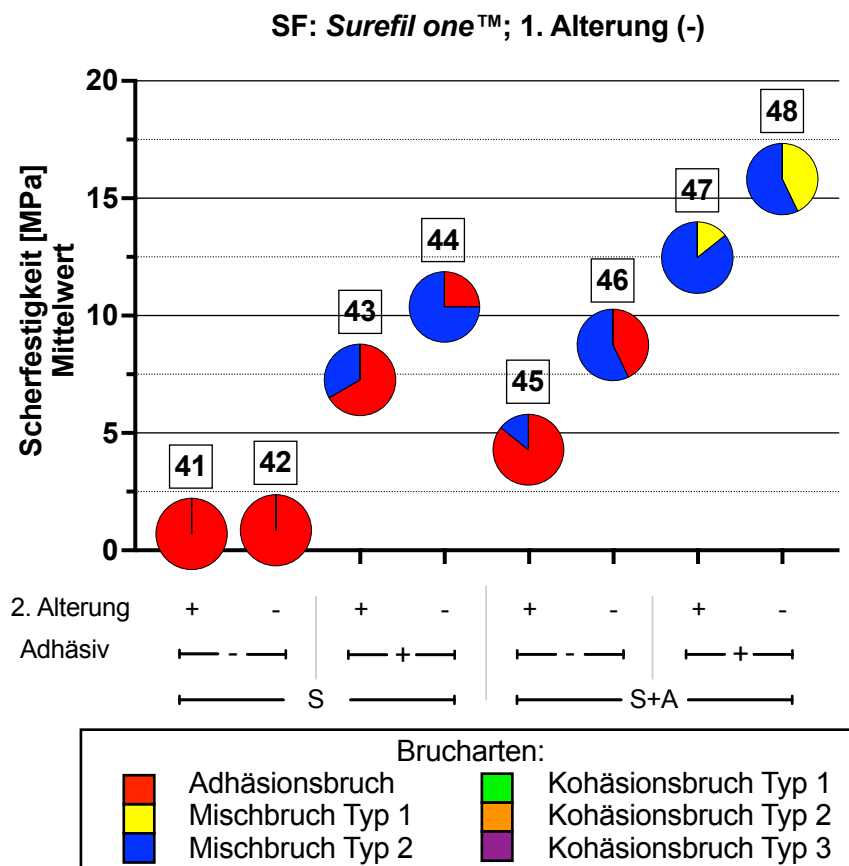
Bei Betrachtung der Prüfgruppen, bei denen Komposit als Substratfüllung verwendet wurde, zeigte sich der adhäsive Bruch bei niedriger Scherfestigkeit als häufigste Versagensart und mit steigender Scherfestigkeit nahm der Anteil des Mischbruchs Typ 2 durch die Verbundfläche und die Reparaturfüllung zu. Bei den Prüfkörpern, die nur abgeschliffen wurden (Prüfgruppen 17, 18, 25, 26), zeigte sich zu 100 % ein adhäsiver Bruch. Mit zusätzlichem Abstrahlen als Vorbehandlungsmaßnahme erhöhte sich das Ausmaß des Mischbruchs Typ 2. Dieser lag zwischen 13 % bei der Prüfgruppe 21 bis zu 85 % bei der Prüfgruppe 30, die mit mittelwertig 14,8 MPa die höchste Scherfestigkeit ohne Auftragen des Universaladhäsiv erreichte.

Bei der Verwendung des Universaladhäsives stieg der Anteil des Mischbruchs Typ 2 weiter. Die Prüfgruppe 31 verzeichnete diese Versagensart zu 100 %. Bei der Prüfgruppe 32, deren Substratfüllung und Reparaturfüllung nicht gealtert wurden, konnten zudem zu 25 % ein kohäsiver Bruch durch die Reparaturfüllung und zu 13 % ein gemischt kohäsiver Bruch durch beide Füllungen nachgewiesen werden. Diese Gruppe wies zudem mit einem Mittelwert von 21 MPa die höchste Scherfestigkeit auf.



Legende: ☐: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 39: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 33-40



Legende: ☐: Nummer der Prüfgruppe; SF: Substratfüllung; 1. Alterung: Alterung der Substratfüllung; 2. Alterung: Alterung der Reparaturfüllung; S: Schleifen als Vorbehandlung; S+A: Schleifen und Abstrahlen als Vorbehandlung; Adhäsiv: Universaladhäsiv

Abb. 40: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 41-48

Die Analyse der Bruchart der Prüfkörper mit *Surefil one*™ als Substratfüllung zeigte je nach Vorbehandlungsmaßnahme unterschiedliche Versagensmuster.

Bei den Prüfgruppen (33, 34, 41, 42), die lediglich abgeschliffen wurden, wurde ein rein adhäsiv bedingtes Versagen festgestellt. Mit zusätzlichem Abstrahlen stieg der Anteil des Mischbruchs Typ 2 durch die Verbundfläche und die Reparaturfüllung von 13 % (Prüfgruppe 37) auf bis zu 57 % (Prüfgruppe 46) an. Prüfgruppe 46 erreichte zudem mit 10,4 MPa die höchste Scherfestigkeit unter den abgeschliffenen Prüfkörpern. In der Prüfgruppe 38 mit gealterten Substratfüllung zeigte sich außerdem zu 14 % ein Mischbruch Typ 1 durch Verbundfläche und Substratfüllung.

Wurde zusätzlich das Universaladhäsiv aufgetragen nahm der Anteil des Mischbruchs Typ 2 durch die Verbundfläche und die Reparaturfüllung weiter zu; maximal war dies mit 86 % in Gruppe 47, und der Anteil des adhäsiven Bruchs nahm ab. Mit steigender Scherfestigkeit der Prüfgruppen 40 und 48, die zusätzlich abgestrahlt wurden und deren Reparaturfüllung nicht gealtert wurde, verschob sich das Ausmaß des Mischbruchs Typ 2 hin zum Mischbruch Typ 1. Der Anteil des Mischbruchs Typ 1 betrug in Prüfgruppe 48 57 % und in Prüfgruppe 40 86 %.

4. Diskussion

Basierend auf den gesammelten Scherfestigkeitswerten sollte eruiert werden, inwieweit sich *Surefil one*TM zur Reparatur bestehender Füllungen verschiedener Werkstoffklassen eignet. Dabei sollten die Auswirkungen der verschiedenen Vorbehandlungsmaßnahmen auf den Verbund zwischen der Substrat- und Reparaturfüllung analysiert werden. Zusätzlich sollte der Einfluss der Alterung auf die Qualität des Verbunds differenziert werden.

Die vorliegende Studie wurde *in vitro* durchgeführt. Dadurch konnten die Herstellungs-, Alterungs- und Prüfbedingungen für alle Prüfkörper möglichst identisch gehalten werden. Dies ermöglichte präzise Messungen und eine hohe Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Darüber hinaus konnten die Auswirkungen der unterschiedlichen Vorbehandlungsmaßnahmen der zu reparierenden Füllungsoberfläche im Vergleich zu negativen Kontrollgruppen erfasst werden. Nach Frankenberger et al. (2007) und Lohbauer et al. (2008) liefern *In-vitro*-Studien bei der Untersuchung dentaler Werkstoffe Ergebnisse, die eine grundlegende Einschätzung über das Leistungspotential des Werkstoffs *in vivo* ermöglichen. Deshalb sind die präklinisch gesammelten Ergebnisse aus ethischen Gründen unerlässlich, um eine mögliche Schädigung des Patienten ausschließen zu können.

Trotz der genannten Vorteile sind *In-vitro*-Studien jedoch nicht in der Lage, die vollständigen und komplexen intraoralen Bedingungen widerzuspiegeln. Daher ist es stets notwendig, insbesondere bei neuartigen Füllungsmaterialien wie dem hier untersuchten, die Ergebnisse durch *In-vivo*-Untersuchungen zu ergänzen und die Relevanz und Übertragbarkeit zu bestätigen.

4.1 Methoden

Der Versuchsaufbau dieser Studie orientierte sich, wie oben bereits erwähnt, an der DIN EN ISO 29022:2013, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit anderen Studien zu gewährleisten, die ebenfalls nach dieser Norm durchgeführt wurden.

Die Herstellung und Auswertung der Prüfkörper wurden unter standardisierten Laborbedingungen und von einem einzigen Versuchsleiter durchgeführt, um Differenzen in diesen Prozessen so gering wie möglich zu halten. Die verwendeten Materialien wurden dabei

stets exakt nach Herstellerangaben verarbeitet und nur Materialien der gleichen Charge verwendet, um eine hohe Aussagekraft der Ergebnisse sicherzustellen.

Vor Beginn der eigentlichen Studie wurden probeweise Prüfkörper hergestellt und ausgewertet, um die Verarbeitung der Materialien sowie den Versuchsaufbau und die anschließende Auswertung zu erproben und eventuelle Probleme auszuschließen.

4.1.1 Herstellung der Prüfkörper

4.1.1.1 Verwendete Materialien

Da *Surefil one*TM einer neuartigen Werkstoffklasse von Komposithybriden zuzuordnen ist, gibt es derzeit noch keine weiteren Studien, mit denen die Reparaturfähigkeit dieses Füllungsmaterials verglichen werden kann. Daher müssen für diese Diskussion In-vitro-Studien zur Reparaturfähigkeit von Kompositen und kunststoffmodifizierten Glasionomerzementen als Vergleich herangezogen werden. Es gibt jedoch nur wenige Studien, die sich mit der Reparaturfähigkeit der letztgenannten Werkstoffklasse beschäftigen.

Bisher konnte *Surefil one*TM in einer In-vivo-Studie von Rathke et al. (2022) bei 84 % der untersuchten Klasse I-, II- und V-Füllungen mit zufriedenstellenden Eigenschaften überzeugen. Diese Untersuchung erstreckte sich allerdings nur über einen Zeitraum von einem Jahr.

In Bezug auf die Haftfestigkeit zu Dentin und Schmelz gibt es mehrere In-vitro-Studien. Francois et al. (2021) stellten ohne Vorbehandlung der Dentinoberfläche Haftwerte von 14,0 MPa fest. Bei vorherigem Auftragen eines Universaladhäsives (*Scotchbond Universal*TM) stiegen die ermittelten Haftwerte auf 20,9 MPa. Zudem stellten sie in ihrer Untersuchung fest, dass die Biegefestigkeit des dualhärtenden Füllungsmaterials durch Lichthärtung höher war als durch alleinige Selbsthärtung. Yao et al. (2020a) verzeichneten in ihrer Untersuchung zum Haftverbund zu Dentin eine Zugfestigkeit von 15,4 MPa.

Sadeghyar et al. (2022) ermittelten eine Scherfestigkeit von 9,1 MPa zur Dentinoberfläche. Dies war im Vergleich zu weiteren untersuchten selbstadhäsiven Füllungsmaterialien in dieser Studie der höchste Wert. In einer weiteren In-vitro-Studie zum Verbund zum Schmelz wurden Scherfestigkeitswerte von 22,7 MPa festgestellt, hierbei wurde das Material lichtgehärtet (Latta et al., 2020b). Durch diese erreichten Werte ist *Surefil one*TM als

neuartiges Füllungsmaterial, wie bereits in der Einleitung erwähnt, zwischen den Haftwerten von konventionellen Kompositen und Glasionomern zuordnen.

Die erreichten Werte in dieser Studie sind nicht direkt mit den oben genannten zu vergleichen, da der Verbund zu unterschiedlichen Füllungsmaterialien und nicht zur Zahnhartsubstanz untersucht wurde. Grundsätzlich sind diese jedoch unter den oben aufgeführten Werten einzuordnen. Der Mittelwert der Scherfestigkeiten der Prüfgruppen im Verbund zu Komposit lag bei 10,31 MPa ($\pm 6,55$ MPa). Im Verbund zu *Surefil one*TM als Substratfüllung wurde 7,33 MPa ($\pm 5,79$ MPa) und im Verbund zu Glasionomern 2,32 MPa ($\pm 3,74$ MPa) ermittelt.

4.1.1.2 Vorbehandlung der Oberfläche

In der Einleitung wurde bereits auf die verschiedenen Möglichkeiten der Vorbehandlung der Füllungsfläche, die eine Erhöhung der Haftwerte ermöglichen, eingegangen.

Die Schaffung einer mikroretentiven Oberfläche ist für den Verbund einer Reparaturfüllung maßgeblich. Durch das Anrauen der bestehenden Füllung mittels eines Rotring-Diamantfräasers (mittlere Körnung von 46 μm) wird zum einen eine Reinigung der Oberfläche und zum anderen eine Vergrößerung dieser erzeugt. Dadurch wird ein besserer Verbund erreicht als durch ein Auslassen dieser Vorbehandlungsmaßnahme (Celik et al., 2011). Da das Anrauen mittels eines Diamantfräasers in der Praxis eine sehr einfache und nachgewiesene effektive Maßnahme ist, wurde sie in dieser Studie bei allen Prüfgruppen angewandt und ihre Auswirkung nicht durch weitere negative Kontrollgruppen untersucht. Hierzu wurde Schleifpapier mit einer Körnung verwendet, die der Körnung eines Rotring-Diamanten entspricht, da dieser auf der zur Füllung angrenzenden Zahnhartsubstanz eine möglichst geringe Schmierschicht hinterlässt. Dies ist bei der Verwendung von *Surefil one*TM von besonderer Bedeutung, da mit einer dicker werdenden Schmierschicht die Haftwerte von *Surefil one*TM zur Zahnhartsubstanz abnehmen (Latta et al., 2020b).

Eine weitere noch effektivere Möglichkeit der Oberflächenvergrößerung und Erzeugung einer mikroretentiven Oberfläche, die zudem in einer Erhöhung der Benetzbarkeit resultiert, bietet das Abstrahlen der Oberfläche (Loomans et al., 2011). Des Weiteren wird dadurch die Entfernung einer eventuell vorliegender Schmierschicht erreicht. In dieser Studie wurde, wie oben bereits beschrieben, das Strahlmittel Aluminiumoxid *Korox*[®] mit

einer Partikelgröße von 50 µm verwendet. Um die so erzeugte mikroretentive Oberfläche für den Verbund nutzen zu können, ist es unabdingbar nach dem Abstrahlen der Füllung ein niedrigvisköses Adhäsiv aufzutragen, das die Eigenschaft besitzt in die geschaffenen Retentionen zu infiltrieren (Bouschlicher et al., 1997; Qaw et al., 2020). Damit eine mikro-mechanische Verankerung der Reparaturfüllung über das aufgetragene Adhäsiv gewährleistet ist. Cho et al. (2013), Rathke et al. (2009) und Sismanoglu (2019) konnten in ihren Studien keinen Unterschied aufzeigen, ob die Oberfläche rein mit Aluminiumoxid abgestrahlt und Adhäsiv aufgetragen wurde oder ob durch ein tribochemisches Verfahren die Oberfläche silikatisiert, silanisiert und Adhäsiv aufgetragen wurde. Zudem kann ein unbeabsichtigtes Abstrahlen angrenzender Zahnhartsubstanz mit siliziumbeschichteten Aluminiumoxid eine negative Auswirkung auf Verbund der Zahnhartsubstanz zu Komposit bewirken (Göstemeyer, 2016). Aufgrund dieser Ergebnisse wurde sich in diesem Studienaufbau für eine Verwendung von unbeschichtetem Aluminiumoxid entschieden. Durch Abstrahlen der Substratfüllungen konnte in dieser Studie die Scherfestigkeit bei 75 % der Prüfgruppen im Vergleich zu ihren Negativkontrollgruppen signifikant gesteigert werden. Bedacht werden muss lediglich, dass ein intraorales Abstrahlen einen großen apparativen Aufwand und eine Belastung der Atemwege des Patienten durch ein Aerosol aus Strahlmittel und Abriebpartikel in sich birgt (Loomans et al., 2011; Rathke et al., 2009). Daher sollte diese Methode im Idealfall beim Patienten unter Anwendung eines Kofferdams durchgeführt werden.

In der Beschreibung des Versuchsaufbaus wurde bereits auf den Mechanismus, durch den die Applikation eines Adhäsivs den Verbund zwischen den Füllungsoberflächen steigert, eingegangen. Wesentlich ist, dass durch die Infiltration der Monomere in die durch das Anrauen oder durch zusätzliches Abstrahlen vergrößerte Oberfläche der bereits polymerisierten Matrix der bestehenden Füllung und das Vernetzen der durch die Lichthärtung wachsenden Polymerketten mit den bereits vorhanden Polymerketten ein mikromechanischer Verbund hergestellt wird (Tezvergil et al., 2003). Um eine möglichst ausgeprägte Infiltration der Monomere in der Oberfläche der Substratfüllung zu ermöglichen, wurde die vom Hersteller geforderte Applikationsdauer von 20 s in dieser Studie strikt eingehalten. Das Auftragen eines Adhäsivs ist der wichtigste Parameter für die Haftung der Reparaturfüllung an der insuffizienten Füllung (Valente et al., 2016).

Die Generation bzw. Art des verwendeten Adhäsivs ist dabei für die Qualität des Verbundes nicht entscheidend (Rathke et al., 2009; Iversen et al., 2011).

Staxrud und Valen (2022) verglichen in ihrer In-vitro-Studie unter anderem das in dieser Studie verwendete *Prime&Bond active*® mit dem als Goldstandard angesehenem 2-Flaschen-Adhäsiv OptiBond™ FL (Firma Kerr GmbH, Herzogenrath, Deutschland) als Kontrollgruppe. Dabei untersuchten sie den Verbund zwischen zwei Kompositfüllungen, die laut Definition als eine homotype Reparaturfüllung bezeichnet wird. Nach einer einjährigen Wasserlagerung wiesen die mit *Prime&Bond active*® behandelten Prüfkörper eine signifikant höhere Scherkraft auf als die Kontrollgruppe. Die Autoren vermuten, dass das in *Prime&Bond active*® enthaltene saure funktionelle Monomer MDP (10-Methacryloyloxydecyldihydrogenphosphat) hydrolysestabiler ist als das in der Formulierung von OptiBond™ FL enthaltende GPDM (Glycerinphosphatdimethacrylat). Blum et al. (2021) stellten ebenfalls fest, dass Adhäsive mit dem funktionellen Monomer MDP anderen Adhäsiven, die dieses nicht in ihrer Zusammensetzung beinhalten, in Bezug auf den Verbund bei der Kompositfüllungsreparatur überlegen sind.

Klaisiri et al. (2022) erprobten in ihrer Studie den Verbund einer heterotypen Reparaturfüllung zwischen zwei Werkstoffklassen, einem kunststoffmodifizierten Glasionomerzement zu einer bestehenden Füllung aus Komposit. Das Aufbringen des Adhäsivs auf die Reparaturfläche erhöhte dabei die Scherfestigkeit der untersuchten Prüfkörper signifikant. Dies zeigt, dass die einfacher anzuwendenden und modernen Universaladhäsive für eine Füllungsreparatur den konventionellen Adhäsiven mehr als ebenbürtig sind. Auch in der vorliegenden Studie konnte durch die Applikation des Universaladhäsivs bei 96 % der Prüfgruppen die Scherfestigkeit signifikant zu ihren Negativkontrollgruppen gesteigert werden.

4.1.1.3 Künstliche Alterung

Die künstliche bzw. artifizielle Alterung umfasste in dieser Untersuchung die Simulation der thermischen Belastung in der Mundhöhle. In vivo können Temperaturunterschiede von -5 °C bis 75 °C erreicht werden, die durch die Isolierwirkung des Schmelzmantel nach 0,5 mm nur noch 16 °C bis 43 °C betragen (Kappert und Schürren, 1996). Um diesen Bereich großzügig abzudecken, wurde für den Versuchsaufbau eine Temperatur von 5 °C und 55 °C gewählt. Dabei wurde der thermische Lastwechsel über 10.000 Zyklen für 30 s

pro temperiertem Wasserbad durchgeführt. Eine exakte Einschätzung, welchen Zeitraum 10.000 thermische Lastwechsel in vivo entsprechen, gibt es nicht. Gale und Darvell (1999) geben dafür jedoch annäherungsweise den Zeitraum für ein Jahr In-vivo-Belastung an. Durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Werkstoffe entstehen Spannungen im Verbund der beiden Füllungen, die sich negativ auf die Haftung auswirken. Zudem können Mikrofrakturen in der jeweiligen Füllung resultieren und der Verbund zwischen Füllkörper und Matrix der Füllung geschwächt werden (Kawano et al., 2001). Unmittelbar vor der Auswertung wurden sowohl die gealterten als auch die ungealterten Prüfkörper für 24 h bei 37 °C in destilliertem Wasser gelagert, um die gegebenenfalls durch die thermische Wechsellast übermäßig aufgebauten Spannungen im Prüfkörper abzubauen.

Neben der thermischen Belastung der Prüfkörper kommt es durch das Eintauchen in destilliertes Wasser zu einer hydrolytischen Reaktion und Wasseraufnahme der Füllungsmaterialien (McCabe und Rusby, 2004). Dies hat eine negative Auswirkung auf die physikalische und strukturelle Integrität der Füllungsmaterialien zur Folge. Dabei ist vor allem die hydrophile Silanschicht der Füllkörper eine Schwachstelle (Ortengren et al., 2001). Außerdem werden Komponenten, wie nicht reagierte Restmonomere und Füllkörper herausgelöst.

Neben der thermischen Alterung und der Wasserlagerung der Prüfkörper, gibt es noch weitere angewandte künstliche Alterungsmethoden bei In-vitro-Studien, die darüber hinaus eine mechanische Beanspruchung der Prüfkörper simulieren. Ihr Einfluss auf den Haftverbund wird aus Gründen der Komplexität in dieser Studie nicht untersucht.

4.1.2 Auswertung der Prüfkörper

Neben dem in der DIN EN ISO 29022:2013 geforderten Scherversuch zur Bestimmung der Qualität des Verbundes zweier Werkstoffe bzw. Füllungsmaterialien, die in der Zahnmedizin präklinisch erprobt werden sollen, bestehen weitere Untersuchungsmethoden, wie der oftmals verwendete Zugversuch.

Dabei können die ermittelten Haftwerte je nach Auswertungsmethode und Konstruktion der Prüfkörper voneinander differieren. Anhand der Größe der Oberfläche, über die die beiden Werkstoffe verbunden sind, werden die Auswertungsmethoden in Mikro- oder

Makro-Tests eingeteilt. Die Grenze der Verbundfläche ist nach Definition auf 2 mm^2 festgelegt (Münchow et al., 2013). Demnach ist die nach DIN EN ISO 29022:2013 geforderte Auswertung der Prüfkörper, die eine Verbundfläche von $4,45 \text{ mm}^2$ besitzen, als Makro-Scherversuch einzuordnen. Größere Verbundflächen besitzen eine größere Wahrscheinlichkeit für Fehlstellen bzw. Inhomogenitäten in dem Verbund und für eine unregelmäßigere Belastung der Grenzflächen während der Auswertung. Scherrer et al. (2010) ermittelten, dass ein Mikro-Test mit einer Verbundfläche von 1 mm^2 zwei bis dreimal höhere Haftwerte ergeben als ein Makrotest mit einer Verbundfläche von 7 mm^2 . Die Herstellung der Prüfkörper bzw. Prüfstäbchen für den Mikrozugversuch birgt jedoch die Gefahr, dass es durch das Sägen in $1 \times 1 \text{ mm}$ breite Prüfstäbchen zu einer Mikrorissbildung im Verbund oder zu einem vorzeitigen Versagen kommen kann. Daher wird für den Mikrozugversuch eine höhere Anzahl an Prüfkörpern benötigt (Gallusi et al., 2010). Die Geometrie der Querschnittsfläche, ob eine rechteckige oder runde Verbundfläche bei der Herstellung der Prüfkörper angewandt wird, hat einen geringeren bis keinen Einfluss auf die ermittelten Haftwerte (Ismail et al., 2021).

Die jeweilige Wahl des Testverfahrens, ob ein Zug- oder Scherversuch durchgeführt wird, hat ebenfalls Auswirkung auf die ermittelten Haftwerte. Beim Scherversuch werden die Prüfkörper bzw. die aufgesetzten Reparaturfüllungen durch einen Scherarm bis zum Versagen des Verbundes belastet. Dabei kann der Scherarm entweder eine Form ähnlich einer geraden Messerklinge oder eine Scherklinge mit einer halbkreisförmigen Aussparung besitzen, die den Kompositzylinder möglichst kongruent umfasst. Letzteres wurde in dieser Studie angewandt. Die Prüfung mit einer halbkreisförmigen Aussparung des Scherarms ist jedoch schwieriger durchzuführen, da bei der Auswertung die Prüfkörper bzw. Kompositzylinder exakt in die Aussparung positioniert werden müssen. Ansonsten können Verkeilungen zwischen Scherarm und Kompositzylinder entstehen, die das Messergebnis verfälschen (Schwertner, 2010). Weiter ist bei der Positionierung des Scherarms darauf zu achten, dass die resultierende Krafteinwirkung auf den Prüfkörper so nah wie möglich an die Grenzfläche zwischen Substratfüllung und Kompositzylinder eingeleitet wird. Mit größer werdender Distanz zwischen Position der Krafteinwirkung und der Grenzflächen steigt das Biegemoment auf den Prüfkörper (Rasmussen, 1996).

Beim Zugversuch wird die Kraft aufgezeichnet, die benötigt wird, um ein Füllungsmaterial rechtwinklig von einem anderen Füllungsmaterial abzuziehen. Durch diese gleichmäßigere Krafteinwirkung werden im Vergleich zum Schertest weniger kohäsive Versagensmuster verzeichnet, die aufgrund des entstehenden Biegemomentes und der unterschiedlichen Stressverteilung beim Schertest vermehrt resultieren (Gallusi et al., 2010). Scherrer et al. (2010) stellten fest, dass die durchschnittlich ermittelten Werte für die Zugversuche höher sind als die Werte für die Scherversuche.

Trotz dieser Einschränkungen des Scherversuchs machen vor allem die einfache Probenherstellung, der geringe Bedarf an komplexer Laborausrüstung und die geringe Anzahl von Proben, die vor der Auswertung versagen, diesen Test zur am häufigsten verwendeten Auswertungsmethode (Fornazari et al., 2020).

Beim Vergleich der evaluierten Haftfestigkeitswerte unterschiedlicher Studien ist somit eine Beachtung des Studienaufbaus und vor allem der Abscher- oder Abzugsprüfung elementar. Bei größeren Unterschieden im Studienaufbau sind in der Regel nur die Reihenfolge der ermittelten Werte der Proben vergleichbar, nicht jedoch die absoluten Werte (Braga et al., 2010).

4.1.3 Verteilung der Brucharten

Durch die Untersuchung und Differenzierung der Brucharten der abgescherten Prüfkörper soll die Beziehung zwischen Verlauf des Bruchs und der Scherfestigkeit aufgezeigt werden. Dabei resultieren, wie es Fornazari et al. (2017) bereits in ihrer Studie zeigten, adhäsive Versagensmuster in der Regel bei geringeren Haftwerten. Kohäsive Versagensmuster werden hingegen bei höheren Haftwerten verzeichnet, da die interagierenden Grenzflächen der Füllungen unversehrt bleiben und keinen Schwachpunkt bilden. Bei einem kohäsiven Bruch ist die geringere Biegefestigkeit des verwendeten Füllungsmaterial der Grund für den Frakturverlauf. Diese Relation zwischen Versagensmuster und der dazugehörigen Haftwerte zeigt sich auch bei der Untersuchung der Prüfkörper in dieser Studie. Es sollte jedoch bedacht werden, dass einige kohäsive Brüche möglicherweise aufgrund der Durchführung des Scherfestigkeitstests entstanden sind und dass ihre Anzahl bei Durchführung eines Zugtests eventuell geringer gewesen wäre.

4.2 Diskussion der Ergebnisse

Die ermittelten Scherfestigkeitswerte zeigen, dass Unterschiede im Verbund der verschiedenen Füllungsmaterialkombinationen bestehen.

Bei den Prüfgruppen, deren Substratfüllung aus Glasionomerzement hergestellt wurde, erreichte *Surefil one*TM, wie die ANOVA und der Tukey-Test zeigten, im Vergleich zu allen Prüfgruppen mit Komposit-Substratfüllungen signifikant geringere Haftwerte. Unter den Prüfgruppen mit *Surefil one*TM-Substratfüllung gab es signifikante Unterschiede zu 75 % der Prüfgruppen mit Glasionomerzement-Substratfüllung. In allen signifikanten Fällen wiesen die Prüfgruppen mit Glasionomerzement-Substratfüllungen niedrigere Scherfestigkeiten auf.

Die durchschnittliche ermittelte Scherfestigkeit für die Prüfgruppen 1 bis 16 lag bei 2,32 MPa ($\pm 3,74$ MPa). Diese Prüfgruppen wiesen zudem die meisten Verbundversagen vor der Abscherprüfung auf. Bei den Prüfgruppen 1, 5 und 9 versagte der Verbund bei allen Prüfkörpern während der Alterung der Reparaturfüllung. Die Vorbehandlung dieser Prüfkörper bestand darin, dass die Substratfüllung beschliffen wurde (Prüfgruppen 1 und 9) bzw. zusätzlich abgestrahlt wurde (Prüfgruppe 5).

Durch Abstrahlen der Substratfüllung konnten in 50 % der Prüfgruppen signifikant höhere Scherfestigkeiten im Vergleich zu den negativen Kontrollgruppen erreicht werden. Diese signifikanten Unterschiede traten nur bei den Prüfgruppen auf, bei denen zusätzlich das Adhäsiv aufgetragen wurde. Ohne Applikation des Adhäsiv konnte kein signifikanter Unterschied der abgestrahlten Substratfüllungen zu ihren negativen Kontrollgruppen festgestellt werden. Demnach ist ein niedrigvisköser Haftvermittler nötig, um die Oberflächenvergrößerung und die Schaffung der mikroretentiven Strukturen der Glasionomerzementfüllung auszunutzen. Daher sollte der Verbund eher als mikromechanisch betrachtet werden, da das hochvisköse *Surefil one*TM allein keinen ausreichenden Verbund mit dem Glasionomerzement eingehen kann. Eine Studie von Welch et al. (2015), in der die Scherfestigkeit und Reparaturfähigkeit von kunststoffmodifizierten Glasionomerzementen untersucht wurde, gelangte ebenfalls zu dem Schluss, dass das Auftragen eines Adhäsivs aufgrund des Kompositanteils der kunststoffmodifizierten Glasionomerzemente einen signifikant positiven Einfluss auf den Verbund hat.

Die Applikation des Adhäsivs führte unabhängig vom zusätzlichen Abstrahlen in allen Prüfgruppen zu einer signifikant höheren Scherfestigkeit. In einer Studie von Francois et al. (2019) wurde der Verbund zwischen einem Komposit und einem hochviskösen Glasiomerzement untersucht, wobei ebenfalls der positive Einfluss eines Universaladhäsivs unabhängig von weiteren Vorbehandlungen festgestellt wurde. Die Alterung der Reparaturfüllung führte zu signifikanten Unterschieden in Bezug auf die Verringerung der Scherfestigkeit der Prüfkörper, deren Substratfüllung bereits gealtert wurde. Bei den Prüfgruppen, deren Substratfüllung nicht gealtert wurde, wurde nur bei der Prüfgruppe, bei der die Vorbehandlung allein aus Abschleifen bestand, eine signifikante Reduktion festgestellt. Dies lässt darauf schließen, dass eine Reparatur in derselben Behandlungssitzung einen besseren Verbund liefert als eine Reparatur nach einem einjährigen Liegezeitraum der Füllung.

Die erreichte Scherfestigkeit der Prüfgruppe 7, die sowohl beschliffen und abgestrahlt als auch mit Adhäsiv vorbehandelt wurde, lag mit 2,91 MPa ($\pm 0,93$ MPa) deutlich unter den angestrebten 15 MPa für einen kraftschlüssigen Verbund einer Reparaturfüllung. Darüber hinaus wurde bei dieser Prüfgruppe sowohl die Substrat- als auch die Reparaturfüllung einer künstlichen Alterung unterzogen, wodurch die Ergebnisse am ehesten auf klinische Situationen übertragbar sind. Die ungealterte Kontrollgruppe erreichte eine Scherfestigkeit von 9,75 MPa ($\pm 3,16$ MPa), was auch den Einfluss der Alterung auf die Qualität des Verbundes zeigt.

Die Prüfgruppen 17 bis 32, bei denen das Substrat aus Komposit hergestellt wurde, erreichten im Vergleich zu den beiden anderen Füllungsmaterialien die höchste Scherfestigkeit von 10,31 MPa ($\pm 6,55$ MPa). Im Verbund zwischen Komposit und *Surefil one*TM trat bei keinem der Prüfkörper während des künstlichen Alterungsprozesses ein vorzeitiges Versagen auf.

Durch das Abstrahlen der Kompositoberfläche konnte bei 87,5 % der Prüfgruppen eine signifikante Erhöhung der Scherfestigkeit beobachtet werden. Diesen Effekt des Abstrahlens der Kompositfüllung ermittelten Ugurlu et al. (2022) ebenfalls in ihrer Studie. Lediglich bei der Prüfgruppe 21, bei der sowohl die Substrat- als auch die Reparaturfüllung gealtert wurde und kein Adhäsiv appliziert wurde, konnte kein signifikant positiver Einfluss des Abstrahlens nachgewiesen werden. Dennoch lag der absolute Wert der Scherfestigkeit

mit 3,51 MPa ($\pm 1,79$ MPa) über der negativen Kontrollgruppe, für die eine Scherfestigkeit von 2,12 MPa ($\pm 2,21$ MPa) ermittelt wurde. Durch den Effekt des Abstrahlens der Kompositoberfläche wird deutlich, dass *Surefil one*TM die Fähigkeit besitzt, die mechanische Modifizierung der Oberflächenstruktur selbst durch alleiniges Beschleifen besser zu nutzen. Trotz seiner hochviskösen Eigenschaften scheinen entweder die erzeugten Mikroretentionen im Komposit vorteilhafter zu sein oder das Verflechten der wachsenden Polymerketten mit den bestehenden Polymerketten des Komposits scheint ein Grund für die Steigerung der Scherfestigkeit zu sein.

Der Effekt der Applikation des Adhäsiv war ebenfalls bei 87,5 % der Prüfgruppen signifikant positiv. Diese Auswirkung wurde auch in weiteren Studien festgestellt (Akgül et al., 2021; Altinci et al., 2018; Chuenweravanich et al., 2022; Yin et al., 2022). Einzig bei der Prüfgruppe 19 wurde kein signifikanter Unterschied zu ihrer negativen Kontrollgruppe festgestellt, auch wenn der absolute Wert mit 3,63 ($\pm 2,74$) höher war als der Wert der negativen Kontrollgruppe mit 2,12 MPa ($\pm 2,21$ MPa). Die Vorbehandlung der Prüfgruppe 19 umfasste das Beschleifen sowie die künstliche Alterung der Substrat- und Reparaturfüllung. Der positive Effekt des Adhäsivs liegt, ähnlich wie beim Glasionomerezement, in der Infiltration der Monomere in die mikroretentive Oberfläche (Altinci et al., 2018). Zudem ist eine Verlängerung der freien Doppelbindungen im ungealterten Komposit möglich. Diese Verlängerung ist jedoch gemäß Welch et al. (2015) nur bei Reparaturen, die in derselben Sitzung oder in den ersten Tagen erfolgen, zu beobachten, da die Anzahl der freien Doppelbindungen mit zunehmender Liegedauer der Füllung kontinuierlich abnimmt.

Dies zeigt auch die Auswirkung der Alterung auf die Scherfestigkeit, da alle gealterten Kompositfüllungen signifikant geringere Scherfestigkeiten im Vergleich zu ihren negativen Kontrollgruppen verzeichneten. Die negative Auswirkung der Alterung auf den Verbund konnte zudem auch in weiteren Studien (Chuenweravanich et al., 2022; Dieckmann et al., 2020; Yin et al., 2022) evaluiert werden.

Die Prüfgruppe 23, bei der sowohl das Beschleifen und Abstrahlen als auch die Adhäsivvorbehandlung durchgeführt wurde, erreichte eine Scherfestigkeit von 11,65 MPa ($\pm 4,36$ MPa). Dennoch liegt diese Scherfestigkeit immer noch unter dem angestrebten Wert von 15 MPa. Im Gegensatz dazu erreichte die negative Kontrollgruppe, bei der die Substratfüllung nicht gealtert war und somit eine frühzeitige Füllungsreparatur darstellte, eine ausreichende Scherfestigkeit von 19,75 MPa ($\pm 1,92$ MPa).

Bei den Prüfgruppen 33 bis 48, die die homotype Füllungsreparatur darstellen, wurde sowohl die Substratfüllung als auch die Reparaturfüllung aus *Surefil one*TM hergestellt. Die durchschnittlich erreichte Scherfestigkeit lag bei 7,33 MPa ($\pm$ 5,79 MPa), was zwischen den Haftwerten der beiden anderen Füllungsmaterialien liegt. Es konnte gezeigt werden, dass sich 75 % der Prüfgruppen von den Prüfgruppen der Komposit-Substratfüllungen unterschieden. Dabei wiesen die Prüfgruppen mit Komposit-Substratfüllungen, mit Ausnahme der Prüfgruppe 19, jeweils eine signifikant höhere Scherfestigkeit auf.

Durch das Abstrahlen der Komposithybridoberfläche stieg bei 87,5 % der Prüfgruppen die Scherfestigkeit signifikant. Nur die Prüfgruppe 33, deren Substrat- und Reparaturfüllung gealtert und kein Adhäsiv appliziert wurde, wies keinen signifikant positiven Effekt des Abstrahlens auf. Dennoch lag der absolute Wert der Scherfestigkeit mit 1,06 MPa ($\pm$ 1,01 MPa) geringfügig höher als die Scherfestigkeit der negativen Kontrollgruppe, deren Oberfläche nur beschliffen wurde und 0,49 MPa ($\pm$ 0,62 MPa) betrug. Es wird deutlich, dass das Abstrahlen der Oberflächen auch bei der Verwendung von *Surefil one*TM als Substratfüllung zu einer höheren Scherfestigkeit führt. Die strukturelle Modifikation der Oberfläche fördert also den Verbund sowohl mit als auch ohne die Verwendung eines Adhäsivs. Es ist anzunehmen, dass *Surefil one*TM bei der homotypen Reparatur die mikromechanischen Retentionen besser nutzen kann und möglicherweise auch eine Verlängerung der Polymerketten in der ungealterten Substratfüllung auftritt, die zu einer chemischen Bindung führt. Allerdings muss beachtet werden, dass das Ausmaß der chemischen Bindung als gering anzusehen ist, da sich die gealterten Substratfüllungen im Vergleich zu ihren ungealterten Kontrollgruppen nur in der Prüfgruppe 37 signifikant unterschieden.

Die Applikation des Adhäsivs hat in allen Prüfgruppen zu einer signifikanten Steigerung der Scherfestigkeit geführt. Dies unterstreicht den deutlichen Vorteil dieser Vorbehandlungsmethode gegenüber anderen Maßnahmen bei Reparaturen mit verschiedenen Füllungsmaterialien, wie auch von anderen Autoren in ihren Studien bestätigt wurde (Altinci et al., 2018; Francois et al., 2019; Klaisiri et al., 2022; Wendler et al., 2016).

Die Prüfgruppe 39, die sowohl beschliffen und abgestrahlt als auch mit Adhäsiv vorbehandelt wurde, erreichte eine Scherfestigkeit von 12,01 MPa ($\pm$ 4,29 MPa). Dieser Wert liegt jedoch auch unter den angestrebten 15 MPa. Die ungealterte Kontrollgruppe konnte hier mit 15,57 MPa ($\pm$ 2,39 MPa) eine ausreichende Scherfestigkeit erreichen. Es ist zu

beachten, dass diese Kontrollgruppe eine frühzeitige Füllungsreparatur in derselben Sitzung darstellt.

4.3 Schlussfolgerung

Trotz der Limitation der Studie ergeben sich folgende Maßnahmen für die klinische Anwendung von *Surefil one*TM als Reparaturmaterial insuffizienter Füllungen.

Im Vergleich der ermittelten Scherfestigkeiten zu der Anforderung, die eine Reparaturfüllung erreichen soll, waren alle gealterten Prüfgruppen dieser unterlegen, sodass hier die Haftung im klinischen Kontext grundsätzlich kritisch betrachtet werden muss. Die ermittelten Scherfestigkeiten nahmen in diesem Versuchsaufbau im Verbund zu den Füllungsmaterialien in der Reihenfolge Komposit, *Surefil one*TM und Glasionomerzement ab. Andere Autoren, wie Lucena-Martín et al. (2001), betonen, dass nicht nur der absolute Wert der Scherfestigkeit, sondern auch die Art des Bruchs als Indikator für einen ausreichenden Verbund betrachtet werden sollte. So kann ein kohäsiver Bruchverlauf ebenfalls als Bestätigung angesehen werden, dass die Füllungsreparatur den intraoralen Belastungen standhält. Jedoch wurden nur wenig rein kohäsive Versagensmuster registriert, sondern überwiegend gemischt adhäsiv-kohäsive Bruchverläufe festgestellt.

Somit muss man festhalten, dass für die rein zentrale Reparatur- bzw. Einschlussfüllung die erreichten Scherfestigkeiten nicht auf einen genügenden und langfristigen Verbund in vivo schließen lassen. Die Studie von Maneenut et al., (2010) über den Verbund zwischen kunststoffmodifizierten Glasionomerzementen kommt ebenfalls zu dem Schluss, dass die erzielten Ergebnisse keine ausreichende Haftfestigkeit im Mund vorhersagen können. Es ist wichtig anzumerken, dass die zentrale Reparatur, die einem Chipping der Füllung ähnelt, im Vergleich zur peripheren Reparatur, bei der die Reparaturfüllung auch einen Verbund zur Zahnhartsubstanz aufbauen kann, im klinischen Alltag eher selten vorkommt. Daher ist es ratsam, zukünftige In-vitro-Studien auch auf die Scherfestigkeit von peripheren Füllungsreparaturen mit *Surefil one*TM zu erweitern und zu evaluieren.

Basierend auf den ermittelten Ergebnissen dieser Studie kann die Indikation für die Verwendung von *Surefil one*TM als semipermanente Füllungsreparatur unterstützt werden. Dies bedeutet, dass die Reparaturfüllung eine begrenzte Liegedauer haben sollte, bis der betroffene Zahn durch eine andere definitive Versorgungsmöglichkeit, wie beispielsweise eine Einlagefüllung oder eine Krone, behandelt wird.

Bei den Vorbehandlungsmaßnahmen hat sich gezeigt, dass sowohl das Abstrahlen der bestehenden Füllung, unabhängig vom Füllungsmaterial, als auch das Auftragen des Adhäsivs positive Effekte auf den Verbund zur Reparaturfüllung haben. Dies nimmt dem neuartigen Komposithybrid jedoch seinen Vorteil der geringen Techniksensitivität, der sich in der sonst einfachen und effizienten Verarbeitung zeigt. Durch das Abstrahlen und die Verwendung eines Adhäsivs wird der Aufwand in Bezug auf Zeit und apparative Anforderungen vergleichbar mit herkömmlichen Kompositmaterialien. Trotz des erhöhten Aufwands fällt die erzielte Scherfestigkeit jedoch niedriger aus als für herkömmliche Komposite, die sich für eine permanente Füllungsreparatur besser eignen als *Surefil one*TM.

5. Zusammenfassung

Im zahnmedizinischen Alltag sind Komposite als Füllungsmaterialien aufgrund ihrer Ästhetik und Langlebigkeit nicht mehr wegzudenken. Jedoch besitzen sie in ihrer Anwendung eine große Techniksensitivität und sind in ihrer Verarbeitung im Gegensatz zu anderen Materialien, wie Glasionomerezemente oder Amalgam, mit einem größeren Zeitaufwand verbunden. Die werkstoffkundliche Forschung legt deshalb den Fokus darauf die positiven Eigenschaften der Komposite mit denen der einfachen Verarbeitung anderer Restaurationsmaterialien zu kombinieren. Das Ziel dieser Studie bestand darin festzustellen, inwieweit ein neuartiges Komposithybrid, *Surefil one*TM (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland), als Reparaturmaterial bei der Therapie von insuffizienten bestehenden Füllungen, einen kraftschlüssigen Verbund zu konventionellen Füllungsmaterialien, wie Glasionomerelement und Komposit, eingehen kann. Zudem sollte der Effekt unterschiedlicher Vorbehandlungsmaßnahmen der bestehenden Füllung untersucht werden.

Dafür wurden unterschiedliche Prüfgruppen angelegt. Als Material für die Substratfüllung, die die zu reparierende Füllung darstellte, wurde entweder der Glasionomerelement ChemFil® Rock (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland), das Komposit *Ceram.x Spectra*TM ST (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) oder *Surefil one*TM verwendet. Die Substratfüllung wurde nun entweder künstlich gealtert (5-55 °C, 10.000 Zyklen) oder als Negativkontrollgruppe ungealtert belassen. Alle Prüfkörper wurden in einer Schleifmaschine mittels Schleifpapier entsprechend der Körnung angeraut, die dem zu verwendeten Präparationsdiamanten (46 µm) bei einer intraoralen Füllungsreparatur entspricht. Im Anschluss wurden die Substratfüllungen je nach Prüfgruppe noch zusätzlich mit Aluminiumoxid (Partikelgröße: 50 µm) abgestrahlt und/oder das Universaladhäsiv *Prime&Bond active*[®] (Firma Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) als Vorbehandlung aufgetragen. Nachdem die Reparaturfüllung bestehend aus *Surefil one*TM angefertigt wurde, wurden die Prüfkörper erneut entweder künstlich gealtert (5-55 °C, 10.000 Zyklen) oder als Negativkontrollgruppe ungealtert belassen. Abschließend wurden die Scherfestigkeit und die Versagens-

muster ermittelt sowie die statistische Auswertung durchgeführt. Mittels t-Tests und ANOVA mit dem Tukey-Test als Post-Hoc-Test wurden die Prüfgruppen untereinander verglichen.

Dabei wurde für den Verbund von *Surefil one*TM zu Komposit mit 10,31 MPa ($\pm 6,55$ MPa) die höchste Scherfestigkeit ermittelt. Die registrierten Scherfestigkeiten im Verbund zu *Surefil one*TM als Substratfüllung betrugen 7,33 MPa ($\pm 5,79$ MPa) und im Verbund zu Glasionomerzement 2,32 MPa ($\pm 3,74$ MPa). Dennoch liegen diese Werte unter der anzustrebenden Haftfestigkeit von 15 MPa, die für eine Reparaturfüllung im Verbund zu einer bestehenden Füllung erforderlich ist. Bei den Vorbehandlungsmaßnahmen konnte durch das Aufbringen des Universaladhäsivs bei 96 % und durch das Abstrahlen bei 75 % der Prüfgruppen eine signifikante Steigerung der Scherfestigkeit ermittelt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass sich *Surefil one*TM eher nicht als permanentes Reparaturmaterial für die getesteten Füllungsmaterialien eignet, sondern als semipermanente Therapieoption empfohlen werden sollte. Dies sollte unter der Bedingung erfolgen, dass der zu therapierende Zahn im Anschluss noch definitiv durch eine Einlagefüllung oder Krone zur Stabilisierung weiterversorgt wird.

6. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Zusammensetzung der Mischkapsel von <i>Surefil one</i> TM	24
Abb. 2:	Herstellungsschritte der Prüfkörper; 1. Schritt: Probehalter	30
Abb. 3:	links: Rohling des Probehalters aus Gips; rechts: Probehalter aus PMMA	31
Abb. 4:	Herstellungsschritte der Prüfkörper; 2. Schritt: Substratfüllung	31
Abb. 5:	vordosierte Mischkapsel des Komposithybrides <i>Surefil one</i> TM mit Aktivierungskolben und Kanülenspitze zum Einbringen des Materials	33
Abb. 6:	Probehalter mit eingebrachter Substratfüllung	33
Abb. 7:	Herstellungsschritte der Prüfkörper; 3. Schritt: Vorbehandlung der Substratfüllung	33
Abb. 8:	Anrauen der Prüfkörper durch die Schleifmaschine Phoenix 4000	34
Abb. 9:	Herstellungsschritte der Prüfkörper; 4. Schritt: Reparaturfüllung	36
Abb. 10:	technische Zeichnung des Prüfkörpers; A: Querschnitt; Maße in mm	37
Abb. 11:	links: Bonding Clamp und Bonding Mold Inserts; rechts: Einbringen der Reparaturfüllung	37
Abb. 12:	vollständiger Prüfkörper	38
Abb. 13:	Thermocycler zur künstlichen Alterung der Prüfkörper	38
Abb. 14:	Gliederung der Prüfgruppen in drei Hauptgruppen	39
Abb. 15:	Gliederung der Prüfgruppen durch Alterung und Anrauen	39
Abb. 16:	Gliederung der Prüfgruppen durch Auftragen eines Adhäsivs und Alterung	40
Abb. 17:	modifizierte Abbildung der Prüfspannvorrichtung nach ISO-Norm 29022:2013 (DIN EN ISO 29022:2013-09, 2013) mit ausgesparter Klinge des Scherarms	41
Abb. 18:	Prüfspannvorrichtung mit angenäherter Scherklinge eingebracht in der Zwick Universal-Abzugsmaschine	41
Abb. 19:	schematische Darstellung der entstandenen Brucharten bei der Abscherung	43
Abb. 20:	Beispiel für einen Adhäsionsbruch (Prüfgruppe 2, Prüfkörper 3), Bruchverlauf entlang der Verbundfläche	43

Abb. 21: Beispiel für einen Mischbruch Typ 1 (Prüfgruppe 4, Prüfkörper 4), Bruchverlauf entlang der Verbundfläche (oben rechts) und innerhalb der Substratfüllung (unten links)	44
Abb. 22: Beispiel für einen Mischbruch Typ 2 (Prüfgruppe 20, Prüfkörper 7), Bruchverlauf entlang der Verbundfläche (rechts) und innerhalb der Reparaturfüllung (links)	44
Abb. 23: Beispiel für einen Kohäsionsbruch Typ 1 (Prüfgruppe 16, Prüfkörper 9), Bruchverlauf durch die Substratfüllung	45
Abb. 24: Beispiel für einen Kohäsionsbruch Typ 2 (Prüfgruppe 32, Prüfkörper 2), Bruchverlauf durch die Reparaturfüllung	45
Abb. 25: Beispiel für einen Kohäsionsbruch Typ 3 (Prüfgruppe 32, Prüfkörper 3), Bruchverlauf durch die Substratfüllung (oben) und Reparaturfüllung (unten)	46
Abb. 26: Erläuterung der grafischen Darstellung	47
Abb. 27: grafische Darstellung der Scherfestigkeiten aller Prüfgruppen	48
Abb. 28: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 1-8	50
Abb. 29: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 9-16	51
Abb. 30: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 17-24	52
Abb. 31: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 25-32	53
Abb. 32: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 33-40	54
Abb. 33: Untersuchung der Scherfestigkeit der Prüfgruppen 41-48	55
Abb. 34: Verteilung der Scherhaftfestigkeit in Bezug zur Bruchart	59
Abb. 35: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 1-8	60
Abb. 36: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 9-16	61
Abb. 37: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 17-24	63
Abb. 38: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 25-32	64
Abb. 39: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 33-40	65

Abb. 40: Darstellung der Verteilung der Brucharten (Kreisdiagramm) in Bezug zur mittelwertigen Scherfestigkeit (Y-Achse) der Prüfgruppen 41-48

66

7. Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Angaben zu den verwendeten Materialien	28
Tab. 2:	Übersicht der Scherfestigkeiten und der signifikanten Unterschiede nach ANOVA und Tukey-Test	57
Tab. 3:	Auftreten der jeweiligen Bruchart	58

8. Literaturverzeichnis

Akgül S, Kedici Alp C, Bala O. Repair potential of a bulk-fill resin composite: Effect of different surface-treatment protocols. *Eur J Oral Sci* 2021; 129: 1-9

Altinci P, Mutluay M, Tezvergil-Mutluay A. Repair bond strength of nanohybrid composite resins with a universal adhesive. *Acta Biomater Odontol Scand* 2018; 4: 10-19

Attin T, Vataschki M, Hellwig E. Properties of resin-modified glass-ionomer restorative materials and two polyacid-modified resin composite materials. *Quintessence Int* 1996; 27: 203-209

Blum IR, Martos R, Szalóki M, Lynch CD, Hegedűs C. Effects of different surface treatments and adhesive self-etch functional monomers on the repair of bulk fill composites: A randomised controlled study. *J Dent* 2021; 108: 103637

Bonstein T, Garlapo D, Donarummo J, Bush PJ. Evaluation of varied repair protocols applied to aged composite resin. *J Adhes Dent* 2005; 7: 41-49

Borges A, Santos J, Ramos-Tonello C, Ishikiriama S, Shinohara M. Effect of thermo-mechanical load cycling on silorane-based composite restorations. *Dent Mater J* 2012; 31: 1054-1059

Bouschlicher MR, Reinhardt JW, Vargas MA. Surface treatment techniques for resin composite repair. *Am J Dent* 1997; 10: 279-283

Braga RR, Meira JBC, Boaro LCC, Xavier TA. Adhesion to tooth structure: a critical review of „macro“ test methods. *Dent Mater* 2010; 26: e38-49

Brendeke J, Ozcan M. Effect of physicochemical aging conditions on the composite-composite repair bond strength. *J Adhes Dent* 2007; 9: 399-406

Brosh T, Pilo R, Bichacho N, Blutstein R. Effect of combinations of surface treatments and bonding agents on the bond strength of repaired composites. *J Prosthet Dent* 1997; 77: 122-126

Buonocore MG. A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res* 1955; 34: 849-853

Cardoso GC de, Nakanishi L, Isolan CP, Jardim PDS, Moraes RR de. Bond Stability of Universal Adhesives Applied To Dentin Using Etch-And-Rinse or Self-Etch Strategies. *Braz Dent J* 2019; 30: 467-475

Celik EU, Ergücü Z, Türkün LS, Ercan UK. Tensile bond strength of an aged resin composite repaired with different protocols. *J Adhes Dent* 2011; 13: 359-366

Cho SD, Rajitrangson P, Matis BA, Platt JA. Effect of Er,Cr:YSGG laser, air abrasion, and silane application on repaired shear bond strength of composites. *Oper Dent* 2013; 38: 58-66

Chuenweravanich J, Kuphasuk W, Saikaew P, Sattabanasuk V. Bond Durability of a Repaired Resin Composite Using a Universal Adhesive and Different Surface Treatments. *J Adhes Dent* 2022; 24: 67-76

da Costa TRF, Serrano AM, Atman APF, Loguercio AD, Reis A. Durability of composite repair using different surface treatments. *J Dent* 2012; 40: 513-521

Crumpler DC, Bayne SC, Sockwell S, Brunson D, Roberson TM. Bonding to resurfaced posterior composites. *Dent Mater* 1989; 5: 417-424

Dall'Oca S, Papacchini F, Goracci C, Cury AH, Suh BI, Tay FR, et al. Effect of oxygen inhibition on composite repair strength over time. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2007; 81: 493-498

Daronch M, Rueggeberg FA, De Goes MF. Monomer conversion of pre-heated composite. J Dent Res 2005; 84: 663-667

Dieckmann P, Baur A, Dalvai V, Wiedemeier DB, Attin T, Tauböck TT. Effect of Composite Age on the Repair Bond Strength after Different Mechanical Surface Pretreatments. J Adhes Dent 2020; 22: 365-372

van Dijken JWV, Pallesen U. A randomized controlled three year evaluation of „bulk-filled“ posterior resin restorations based on stress decreasing resin technology. Dent Mater 2014; 30: e245-251

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

Dorri M, Martinez-Zapata MJ, Walsh T, Marinho VC, Sheiham Deceased A, Zaror C. Atraumatic restorative treatment versus conventional restorative treatment for managing dental caries. Cochrane Database Syst Rev 2017; 12: CD008072

Erdilek D, Dörter C, Koray F, Kunzelmann K-H, Efes BG, Gomec Y. Effect of Thermo-mechanical Load Cycling on Microleakage in Class IIOrmocer Restorations. Eur J Dent 2009; 3: 200-205

Fawzy AS, El-Askary FS, Amer MA. Effect of surface treatments on the tensile bond strength of repaired water-aged anterior restorative micro-fine hybrid resin composite. J Dent 2008; 36: 969-976

Firma Dentsply Sirona, 2022a: Wissenschaftliches Kompendium-Surefil one. https://www.dentsplysirona.com/content/dam/flagship/de-de/explore/restauration/sure-fill_one/RES-Wissenschaftliches-Kompendium-Surefil-one-DE-web.pdf (Zugriffsdatum: 15.10.2022)

Firma Dentsply Sirona, 2022b: Surefil One Fact-File. https://assets.dentsplysirona.com/flagship/de-de/explore/restoration/surefill_one/RES-WB-Surefil-One-Fact-File.pdf (Zugriffsdatum: 21.12.2022)

Firma Dentsply Sirona, 2022c: ChemFil-Rock. <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/master/product-procedure-brand-categories/restorative/product-categories/direct-restoration/glass-ionomers/classic-glass-ionomers/ifu/RES-IFU-ChemFil-Rock-multilingual-2022-02-10.pdf> (Zugriffsdatum: 12.11.2022)

Firma Dentsply Sirona, 2021: PrimeBond-active. <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/master/product-procedure-brand-categories/restorative/product-categories/direct-restoration/adhesives/universal-adhesives/ifu/RES-IFU-PrimeBond-active-multilingual-2021-11-09.pdf> (Zugriffsdatum: 12.11.2022)

Firma Dentsply Sirona, 2020: Surefil-one. <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/master/product-procedure-brand-categories/restorative/product-categories/direct-restoration/composites-flowables/posterior-composites/ifu/RES-IFU-Surefil-one-multilingual-2020-10-12.pdf> (Zugriffsdatum: 12.11.2022)

Firma Dentsply Sirona, 2018: CeramxSpectraST-and-CeramxSpectraSEffects. <https://www.dentsplysirona.com/content/dam/master/product-procedure-brand-categories/restorative/product-categories/direct-restoration/composites-flowables/universal-composites/ifu/RES-IFU-CeramxSpectraST-and-CeramxSpectraSEffects-multilingual-2018-10-26.pdf> (Zugriffsdatum: 12.11.2022)

Fornazari IA, Brum RT, Rached RN, de Souza EM. Reliability and correlation between microshear and microtensile bond strength tests of composite repairs. J Mech Behav Biomed Mater 2020; 103: 103607

Fornazari IA, Wille I, Meda EM, Brum RT, Souza EM. Effect of Surface Treatment, Silane, and Universal Adhesive on Microshear Bond Strength of Nanofilled Composite Repairs. Oper Dent 2017; 42: 367-374

Francois P, Fouquet V, Attal J-P, Dursun E. Commercially Available Fluoride-Releasing Restorative Materials: A Review and a Proposal for Classification. *Materials* 2020; 13: 2313

Francois P, Remadi A, Le Goff S, Abdel-Gawad S, Attal J-P, Dursun E. Flexural properties and dentin adhesion in recently developed self-adhesive bulk-fill materials. *J Oral Sci* 2021; 63: 139-144

Francois P, Vennat E, Le Goff S, Ruscassier N, Attal J-P, Dursun E. Shear bond strength and interface analysis between a resin composite and a recent high-viscous glass ionomer cement bonded with various adhesive systems. *Clin Oral Investig* 2019; 23: 2599-2608

Frankenberger R. Korrektur zahnärztlicher Restaurationen. *Zahnärztl Mitt* 2012; 102: 32-41

Frankenberger R, Krämer N. Glasionomerzemente. Wolfgang-M. Boer, Hrsg. Metallfreie Restaurationen, vol. 1. Balingen: Spitta Verlag, 1999

Frankenberger R, Krämer N, Lohbauer U, Nikolaenko SA, Reich SM. Marginal integrity: is the clinical performance of bonded restorations predictable in vitro? *J Adhes Dent* 2007; 9: 107-116

Frankenberger R, Roth S, Krämer N, Pelka M, Petschelt A. Effect of preparation mode on Class II resin composite repair. *J Oral Rehabil* 2003; 30: 559-564

Frankenberger R, Winter J, Schmalz G. Amalgam und Alternativen – Diskussionen zur Quecksilberreduktion in der Umwelt. *Bundesgesundheitsbl* 2021; 64: 847-855

Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent* 1999; 27: 89-99

Gallusi G, Galeano P, Libonati A, Giuca MR, Campanella V. Evaluation of bond strength of different adhesive systems: Shear and Microtensile Bond Strength Test. Oral Implantol 2010; 2: 19-25

Gordan VV, Mjör IA, Blum IR, Wilson N. Teaching students the repair of resin-based composite restorations: a survey of North American dental schools. J Am Dent Assoc 2003; 134: 317-323

Gorseta K, Borzabadi-Farahani A, Vrazic T, Glavina D. An In-Vitro Analysis of Microleakage of Self-Adhesive Fissure Sealant vs. Conventional and GIC Fissure Sealants. Dent J 2019; 7: 32

Göstemeyer G; Blunck U. Reparatur/Korrektur von Restaurationen. ZWR - Das Deutsche Zahnärzteblatt 2016; 125: 167–8

Guggenberger R, Weinmann W. Exploring beyond methacrylates. Am J Dent 2000; 13: 82-84

Haller B. Grundlagen und Reparatur von Kompositfüllungen. Zahnärztl Mitt 2020; 110: 166-177

Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. 6. überarbeitete Auflage. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2013

Hennig C, Helbig B, Haufe E, Richter G, Klimm W. Die Versorgung von Klasse-V- Kavitäten mit demOrmocer®- basierenden Füllungssystem Admira®. Schweiz Monatsschr Zahnmed 2004; 114: 104-114

Hickel R, Brühaver K, Ilie N. Repair of restorations--criteria for decision making and clinical recommendations. Dent Mater 2013; 29: 28-50

Hickel R, Peschke A, Tyas M, Mjör I, Bayne S, Peters M, et al. FDI World Dental Federation: clinical criteria for the evaluation of direct and indirect restorations-update and clinical examples. Clin Oral Investig 2010; 14: 349-366

Hickel R, Voss A. (Langzeit)erfahrungen mit Glasionomerzementen. Dtsch Zahnärztl Z 1988; 43: 263

Ismail AM, Bourauel C, ElBanna A, Salah Eldin T. Micro versus Macro Shear Bond Strength Testing of Dentin-Composite Interface Using Chisel and Wireloop Loading Techniques. Dent J (Basel) 2021; 9: 140

Iversen R, Geurtsen W, Lühns AK. Kompositreparatur – Einfluss unterschiedlicher Vorbehandlungsmethoden auf die Verbundkraft. Dtsch Zahnärztl Z 2011; 66: 639-646

Jafarzadeh Kashi TS, Erfan M, Rakhshan V, Aghabaigi N, Tabatabaei FS. An in vitro assessment of the effects of three surface treatments on repair bond strength of aged composites. Oper Dent 2011; 36: 608-617

Kamann W. Füllungsreparatur und Reparaturfüllung. in: Gängler P, Hoffmann T, Willershausen B, Schwenzer N, Ehrenfeld M, Hrsg. Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie, vol. 3. Stuttgart: Thieme Verlag, 2010: 206-208

Kamann WK, Gängler P. Filling repair and repair fillings. Schweiz Monatsschr Zahnmed 2000; 110: 1054-1071

Kanzow P, Hoffmann R, Tschammler C, Kruppa J, Rödiger T, Wiegand A. Attitudes, practice, and experience of German dentists regarding repair restorations. Clin Oral Investig 2017; 21: 1087-1093

Kanzow P, Wiegand A. Retrospective analysis on the repair vs. replacement of composite restorations. Dent Mater J 2020; 36: 108-118

Kanzow P, Wiegand A, Wilson NHF, Lynch CD, Blum IR. Contemporary teaching of restoration repair at dental schools in Germany - Close to universality and consistency. J Dent 2018; 75: 121-124

Kappert HF, Eichner K. Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung, Bd. 2: Werkstoffe unter klinischen Aspekten. 6. Bearb. u. erg. Stuttgart: Thieme, 2008

Kappert HF, Schüren M. Dauerfestigkeitsprüfung des Metall-Kunststoffverbundes unter dem Einfluss von Temperaturwechseln. Quintessence Zahntech 1996; 22: 293–307

Kawano F, Ohguri T, Ichikawa T, Matsumoto N. Influence of thermal cycles in water on flexural strength of laboratory-processed composite resin. J Oral Rehabil 2001; 28: 703-707

Klaisiri A, Phumpatrakom P, Thamrongananskul N. Chemical Surface Modification Methods of Resin Composite Repaired with Resin-Modified Glass-Ionomer Cement. Eur J Dent 2022

Klee J, Renn C, Elsner O. Development of Novel Polymer Technology for a New Class of Restorative Dental Materials. J Adhes Dent 2020; 22: 35-45

Krejci I, Lutz F, Oddera M. Aktueller Stand der Kompomere. Der Freie Zahnarzt 1995; 9: 52-57

Latta MA, Radniecki SM. Bond Strength of Self-Adhesive Restorative Materials Affected by Smear Layer Thickness but not Dentin Desiccation. J Adhes Dent 2020; 22: 79-84

Latta MA, Tsujimoto A, Takamizawa T, Barkmeier WW. In Vitro Wear Resistance of Self-Adhesive Restorative Materials. J Adhes Dent 2020a; 22: 59-64

Latta MA, Tsujimoto A, Takamizawa T, Barkmeier WW. Enamel and Dentin Bond Durability of Self-Adhesive Restorative Materials. J Adhes Dent 2020b; 22: 99-105

Lohbauer U, Belli R. The Mechanical Performance of a Novel Self-Adhesive Restorative Material. *J Adhes Dent* 2020; 22: 47-58

Lohbauer U, Krämer N. Werkstoffkundliche Standortbestimmung konventioneller Glasionomerzemente. *Quintessenz* 2009; 60: 799-808

Lohbauer U, Krämer N, Petschelt A, Frankenberger R. Correlation of in vitro fatigue data and in vivo clinical performance of a glassceramic material. *Dent Mater* 2008; 24: 39-44

Loomans B a. C, Cardoso MV, Roeters FJM, Opdam NJM, De Munck J, Huysmans MCDNJM, et al. Is there one optimal repair technique for all composites? *Dent Mater* 2011; 27: 701-709

Loomans B a. C, Mine A, Roeters FJM, Opdam NJM, De Munck J, Huysmans MCDNJM, et al. Hydrofluoric acid on dentin should be avoided. *Dent Mater* 2010; 26: 643-649

Lucena-Martín C, González-López S, Navajas-Rodríguez de Mondelo JM. The effect of various surface treatments and bonding agents on the repaired strength of heat-treated composites. *J Prosthet Dent* 2001; 86: 481-488

Maneenut C, Sakoolnamarka R, Tyas MJ. The repair potential of resin-modified glass-ionomer cements. *Dent Mater* 2010; 26: 659-665

Marigo L, Triestino A, Castagnola R, Vincenzoni F, Cordaro M, Di Stasio E, et al. Cytotoxic Evaluation of the New Composite Resin through an Artificial Pulp Chamber. *Biomed Res Int* 2022; 2022: 5100816

Marolf R. Glasionomerzemente – Materialeigenschaften und klinische Anwendung. Eine Literaturübersicht. *Schweiz Monatsschr Zahnheilk* 1984; 94: 117

Marxkors R, Meiners H, Geis-Gerstorfer J. Taschenbuch der zahnärztlichen Werkstoffkunde: Vom Defekt zur Restauration. überarbeitet Edition. Köln: Deutscher Ärzteverlag, 2008

McCabe JF, Rusby S. Water absorption, dimensional change and radial pressure in resin matrix dental restorative materials. *Biomaterials* 2004; 25: 4001-4007

McLean JW, Gasser O. Glass-cermet cements. *Quintessence Int* 1985; 16: 333-343

Mine A, De Munck J, Van Ende A, Cardoso MV, Kuboki T, Yoshida Y, et al. TEM characterization of a silorane composite bonded to enamel/dentin. *Dent Mater* 2010; 26: 524-532

Mjör IA. Repair versus replacement of failed restorations. *Int Dent J* 1993; 43: 466-472

Mjör IA, Gordan VV. Failure, repair, refurbishing and longevity of restorations. *Oper Dent* 2002; 27: 528-534

Moncada G, Martin J, Fernández E, Hempel MC, Mjör IA, Gordan VV. Sealing, refurbishment and repair of Class I and Class II defective restorations: a three-year clinical trial. *J Am Dent Assoc* 2009; 140: 425-432

Mount GJ. Clinical performance of glass-ionomers. *Biomaterials* 1998; 19: 573-579

Münchow EA, Bossardi M, Priebe TC, Valente LL, Zanchi CH, Ogliari FA, et al. Microtensile versus microshear bond strength between dental adhesives and the dentin substrate. *Int J Adhes Adhes* 2013; 46: 95-99

Ohata U, Hara H, Suzuki H. 7 cases of hydrofluoric acid burn in which calcium gluconate was effective for relief of severe pain. *Contact Derm* 2005; 52: 133-137

Oltramare R, Michelotti G, Burrer P, Attin T, Tauböck TT. Self-adhesive composites - Do

they keep what they promise? Swiss Dent J 2022; 132: 268-289

Opdam NJM, Bronkhorst EM, Loomans B a. C, Huysmans MCDNJM. 12-year survival of composite vs. amalgam restorations. J Dent Res 2010; 89: 1063-1067

Opdam NJM, Bronkhorst EM, Loomans BAC, Huysmans M-CDNJM. Longevity of repaired restorations: a practice based study. J Dent 2012; 40: 829-835

Ortengren U, Andersson F, Elgh U, Terselius B, Karlsson S. Influence of pH and storage time on the sorption and solubility behaviour of three composite resin materials. J Dent 2001; 29: 35-41

Papacchini F, Magni E, Radovic I, Mazzitelli C, Monticelli F, Goracci C, et al. Effect of Intermediate Agents and Pre-heating of Repairing Resin on Composite-repair Bonds. Oper Dent 2007; 32: 363-371

Papadogiannis D, Kakaboura A, Palaghias G, Eliades G. Setting characteristics and cavity adaptation of low-shrinking resin composites. Dent Mater 2009; 25: 1509-1516

Peutzfeldt A. Resin composites in dentistry: the monomer systems. Eur J Oral Sci 1997; 105: 97-116

Poitevin A, De Munck J, Van Ende A, Suyama Y, Mine A, Peumans M, et al. Bonding effectiveness of self-adhesive composites to dentin and enamel. Dent Mater 2013; 29: 221-230

Qaw MS, Abushowmi TH, Almaskin DF, AlZaher ZA, Gad MM, Al-Harbi FA, et al. A Novel Approach to Improve Repair Bond Strength of Repaired Acrylic Resin: An in Vitro Study on the Shear Bond Strength. J Prosthodont 2020; 29: 323-333

Rai N, Naik R, Gupta R, Shetty S, Singh A. Evaluating the Effect of Different Conditioning Agents on the Shear Bond Strength of Resin-Modified Glass Ionomers. Contemp Clin

Dent 2017; 8: 604-612

Rasmussen ST. Analysis of dental shear bond strength tests, shear or tensile? Int J Adhes Adhes 1996; 16: 147-154

Rathke A, Pfefferkorn F, McGuire MK, Heard RH, Seemann R. One-year clinical results of restorations using a novel self-adhesive resin-based bulk-fill restorative. Sci Rep 2022; 12: 3934

Rathke A, Tymina Y, Haller B. Effect of different surface treatments on the composite-composite repair bond strength. Clin Oral Investig 2009; 13: 317-323

Roeters FJM, de Jong LCG, Opdam NJM. Change to a new composite with low shrinkage not sensible at this point. Ned Tijdschr Tandheelkd 2009; 116: 10-15

Rolim FG, de Araújo Lima AD, Lima Campos IC, de Sousa Ferreira R, da Cunha Oliveira-Júnior C, Gomes Prado VL, et al. Fluoride Release of Fresh and Aged Glass Ionomer Cements after Recharging with High-Fluoride Dentifrice. Int J Dent 2019; 2019: 9785364

Sadeghyar A, Lettner S, Watts DC, Schedle A. Alternatives to amalgam: Is pretreatment necessary for effective bonding to dentin? Dent Mater 2022; 38: 1703-1709

Scherrer SS, Cesar PF, Swain MV. Direct comparison of the bond strength results of the different test methods: a critical literature review. Dent Mater 2010; 26: e78-93

Schmalz G, Arenholt-Bindslev D. Biokompatibilität zahnärztlicher Werkstoffe. München: Urban & Fischer Verlag/Elsevier GmbH, 2004

Schroeder HE. Orale Strukturbiologie. Stuttgart - New York: Thieme, Stuttgart, 2000

Schwertner K, 2010: Vergleich verschiedener Methoden zur Haftkraftmessung von Den-

tinadhäsiven. <https://opus4.kobv.de/opus4-fau/frontdoor/index/index/docId/1151> (Zugriffsdatum: 08.06.2023)

Shahdad SA, Kennedy JG. Bond strength of repaired anterior composite resins: an in vitro study. *J Dent* 1998; 26: 685-694

Shawkat ES, Shortall AC, Addison O, Palin WM. Oxygen inhibition and incremental layer bond strengths of resin composites. *Dent Mater* 2009; 25: 1338-1346

Sismanoglu S. Efficiency of self-adhering flowable resin composite and different surface treatments in composite repair using a universal adhesive. *Niger J Clin Pract* 2019; 22: 1675-1679

Staxrud F, Valen H. Potential of «universal» bonding agents for composite repair. *Biomater Investig Dent* 2022; 9: 41-46

Tani C, Finger WJ. Effect of smear layer thickness on bond strength mediated by three all-in-one self-etching priming adhesives. *J Adhes Dent* 2002; 4: 283-289

Tezvergil A, Lassila LVJ, Vallittu PK. Composite-composite repair bond strength: effect of different adhesion primers. *J Dent* 2003; 31: 521-525

Ugurlu M, Al-Haj Husain N, Özcan M. Repair of Bulk-Fill and Nanohybrid Resin Composites: Effect of Surface Conditioning, Adhesive Promoters, and Long-Term Aging. *Materials* 2022; 15: 4688

Valente L, Sarkis-Onofre R, Gonçalves A, Fernández E, Loomans B, Moraes R. Repair bond strength of dental composites: Systematic review and meta-analysis. *Int J Adhes Adhes* 2016; 1: 1.

Van Meerbeek B. Dentin/enamel bonding. *J Esthet Restor Dent* 2010; 22: 157

Van Meerbeek B, Yoshihara K, Van Landuyt K, Yoshida Y, Peumans M. From Buonocore's Pioneering Acid-Etch Technique to Self-Adhering Restoratives. A Status Perspective of Rapidly Advancing Dental Adhesive Technology. *J Adhes Dent* 2020; 22: 7-34

Vichi A, Margvelashvili M, Goracci C, Papacchini F, Ferrari M. Bonding and sealing ability of a new self-adhering flowable composite resin in class I restorations. *Clin Oral Investig* 2013; 17: 1497-1506

Weinmann W, Thalacker C, Guggenberger R. Siloranes in dental composites. *Dent Mater* 2005; 21: 68-74

Welch D, Seesengood B, Hopp C. Surface Treatments that Demonstrate a Significant Positive Effect on the Shear Bond Strength of Repaired Resin-modified Glass Ionomer. *Oper Dent* 2015; 40: 403-409

Wendler M, Belli R, Panzer R, Skibbe D, Petschelt A, Lohbauer U. Repair Bond Strength of Aged Resin Composite after Different Surface and Bonding Treatments. *Materials (Basel)* 2016; 9: 547

Wiegand A, Stawarczyk B, Buchalla W, Tauböck TT, Özcan M, Attin T. Repair of silorane composite--using the same substrate or a methacrylate-based composite? *Dent Mater* 2012; 28: e19-25

Wilson AD, Kent BE. A new translucent cement for dentistry. The glass ionomer cement. *Br Dent J* 1972; 132: 133-135

Wilson AD, McLean JW. *Glasionomerzement*. Berlin - Chicago - London - São Paulo - Tokio: Quintessenz Verlag, 1988

Yamauchi K, Tsujimoto A, Jurado CA, Shimatani Y, Nagura Y, Takamizawa T, et al. Etch-and-rinse vs self-etch mode for dentin bonding effectiveness of universal adhesives. *J Oral Sci* 2019; 61: 549-553

Yao C, Ahmed MH, Okazaki Y, Van Landuyt KL, Huang C, Van Meerbeek B. Bonding Efficacy of a New Self-Adhesive Restorative onto Flat Dentin vs Class-I Cavity-bottom Dentin. *J Adhes Dent* 2020a; 22: 65-77

Yao C, Ahmed MH, Zhang F, Mercelis B, Van Landuyt K, Huang C, et al. Structural/Chemical Characterization and Bond Strength of a New Self-Adhesive Bulk-fill Restorative. *J Adhes Dent* 2020b; 22: 85-97

Yin H, Kwon S, Chung SH, Kim RJY. Performance of Universal Adhesives in Composite Resin Repair. *Biomed Res Int* 2022; 2022: 7663490

Zimmerli B, Strub M, Jeger F, Stadler O, Lussi A. Composite materials: Composition, properties and clinical applications. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2010; 120: 972-979

9. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Oberarzt Dr. Dominik Kraus für die umfassende Unterstützung und motivierenden Ratschläge, um diese Dissertation bestmöglich voranzubringen. Sehr zu schätzen weiß ich dabei, dass seine Tür bei Fragen und Problemen immer offenstand. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr. Helmut Stark für die freundliche Betreuung dieser Dissertation und das entgegengebrachte Vertrauen.

Für das Skizzieren und schließlich auch Finalisieren des Themas möchte ich mich zudem bei Oberarzt Dr. Schroeder bedanken, der immer ein offenes Ohr für mich hatte und die Arbeit durch seine Impulse in die richtige Richtung lenkte.

Dr. Frank Pfefferkorn und Siegmars Schwegler von der Firma Densply Sirona danke ich für die tatkräftige Unterstützung durch die Darstellung des noch benötigten Forschungsbedarfs ihres neuartigen Produktes sowie durch die Bereitstellung der Materialien.

Anna Weber, Ahmed Fouda und Jasmin Zupurovic möchte ich für die Instruktionen und Hilfestellungen bei der Durchführung aller Tätigkeiten im Labor danken. Durch ihre Hinweise auf mögliche Fehlerquellen im Versuchsaufbau blieb mir einiges an Zeit und Frustration erspart.

Zu guter Letzt möchte ich mich ganz besonders bei meiner Familie und meiner Freundin bedanken, die mich nicht nur bei dieser Anfertigung der Dissertation, sondern auch in allen Angelegenheiten geduldig unterstützen und auf deren Zuspruch ich mich immer verlassen konnte.