

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. R. Hickel

**Reparatur methacrylatbasierter dentaler
Restaurationskomposite unter Einsatz von
Schallaktivierung**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Marie-Thérèse Oberthür

aus Jena

2014

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: PD Dr. Dipl.-Ing. Nicoleta Ilie

Mitberichterstatter: PD Dr. Ekaterini Paschos

Prof. Dr. Johannes Randzio

Dekan: Prof. Dr. med. Dr. h.c. M. Reiser, FACR, FRCR

Tag der mündlichen Prüfung: 17.04.2014

Meiner Familie und Christoph gewidmet

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Literaturübersicht	4
2.1 Lebensdauer von Restaurationen	4
2.2. Füllungsreparatur	7
2.2.1 Reparieren statt Erneuern	7
2.2.2 Reparaturfüllung und Füllungsreparatur	12
2.2.2.1 Definitionen	12
2.2.3 Durchführung von Reparaturen in vivo und in vitro	14
2.2.3.1 Künstliche Alterung (in vitro)	15
2.2.3.2 Erhöhung der Oberflächenrauigkeit und Verwendung von Haftvermittlern	19
2.2.3.3 Reparaturkomposit	24
2.3 Rheologie und Verarbeitungseigenschaften von Kompositen	25
2.3.1 Einflussparameter auf die rheologischen Eigenschaften von Kompositen	26
2.3.1.1 Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften durch Veränderungen der organischen und anorganischen Phase	26
2.3.1.2 Veränderung der rheologischen Eigenschaften durch äußere Einflüsse	30
2.3.2 Vergleich fließfähiger mit stopfbaren Kompositen	32
2.3.3 Bulk-Fill-Komposite	35
3. Fragestellung	38
4. Material und Methode	41
4.1 Material	42

4.1.1	Verwendete Restaurationsmaterialien	42
4.1.2	Verwendete Haftvermittler	47
4.2	Methode	48
4.2.1	Reparaturgruppe	48
4.2.1.1	Probenpräparation und Alterung des Substrats	48
4.2.1.2	Herstellung und Alterung der Reparaturfüllung	50
4.2.2	Positive Kontrollgruppe	52
4.2.3	Messung der Scherhaftfestigkeit	53
4.2.4	Bruchmodusanalyse	55
4.2.5	Analyse der Füllkörper	56
4.2.6	Versuchsaufbau	56
4.2.7	Statistische Auswertung	58
5.	Ergebnisse	60
6.	Diskussion	88
7.	Schlussfolgerungen	115
8.	Zusammenfassung	118
9.	Literaturverzeichnis	122
10.	Abbildungsverzeichnis	146
11.	Abkürzungsverzeichnis	147
12.	Danksagung	149
13.	Ehrenwörtliche Erklärung	150

1. Einleitung

Im Verlauf der letzten Jahrzehnte wurde die Ende des 19. Jahrhunderts vom „Vater der Zahnheilkunde“ G. V. Black propagierte Einstellung „Extension for Prevention“ immer weiter zurückgedrängt (Osborne & Summitt 1998). Mit der Einführung der Komposite als dentale Restaurationsmaterialien entstand die Möglichkeit eines minimalinvasiven Ansatzes in der Füllungstherapie, da unter anderem aufgrund der Adhäsivtechnik keine makroretentive Verankerung mehr erforderlich war (Tyas et al. 2000). Somit konnte gesunde Zahnhartsubstanz geschont werden. Zudem ermöglichten Komposite neben immer besseren mechanischen Eigenschaften auch ästhetisch zufriedenstellende Ergebnisse (Bergmann & Kieschnick 2009).

Allerdings ist die Lebensdauer dieser adhäsiv verankerten Restaurationen noch begrenzt. Zahnärzte¹ verbringen sogar einen Großteil ihrer Behandlungszeit mit dem Austauschen defekter Restaurationen (Fernández et al. 2011).

Die Gründe für das Scheitern von Restaurationen sind vielfältig. Sie erstrecken sich von Randspalten, Frakturen oder Sekundärkaries bis zum teilweisen oder vollständigen Verlust einer Restauration (Forss & Widström 2004, Da Rosa Rodolpho et al. 2011). Auslöser für einen dieser Prozesse kann beispielsweise Materialermüdung sein (Kamann & Gängler 2000).

In einigen Fällen bietet sich die Reparatur als Alternative zur Erneuerung in Hinblick auf die Schonung gesunder Zahnhartsubstanz und der Pulpa an. Zusätzlich kann so auch der Patient finanziell entlastet und die Behandlungszeit spürbar verkürzt werden (Kamann & Gängler 2000).

¹ Alle in dieser Arbeit verwendeten männlichen Rollenbezeichnungen stehen stellvertretend für RepräsentantInnen beider Geschlechter.

Bereits in den 1970er Jahren wurde daher die Fragestellung der Füllungsreparatur beziehungsweise Reparaturfüllung in der Fachliteratur aufgegriffen (Lutz et al. 1976; Inoue 1978; Katsuyama et al. 1979). Mehrere Jahrzehnte hindurch genoss diese Therapiemethode dennoch keinen guten Ruf und wurde laut *Tyas et al.* als „patchwork dentistry“ diffamiert (Tyas et al. 2000). Heute ist das Thema in zahlreichen Studien präsent. Leider gibt es jedoch bisher noch kein einheitliches Reparaturprotokoll und auch in der Praxis hat sich die Reparatur defekter Restaurationen noch nicht als gängiges Vorgehen durchsetzen können (Gordan et al. 2012).

Bisherige Publikationen behandelten vorwiegend die Problematik der Vorbehandlung der zu reparierenden Oberflächen sowie der optimalen Haftvermittlung zwischen den verschiedenen Materialschichten. Ebenso waren Methodik und Dauer der künstlichen Alterung Gegenstand zahlreicher Studien (Hickel et al. 2013).

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich *in vitro* mit der Reparatur verschiedener methacrylatbasierter Komposite unter Einhaltung eines gemeinsamen Reparaturprotokolls. Es wurden fünf Materialien mit unterschiedlichen Ausgangsviskositäten und Indikationsspektren ausgewählt. Ziel dieser Untersuchung ist es unter anderem, die Kombinierbarkeit dieser Materialien sowie die erreichbaren Haftfestigkeiten im Vergleich zu „intakten“ Füllungen zu evaluieren. Besonderes Augenmerk liegt auf dem Einfluss von Schall zur Viskositätsverminderung von Kompositmaterialien und einer damit verbundenen besseren Benetzung der Materialoberflächen. Es soll ermittelt werden, ob verschiedene Dentalkunststoffe durch Schallaktivierung verflüssigt werden können und inwieweit dies der Reparatur von Kunststofffüllungen dienlich sein könnte. Dabei wird auf ein kommerzielles System zurückgegriffen. Die Ergebnisse der unter Schalleinsatz durchgeführten Reparaturen werden mit denen der konventionell umgesetzten verglichen. Zudem soll herausgefunden werden, ob sowohl die homotype Reparatur, also die Reparatur eines Materials mit sich

selbst, als auch heterotype Reparaturen zufriedenstellende Ergebnisse liefern können und welche die erfolgreichere Reparaturmethode darstellt. Dies gilt besonders in Hinsicht darauf, dass das Ausgangsmaterial dem praktizierenden Zahnmediziner nicht immer bekannt ist. Die Entwicklung eines Materials oder einer Methode, welche sich für die Reparatur aller oder möglichst vieler Werkstoffe eignet, würde die Entscheidung im Praxisfall folglich erleichtern. Zusätzlich werden die durch den Makro-Schertest hervorgerufenen Frakturen auf ihren Bruchmodus und einen möglichen Zusammenhang zwischen Frakturverlauf und Verbundfestigkeit hin untersucht.

Hauptziel ist es, herauszufinden, ob sich eine weitere Konzentrierung der Forschung auf die Modifikation der Viskosität von Dentalkompositen durch Schallaktivierung zur Reparatur defekter Restaurationen lohnt.

2. Literaturübersicht

2.1 Lebensdauer von Restaurationen

Dass zahnärztliche Restaurationen in der Regel nicht ein Leben lang intakt bleiben und Alterungsprozessen unterliegen, ist bekannt. Tatsächlich nimmt die Erneuerung beziehungsweise Re-Restauration defekter Füllungen den größten Teil der täglichen Routine des praktizierenden Zahnarztes ein (Mjör 1981; Elderton & Davies 1984; Maryniuk 1984; Maryniuk & Kaplan 1986; Forss & Widström 2004; Fernández et al. 2011). Laut *Qvist et al.* beträgt die mittlere Verweilzeit von Füllungen circa sechs Jahre (Qvist et al. 1986). Jüngeren Studien zufolge erreichen Seitenzahnfüllungen aus Amalgam oder Komposit eine durchschnittliche Überlebensdauer von 42 Monaten (Coppola et al. 2003) beziehungsweise 12,8 Jahren für ausgedehnte Amalgamrestaurationen und 7,8 Jahren für ausgedehnte Kompositfüllungen (van Nieuwenhuysen et al. 2003).

Die Gründe für das Scheitern dentaler Restaurationen sind vielfältig und Gegenstand zahlreicher Untersuchungen. Aus den meisten Studien geht hervor, dass Sekundärkaries die häufigste Versagensursache darstellt, gefolgt von Frakturen des restaurationstragenden Zahns oder der Restauration selbst (Mjör & Gordan 2002; Forss & Widström 2004; Opdam et al. 2010; Demarco et al. 2012), wobei die Rangfolge dieser beiden wichtigsten Gründe auch variieren kann (Da Rosa Rodolpho et al. 2011). Die Überlebensdauer einer Restauration hängt aber auch von dem für sie verwendeten Material (Forss & Widström 2004; Opdam et al. 2010) und den Fähigkeiten des behandelnden Zahnarztes ab (Coppola et al. 2003).

Während in früheren Jahrzehnten Kompositrestaurationen Ermüdungserscheinungen in Form von Verlust der anatomischen Gestalt und der interproximalen Kontakte sowie generelle Insuffizienzen aufwiesen, handelt es sich heute eher um die Entwicklung von Randspalten mit

Sekundärkaries, Frakturen und Verfärbungen (Manhart et al. 2004). *Forss und Widström* geben an, dass das mittlere Lebensalter von Restaurationen aus Amalgam fünfzehn Jahre beträgt, während Komposite und Glasionomerezemente nur mittlere Überlebensdauern von sechs beziehungsweise sieben Jahren aufweisen. Die Prognose für zahnfarbene Restaurationen weist jedoch einen positiven Trend auf (Forss & Widström 2004). Einige Studien berichten von vergleichbaren jährlichen Versagensraten für Amalgam- und Kompositrestaurationen (Manhart et al. 2004; Opdam et al. 2007b). In älteren Untersuchungen schnitten Kompositfüllungen oft schlechter ab, weil Liner aus Glasionomerezementen als Zwischenschicht zwischen Zahnhartsubstanz und Komposit eingebracht wurden, was vermehrt Frakturen verursachte (Opdam et al. 2007a). Doch auch noch heute sind in der Gruppe der Komposite laut *Forss und Widström* Frakturen der zweithäufigste Versagensgrund nach Sekundärkaries, gefolgt vom Verlust der Füllung, was sich mit den Ergebnissen anderer Studien deckt (Forss & Widström 2004; Opdam et al. 2010; Demarco et al. 2012). Mit der Einführung der Total-Etch-Systeme sollte die Überlebenszeit von Kompositrestaurationen deutlich gesteigert werden können (Forss & Widström 2004; Opdam et al. 2010; Demarco et al. 2012). *Opdam et al.* zufolge weisen Amalgam- und Kompositfüllungen nach fünf Jahren ähnliche jährliche Versagensquoten auf, nach einem Beobachtungszeitraum von zwölf Jahren schneiden allerdings Kompositrestaurationen besser ab (Opdam et al. 2010).

Im Durchschnitt bestehen für vitale Zähne bei Kompositrestaurationen der Black-Klassen I und II im posterioren Zahnbogenbereich jährliche Versagensraten von 1 bis 3 %, wie aus einer Übersichtsarbeit hervorgeht, wobei in einer Studie sogar eine Rate von 8,6 % evaluiert wurde (Raskin et al. 1999; Demarco et al. 2012). Für endodontisch behandelte Zähne steigt die Versagensquote pro Jahr auf 2 bis 12,4 % (Demarco et al. 2012). Ebenso scheint die Zusammensetzung der verwendeten Komposite von Bedeutung zu sein. Insgesamt zeigen

Hybridkomposite bessere Ergebnisse, vor allem in den kaukrafttragenden Bereichen, als mikrogefüllte Komposite (Manhart et al. 2004). Nach einem Beobachtungszeitraum von 22 Jahren schnitt ein mittelgefülltes Komposit besser ab als ein minigefülltes (Da Rosa Rodolpho et al. 2011). Materialien mit höherem Elastizitätsmodul weisen eine bessere Frakturresistenz auf (Ferracane & Condon 1999; Ilie & Hickel 2009a).

Neben dem Material spielt auch die Beschaffenheit der Kavität eine Rolle. Je größer ihre Ausdehnung, desto kürzer ist die Lebensdauer der Restauration, was wohl auf eine gesteigerte Anfälligkeit für Frakturen zurückzuführen ist (van Nieuwenhuysen et al. 2003; Opdam et al. 2007b; Demarco et al. 2012). Molaren weisen ein höheres Versagensrisiko für Restaurationen auf als weiter anterior befindliche Zähne (Demarco et al. 2012).

Ebenfalls differenzieren sollte man zwischen Patienten mit niedrigem und hohem Kariesrisiko. Letztere weisen deutlich höhere Versagensraten von Restaurationen auf, vor allem induziert durch Sekundärkaries (Opdam et al. 2010). Auch die sozioökonomischen und demographischen Verhältnisse der Patienten sowie ihr Mundhygiene-Verhalten und Habits, wie zum Beispiel Bruxismus, spielen eine Rolle (Demarco et al. 2012).

Um mithilfe minimalinvasiver Verfahren die Lebensdauer defekter Restaurationen zu erhöhen, wird oft der Einsatz alternativer Behandlungsmethoden, wie die Reparatur oder Modifizierung der Füllungsoberflächen und -Ränder, beispielsweise durch Versiegelungen oder Repolituren, empfohlen (Tyas et al. 2000; Gordan 2001; Moncada et al. 2006; Moncada et al. 2009; Demarco et al. 2012, Opdam et al. 2012).

Nach einer Beobachtungszeit von vier Jahren schnitten reparierte Füllungen im Vergleich zu Erneuerungen, marginalen Versiegelungen, Repolituren und keiner Veränderung der Füllung am besten ab (Fernández et al. 2011). In einer Studie aus dem Jahr 2011 wird ein Beispiel für eine erfolgreich reparierte Füllung aufgezeigt, die sieben Jahre nach Durchführung der

Reparatur noch klinisch intakt war (Da Rosa Rodolpho et al. 2011). Auch in anderen Studien konnten nach einem Zeitraum von 24 Monaten beziehungsweise acht und zehn Jahren zufriedenstellende Ergebnisse durch Reparaturen defekter Amalgam- beziehungsweise Kompositfüllungen erzielt werden (Croll 1990; Cipriano & Santos 1995; Tyas et al. 2000). Laut *Croll* können sich Füllungsreparaturen bei sorgfältiger Durchführung über einen Zeitraum von bis zu acht Jahren bewähren (Croll 1990). Dabei weisen Reparaturen, die aufgrund von Karies nötig werden, eine bessere Prognose auf als Reparaturen infolge von Frakturen (Opdam et al. 2012).

2.2 Füllungsreparatur

2.2.1 Reparieren statt Erneuern

Die Frage nach der Reparaturfähigkeit lichthärtender Komposite wurde schon bald nach deren Einführung auf dem Markt und ihrer Indikationsausweitung auf die Kavitätenklassen I und II gestellt (Hotz 1975; Kullmann 1986). Lange Zeit wurde die Reparatur vorhandener Füllungen als „patchwork dentistry“ (Tyas et al. 2000) angesehen und von Zahnärzten und Lehrkräften der Universitäten vernachlässigt (Kamann & Gängler 2000).

In einer 2012 veröffentlichten Studie kam man zu dem Ergebnis, dass in nordamerikanischen Hochschulen noch immer nicht flächendeckend die Reparaturmöglichkeiten direkter Komposit-Restaurationen unterrichtet werden. Nur 79% der Hochschulen, die an der Studie teilnahmen, gaben Ihren Studenten die Möglichkeit, im Reparaturbereich auch praktische Erfahrungen zu sammeln (Lynch et al. 2012).

Desgleichen besaß die Reparatur von Kompositfüllungen an deutschen Hochschulen bis vor Kurzem nur einen geringen Stellenwert. Aus einer von *Blum et al.* 2000/2001 durchgeführten

Studie geht hervor, dass alle evaluierten skandinavischen und die meisten der irischen und britischen Hochschulen zu diesem Zeitpunkt die Reparatur defekter Kompositfüllungen unterrichteten, was jedoch nur auf die Hälfte der vierundzwanzig an der Umfrage beteiligten Hochschulen in Deutschland zutraf. Die meisten der anderen zwölf deutschen Hochschulen gaben an, das Thema auch in den nächsten fünf Jahren nicht in die Lehre integrieren zu wollen. Als Hauptgründe dafür wurden nicht ausreichend vorhandene Evidenz und fehlende klinische Erfahrung angegeben. Die Autoren der Studie wiesen ebenfalls darauf hin, dass einheitliche Leitlinien für die Durchführung von Reparaturen defekter Kompositfüllungen geschaffen werden sollten, auch um weitere Hochschulen zu animieren, diesen Gegenstand in der Ausbildung aufzugreifen (Blum et al. 2003).

Mittlerweile unterrichten die meisten deutschen Hochschulen Reparaturtechniken, wie aus einer 2011 veröffentlichten Studie hervorgeht. Noch immer jedoch weichen die Vorgehensweisen bei der klinischen Indikationsstellung und den Reparaturtechniken weit voneinander ab (Blum et al. 2011a).

Es besteht bezüglich der Reparatur von direkten Kompositrestaurationen noch keine Leitlinie des *American Dental Association's Code on Dental Procedures and Nomenclature* (Lynch et al. 2012), was es praktizierenden Zahnärzten erschwert, sich für oder gegen eine Reparatur zu entscheiden beziehungsweise diese korrekt durchzuführen. Auch von der *Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde* existiert noch keine Leitlinie zu diesem Thema. In einem Beitrag von *H. J. Staehle*, ehemaliger Präsident der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung, wird die Reparatur von Restaurationen allerdings als „unverzichtbarer Therapieansatz“ zur Verlängerung ihrer Überlebensdauer angesehen (Staehle 2009, Stand vom 19.01.2013). Die *Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung* bereitet nach eigener Aussage zurzeit eine wissenschaftliche Mitteilung zur Reparatur von zahnärztlichen Restaurationen vor (DGZ 2012, Stand vom 31.07.2012).

Dass der Frage nach der richtigen Durchführung von Füllungsreparaturen beziehungsweise Reparaturfüllungen immer mehr Aufmerksamkeit gewidmet wird, spiegelt sich in der steigenden Anzahl an durchgeführten Studien wider. Eine Übersicht der *Cochrane Collaboration* aus dem Jahr 2010 zeigt allerdings, dass bisher keine randomisierten Studien vorliegen, die direkt die Effektivität von Füllungsreparaturen im Vergleich zu Füllungserneuerungen untersuchen (Sharif et al. 2010). In einer Umfrage zur Meinung der Komposit-Hersteller zur Reparatur von Kompositrestaurationen äußerten die meisten Teilnehmer, sie sähen Reparaturen als geeignete Alternative zur Erneuerung defekter Füllungen an. Nur sechs von 17 Herstellern bieten dazu aber Anleitungen an. Am dringlichsten wurde vonseiten der Hersteller der Wunsch nach intensivierten klinischen Studien zur Füllungsreparatur geäußert (Blum et al. 2009).

Noch immer sind die klinischen Entscheidungsparameter Grundlage kontroverser Diskussionen. Meistens hängt die Entscheidung für oder gegen eine Reparatur vom persönlichen Empfinden und der Erfahrung des behandelnden Zahnarztes ab (Kamann & Gängler 2000). Dabei spielt der subjektiv beurteilte Gesamtzustand der Restauration ebenso eine Rolle wie das für die Primärrestauration verwendete Material, die ökonomischen Verhältnisse des Patienten und eine arbiträre Kosten-Nutzen-Rechnung (Mjör 1993; Kamann & Gängler 2000). Vor allem der durch die Behandlung entstehende Folgeschaden sollte so gering wie möglich gehalten werden (McLean 1990; Foitzik & Attin 2004).

Besondere Bedeutung genießt der Versagensgrund, welcher in Erfahrung gebracht werden sollte, um eine Wiederholung des gleichen Defekts vermeiden zu können und der für die Entscheidung für oder gegen eine Reparatur von Bedeutung sein kann. Der Mechanismus, der zum Versagen einer Restauration führt, ist materialabhängig und unterscheidet sich von Werkstoff zu Werkstoff. Keramikrestaurationen weisen beispielsweise nur eine sehr geringe Zugfestigkeit auf. Im Vergleich mit Metallrestaurationen sind sie hinsichtlich Frakturen

wesentlich sensibler. Komposite dagegen sind besonders anfällig für hydrolytische Prozesse. Glasionomerezemente wiederum besitzen unter anderem eine sehr niedrige Frakturresistenz und schlechte Polierbarkeit (McLean 1990; Kamann & Gängler 2000).

Mitglieder des *Dental Practice-Based Research Network* haben festgestellt, dass von 9484 als defekt eingestuften Restaurationen 75 % ersetzt und nur 25 % repariert wurden. Die Kriterien, die bei der Entscheidung eine Rolle spielten, waren die persönliche Präferenz des Behandelnden, das Alter des Patienten, das Material der defekten Restauration, die Lokalisation des betreffenden Zahnes und die Anzahl der involvierten Zahnflächen. Es entschieden sich mehr Zahnärzte für eine Reparatur, wenn sie erst kürzlich das Studium abgeschlossen hatten, sie selbst die defekte Primärrestauration angefertigt hatten, der Patient fortgeschrittenen Alters war oder es sich um einen Molaren mit einer kleinflächigen Restauration handelte, die aus einem anderen Material bestand als Amalgam (Gordan et al. 2012).

Dies zeigt, dass es noch vielerorts eines Kriterienkatalogs bedarf, der die Entscheidung hinsichtlich einer Reparatur unter objektiven Gesichtspunkten und auf einfachem Weg ermöglicht. Dafür existiert eine Übersicht klinischer Kriterien zur Evaluation direkter und indirekter Restaurationen der *World Dental Federation*, die ästhetische, funktionelle und biologische Parameter beinhaltet. Anhand eines Punktevergabesystems kann die Entscheidung über die Erhaltungswürdigkeit der Restauration und die Möglichkeiten der Behandlung, welche auch die Reparatur einer Restauration sein kann, erleichtert werden. Mögliche Situationen, die Indikationen für eine Reparatur darstellen, sind beispielsweise:

- große marginale Lücken ($> 250 \mu\text{m}$)
- starke Verfärbungen
- Sekundärkaries, wenn zugänglich und nicht tief unterminierend

- der Austausch nur einer approximalen Box einer dreiflächigen Füllung bei zervikaler Karies
- Absplitterungen oder partielle oder marginale Frakturen des Restaurationmaterials
- marginale Schmelzfrakturen und kleinere Höckerfrakturen
- Zugangskavitäten einer endodontischen Behandlung
- Amalgamrestorationen mit leicht zugänglichen Defekten
- frakturierte oder teilweise abgesplitterte Keramikinlays oder Teilkronen.

Die erfolgreiche Anwendung dieser Kriterien setzt allerdings ausreichend Übung voraus (Hickel et al. 2010).

Insgesamt spricht vieles für einen Verzicht auf die vollständige Erneuerung defekter Restaurationen zugunsten einer Reparatur, welche ein minimalinvasiveres Vorgehen darstellt (Kamann & Gängler 2000). Mit jeder Entfernung einer Füllung geht mehr Verlust von Zahnhartsubstanz einher (Hunter et al. 1995). Die Größe der präparierten Kavitätenoberfläche stieg im Durchschnitt um 71% (okklusal) bis 75% (approximal) an, als Ärzte direkte und indirekte Restaurationen der Black-Klasse II unter Verwendung von Lupenbrillen und ihrer herkömmlichen Technik entfernen sollten (Millar et al. 1992). Bei der Entfernung zahnfarbener Restaurationen geht doppelt so viel Zahnhartsubstanz verloren wie bei der Entfernung von Füllungen aus Amalgam oder Glasionomerzement (Krejci et al. 1995).

Mjör und Gordan schlugen vor, eine sogenannte „exploratory cavity“ zu präparieren, indem man einen Teil der vorhandenen Restauration bis zum Kavitätenboden entfernt, um einen Überblick über die Ausdehnung des Defekts, vor allem bezogen auf Sekundärkaries, zu erhalten und diese dann mit einem geeigneten Material wieder zu verschließen (Mjör & Gordan 2002). So werden gesunde Zahnhartsubstanzen und die Integrität der Pulpa geschont und gleichzeitig der Patient in der Regel finanziell entlastet, da die erforderlichen Maßnahmen meistens geringeren Umfangs sind als die einer kompletten Erneuerung (Mjör & Gordan 2002; Blum et al. 2011b). Zudem ist die Durchführung einer Reparatur meist weniger

zeitintensiv, was Patienten und Zahnärzten gleichermaßen zugutekommt (Kamann & Gängler 2000; Yousef & Khoja 2009). Es besteht außerdem die Möglichkeit, bei kleineren Reparaturen auf eine Lokalanästhesie verzichten zu können, was die Behandlung für viele Patienten attraktiver macht (Sharif et al. 2010).

In einer Studie, für die über einen Zeitraum von sieben Jahren reparierte und ersetzte Füllungen unter Beobachtung standen, wurde festgestellt, dass die Überlebensrate der reparierten Füllungen mit 100% deutlich höher lag als die der ersetzten Füllungen, welche zu 21% Defekte aufwiesen. Die Kriterien, die zur Diagnose „defekt“ und so zur Erneuerung oder Reparatur der betreffenden Restaurationen geführt hatten, beliefen sich vor allem auf Randverfärbungen (60,2 %), insuffizienten Randschluss (20,5 %) und Farbabweichungen (19,3 %) (Gordan et al. 2009).

Zusammenfassend bietet sich besonders bei schlechter Randadaptation oder verfärbten Restaurationsrändern die Reparatur als Mittel der Wahl an (Kamann & Gängler 2000; Gordan et al. 2006). Gerade bei der Behandlung unter für den Zahnarzt erschwerten Bedingungen, wie sie oft in der Alters- und Kinderzahnheilkunde gegeben sind, vereinfacht die Reparatur partiell insuffizienter Restaurationen das Procedere für Arzt und Patienten. Vor der Behandlung sollte man jedoch das Kariesrisiko des Patienten durch Mundhygienetraining und Änderung der Lebensgewohnheiten auf ein Minimum reduzieren, um den Langzeiterfolg einer Reparatur zu erhöhen (Tyas et al. 2000).

2.2.2 Reparaturfüllung und Füllungsreparatur

2.2.2.1 Definitionen

Unter einer Füllungsreparatur versteht man subtraktive oder additive Maßnahmen zum Erhalt einer Restauration. Dies beinhaltet sowohl das Beseitigen von Stufen und Überhängen

(Füllungskorrektur) als auch nachträgliches Auftragen von Material. Somit fallen auch Maßnahmen der adäquaten Nachsorge, wie wiederholte Politur, unter den Begriff der Füllungsreparatur (Kamann & Gängler 2000).

Reparaturfüllungen beinhalten Präparationsmaßnahmen und können unterschiedlich lokalisiert sein. Ihr Ziel ist normalerweise die Wiederherstellung einer vorhandenen Restauration. Ist eine Reparaturfüllung von allen Seiten von der Primärrestauration umgeben, handelt es sich um eine Einschlussfüllung oder zentrale Reparaturfüllung. Dies ist zum Beispiel bei kohäsivem Versagen des Füllungswerkstoffes erforderlich. Grenzt die Reparaturfüllung sowohl an die Primärrestauration als auch an Zahnhartsubstanz, spricht man von einer peripheren Reparaturfüllung, wie sie bei kariösen Randspalten durchgeführt werden kann. Weitere Defekte, die durch eine Reparaturfüllung behoben werden können, sind Randfrakturen, partielle Füllungsverluste, Frakturen der umgebenden Zahnhartsubstanz oder abrasionsbedingte Perforationen (Kamann & Gängler 2000).

Außerdem kann das für eine Reparaturfüllung verwendete Material der gleichen Werkstoffgruppe angehören wie die Primärrestauration (homotype Reparaturfüllung) oder sich von dieser unterscheiden (heterotype Reparaturfüllung) (Kamann 2002).

Wird eine Reparatur durchgeführt, bevor das für die Primärrestauration eingesetzte Material vollständig abgebunden ist, handelt es sich um eine Frühreparatur. Bei einer späteren Durchführung, also nachdem es dem oralen Milieu ausgesetzt wurde, spricht man analog von einer Spätreparatur (Kamann & Gängler 2000).

Die Erweiterungs- oder Ergänzungsfüllung dient der Versorgung eines benachbarten, nicht mit der schon vorhandenen Restauration in Beziehung stehenden Defekts. Sie kann mit einer oder mehreren Wandungen an die bestehende Restauration grenzen (Kamann 2002).

Die neu entstandene Füllung wird jeweils als Sekundärfüllung beziehungsweise Tertiärfüllung bezeichnet. Auch diese kann wiederum repariert werden (Kamann & Gängler 2000).

2.2.3 Durchführung von Reparaturen in vivo und in vitro

Komposite gelten als universelle Reparaturmaterialien. Sie sind nicht nur zur Reparatur direkter und indirekter Komposit-Restaurationen, sondern auch für die Ausbesserung defekter Amalgamfüllungen und anderer metallischer sowie keramischer Restaurationen geeignet (Foitzik & Attin 2004). Das Vorgehen bei der Reparatur muss jedoch auf das verwendete Material abgestimmt sein (Kamann & Gängler 2000). Im Folgenden wird auf die Reparatur direkter Kompositrestaurationen eingegangen.

Wurde eine solche Restauration Kontamination, zum Beispiel durch Speichel, ausgesetzt, einer Politur oder in einer anderen Art und Weise Alterungsprozessen unterworfen, ist die Verbindung mit einer neuen Kompositschicht erschwert (Turner & Meiers 1993; Lucena-Martín et al. 2001).

Der behandelnde Zahnarzt sieht sich dann mit der Aufgabe konfrontiert, durch adäquate Technik einen ausreichenden Verbund zwischen der „alten“ und der „neuen“ Schicht herzustellen, welche auch den praktischen Anforderungen in der Mundhöhle standhält.

Wie bereits erwähnt, existiert bisher kein einheitliches Reparaturprotokoll (Blum et al. 2003; Yousef & Khoja 2009; Maneenut et al. 2011; Lynch et al. 2012). Für das Zustandekommen eines ausreichenden Verbundes bei der Reparatur „alter“ Füllungen werden die folgenden drei Mechanismen als essentiell angesehen (Brosh et al. 1997):

- Herstellung einer mikromechanischen Retention auf der Oberfläche der zu reparierenden Füllung

- Schaffung eines chemischen Verbundes zwischen der organischen Matrix des Ausgangsmaterials und des Reparaturwerkstoffes
- Schaffung eines chemischen Verbundes zwischen exponierten Füllerpartikeln des Ausgangsmaterials und dem Reparaturwerkstoff

Außerdem spielen eine sorgfältige Präparations- und Kondensationstechnik eine wesentliche Rolle (Kamann & Gängler 2000; Frankenberger et al. 2003b). Sind Zahnhartsubstanzen mit betroffen, sollte eventuell eine Anschrägung des Schmelzes erfolgen (Foitzik & Attin 2004). Wenn möglich, wird das Arbeiten unter absoluter Trockenlegung angeraten (Kamann & Gängler 2000).

Nachfolgend werden die gängigen Vorgehensweisen, die dabei helfen sollen, die genannten Voraussetzungen für einen guten Verbund zwischen einer bereits dem Mundhöhlenmilieu ausgesetzten Füllung und einem Reparaturkomposit herzustellen, erläutert.

Zuvor wird auf Möglichkeiten eingegangen, in vitro die natürliche „Alterung“ der Ausgangsfüllung zu simulieren.

2.2.3.1 Künstliche Alterung (in vitro)

Auch in der Frage, welche der künstlichen Alterungsmethoden den In-vivo-Verschleiß und die Veränderungen einer Füllung mit der Zeit in vitro am ehesten nachzuahmen vermag, herrscht in der Literatur noch Uneinigkeit (Yesilyurt et al. 2009). Lagerungsmedium und –dauer beeinflussen verschiedene Materialien unterschiedlich stark (Papadogiannis et al. 2008). *El- Askary et al.* fanden heraus, dass sowohl Reparaturprotokoll als auch Lagerungszeit einen signifikanten Einfluss auf die Reparaturhaftfestigkeit ausüben (El-Askary et al. 2012).

In vielen Studien findet destilliertes oder Leitungswasser als Lagerungsmedium für die hergestellten Substratfüllungen oder die „reparierten“ Proben Verwendung (Azarbal et al. 1986; Swift, JR. et al. 1992; Brosh et al. 1997; Lucena-Martín et al. 2001; Frankenberger et al. 2003b; Cavalcanti et al. 2007; Padipatvuthikul & Mair 2007; Fawzy et al. 2008; Rodrigues, Junior et al. 2009; Yesilyurt et al. 2009; Garcia-Da-Silva et al. 2011; Hamano et al. 2011; Ivanovas et al. 2011; Loomans et al. 2011; Maneenut et al. 2011; Staxrud & Dahl 2011; Baur & Ilie 2012), wobei sich die Lagerungstemperaturen deutlich voneinander unterscheiden. Neben der Lagerung in einer der menschlichen Körpertemperatur entsprechenden Wassertemperatur von 37°C (Azarbal et al. 1986; Brosh et al. 1997; Frankenberger et al. 2003b; Cavalcanti et al. 2007; Fawzy et al. 2008; Yesilyurt et al. 2009; Garcia-Da-Silva et al. 2011; Ivanovas et al. 2011; Maneenut et al. 2011; Baur & Ilie 2012), existieren Probenlagerungen in kochendem Wasser (Hamano et al. 2011), bei Raumtemperatur (Swift, JR. et al. 1992; Lucena-Martín et al. 2001; El-Askary et al. 2012) oder in auf 60°C erhitztem Wasser (Maneenut et al. 2011). Ebenso zeigen sich Unterschiede in Bezug auf die Dauer der künstlichen Alterung. Meistens unterscheidet sich die Dauer der Lagerung der Substratfüllungen von denen der „reparierten“ Proben, wobei letztere in der Regel für eine kürzere Zeit den Alterungsprozess durchlaufen. Es finden sich häufiger Angaben über eine Lagerungsdauer von nur zweiundzwanzig oder vierundzwanzig Stunden für die „reparierten Füllungen“ (Swift, JR. et al. 1992; Fawzy et al. 2008; Rathke et al. 2009; Yesilyurt et al. 2009; Hamano et al. 2011; Maneenut et al. 2011; Staxrud & Dahl 2011) als für die Substratfüllungen (Cavalcanti et al. 2007). Andere Studien zeigen Lagerungszeiten von einer Woche (Azarbal et al. 1986; Swift, JR. et al. 1992; Ivanovas et al. 2011; Loomans et al. 2011), neun Tagen (Rodrigues, Junior et al. 2009), zwei Wochen (Brosh et al. 1997; Loomans et al. 2011), einem Monat (Lucena-Martín et al. 2001; Fawzy et al. 2008; Maneenut et al. 2011), zwei Monaten (Staxrud & Dahl 2011), sieben Monaten (Garcia-Da-Silva et al. 2011)

und einem Jahr (Frankenberger et al. 2003b). Eine sofortige Weiterverarbeitung der Proben stellt ebenfalls ein gängiges Verfahren dar (Özcan et al. 2005; Padipatvuthikul & Mair 2007; Akimoto et al. 2011).

Außerdem kommt in vereinzelten Untersuchungen über Zeiträume von 24 Stunden (Papacchini et al. 2007a; Rathke et al. 2009), einem Monat (Papacchini et al. 2007a) und sechs Monaten (Rathke et al. 2009) künstlich hergestellter Speichelersatz zum Einsatz.

In einigen Studien werden verschiedene Methoden miteinander kombiniert, zum Beispiel die Lagerung in destilliertem Wasser mit einem thermozyklischen Verfahren (Brosh et al. 1997; Staxrud & Dahl 2011; Baur & Ilie 2012), destilliertes Wasser mit einem „Postpolymerisationszyklus“, bei dem Hitze und Druck auf die Proben ausgeübt werden (Lucena-Martín et al. 2001) oder eine „beschleunigte Alterungskammer“, in der die Proben ultraviolettem Licht, sichtbarem Licht und einem Wasserspray bei 43,3°C ausgesetzt werden mit einer anschließenden vierundzwanzigstündigen Lagerung in destilliertem Wasser (Yesilyurt et al. 2009).

Auch Zitronensäure findet als Lagerungsmedium Verwendung. In einem Vergleich zwischen der Probenlagerung in Zitronensäure (pH = 3) bei 37°C über eine Woche, der in kochendem Wasser über acht Stunden und einem thermozyklischen Verfahren mit 5000 Zyklen zwischen 5°C und 55°C stellte sich heraus, dass Zitronensäure als Medium am wenigsten und das Thermowechselbad am meisten Einfluss auf die Alterung der Proben hatte (Özcan et al. 2007).

Eine andere Studie stellte fest, dass die künstliche Alterung über zwei Monate in destilliertem, 37°C warmem Wasser zu signifikant niedrigeren Haftfestigkeitswerten der „reparierten“ Proben führte als die Lagerung über eine Woche in destilliertem Wasser oder Zitronensäure (Brendeke & Özcan 2007). Die Dauer der Alterung hat folglich mehr Einfluss auf die

Haftfestigkeit als das Lagerungsmedium an sich (Hahnel et al. 2010). Je älter das Substrat ist, desto weniger ungesättigte Doppelbindungen sind noch vorhanden (Ruyter 1981; Vankerckhoven et al. 1982; Özcan et al. 2007). Mit der Zeit kommt es zu chemischen Veränderungen innerhalb des dimethacrylatbasierten Komposits, wie zur Aufnahme von Wasser aus der Umgebung und zur Auswaschung von Inhaltsstoffen wie Monomeren, vor allem Bisphenol-A-glycidylmethacrylat (Bis-GMA) und Triethylenglycol-Dimethacrylat (TEGDMA), Quarz und Silizium (Vankerckhoven et al. 1982; Söderholm et al. 1984; Attin et al. 1995; Tarumi et al. 1995; Ortengren et al. 2001; Suzuki et al. 2005; Özcan et al. 2007; Polydorou et al. 2007). Der Effekt der Lagerung in Wasser ist nicht universell, wie es bei der Temperatur der Fall ist, sondern materialspezifisch (Papadogiannis et al. 2008). Besonders Nanohybridkomposite erweisen sich als anfällig für die Einlagerung von Wasser, was zu einem Stabilitätsverlust führt (Curtis et al. 2008; Ilie & Hickel 2009b). Frühreparaturen ergeben folglich bessere Verbundwerte als Spätreparaturen (Kamann & Gängler 2000; Rinastiti et al. 2011).

Verschiedene Lagerungsmethoden zeigen verschieden ausgeprägte Alterungserscheinungen. Bei der Lagerung in organischen Medien werden deutlich mehr Komponenten als bei der Lagerung in Wasser ausgelöst (van Landuyt et al. 2011). Nach Thermowechselbädern und Lagerung in Zitronensäure kommt es vor allem zur Freilegung von Füllerpartikeln. Die Lagerung in Wasser führt besonders zu Hydrolyse, der Freisetzung von Füllerpartikeln und der Aufnahme von Wasser in die Matrix. Außerdem kommt es zur Erhöhung der Oberflächenrauigkeit. Die genannten Mechanismen führen zu niedrigeren Haftfestigkeitswerten von reparierten Füllungen im Vergleich zur Ausgangsfüllung (Rinastiti et al. 2011).

Die Lagerung in Wasser übt außerdem einen Einfluss auf den Elastizitätsmodul des Komposits aus (Swift, JR. et al. 1994). Es finden sich allerdings Angaben sowohl über eine

Verringerung des Elastizitätsmoduls aufgrund von Wasseraufnahme (Abe et al. 2001) als auch über eine Zunahme mit der Zeit (Helvatjoglu-Antoniades et al. 2006). Die Aufnahme von Wasser führt zudem zur Reduzierung der Biegefestigkeit (Braem et al. 1994).

Der Sinn der künstlichen Probenalterung besteht also darin, Veränderungen im Mundhöhlenmilieu zu simulieren. Dazu gehören die Reduktion der Anzahl nicht reagierter Dimethacrylatgruppen, die Aufnahme von Wasser durch den Werkstoff sowie die Abgabe von Inhaltstoffen an das Umfeld. Bisher existiert kein Standardprotokoll für die naturnahe Alterung von Kompositen in vitro (Maneenut et al. 2011).

2.2.3.2 Erhöhung der Oberflächenrauigkeit und Verwendung von Haftvermittlern

Der Erfolg einer Reparatur ist abhängig von der Beschaffenheit der Oberfläche der Kompositfüllung, also ihrer Zusammensetzung, Rauigkeit und Benetzbarkeit sowie der verwendeten Konditionierungsmethode (Chiba et al. 1989; Bouschlicher et al. 1997; Shahdad & Kennedy 1998; Rosales-Leal et al. 2001; Özcan et al. 2007; Papacchini et al. 2007b). Mechanische und adhäsive Oberflächenbearbeitungsmethoden üben einen signifikanten Einfluss auf die Haftfestigkeit von reparierten Kompositrestaurationen aus (Rathke et al. 2009). Der Erfolg eines Reparaturprotokolls hängt unter anderem auch von der chemischen Zusammensetzung der verwendeten Komposite ab (Loomans et al. 2011).

Um ein mechanisches „Verkeilen“ zwischen dem gealterten Komposit der Substratfüllung und dem Haftvermittler zu erreichen, wird eine gewisse Oberflächenrauigkeit benötigt (Fawzy et al. 2008). Ziel ist es, die obere Schicht zu entfernen und die Oberfläche durch Unregelmäßigkeiten zu vergrößern (Rodrigues, Junior et al. 2009). So kann die Benetzbarkeit durch Haftvermittler erhöht und damit ein bestmöglicher chemischer Verbund zwischen niedrig viskösem Adhäsiv und Füllungswerkstoff ermöglicht werden (Brosh et al. 1997).

Staxrud und Dahl zufolge spielt ein chemischer Verbund zwischen gealtertem und frischem Komposit für den Haftverbund eine untergeordnete Rolle, da es mit der Zeit sowohl zu einer passiven Polymerisation als auch zur Auslösung von Monomeren aus dem Substratkomposit kommt. Allerdings können Haftvermittler zu einem chemischen Verbund zwischen altem, nach der Alterung in einem feuchten Medium zum Teil Wassermoleküle enthaltenden und neuem, hydrophoben Komposit beitragen (Staxrud & Dahl 2011). Sind nach der Oberflächenbearbeitung anorganische, vor allem siliziumdioxidhaltige, Füllerpartikel exponiert, können diese eine chemische Bindung zu einem Silan-haltigen Haftvermittler eingehen (Hisamatsu et al. 2002; Lung & Matinlinna 2012).

Es wurden verschiedene, unterschiedlich erfolgreiche Methoden beschrieben.

Zum Einen wird von vielen Autoren der Einsatz von intraoralen “Sandstrahl“-Geräten empfohlen, die entweder mit Siliziumdioxid- (Brendeke & Özcan 2007; Özcan et al. 2007; Rinastiti et al. 2010a; Loomans et al. 2011; Rinastiti et al. 2011) oder Aluminiumtrioxidpartikeln (Swift, JR. et al. 1992; Lucena-Martín et al. 2001; Cavalcanti et al. 2007; Papacchini et al. 2007a; Garcia-Da-Silva et al. 2011; Loomans et al. 2011) arbeiten. In einem direkten Vergleich beider Verfahren lieferte das Bearbeiten der Substratfüllungsoberfläche mit 30 µm großen Siliziumdioxidteilchen die höchsten Verbundwerte (Özcan et al. 2005). Auch andere Studien empfehlen letzteres in Verbindung mit einem Silan und einem Adhäsiv für die Reparatur defekter Kompositfüllungen (Rinastiti et al. 2010a; Rinastiti et al. 2011). Zur Entfernung des oralen Biofilms in vivo wird ebenfalls das Abstrahlen mit Siliziumdioxidpartikeln befürwortet (Rinastiti et al. 2010b). Eine andere Studie wiederum gibt gleich gute Ergebnisse für beide Methoden hinsichtlich der Haftfestigkeit an (Rodrigues, Junior et al. 2009). Aus einer Anzahl an Studien geht andererseits hervor, dass Sandstrahlen mit 50 µm großen Aluminiumtrioxidpartikeln, gefolgt von einem Haftvermittler und wahlweise einem Silan, die Methode der Wahl bei

Füllungsreparaturen sei (Lucena-Martín et al. 2001; Cavalcanti et al. 2007; Papacchini et al. 2007a; Garcia-Da-Silva et al. 2011).

In vitro wird zum Anrauen der Probenoberflächen oft Siliziumkarbidpapier unterschiedlicher Körnung verwendet (Azarbal et al. 1986; Özcan et al. 2005; Özcan et al. 2007; Garcia-Da-Silva et al. 2011; Hamano et al. 2011; Ivanovas et al. 2011; Loomans et al. 2011; Maneenut et al. 2011; Baur & Ilie 2012). Dieses Vorgehen simuliert den Einsatz von diamantierten Bohrern in vivo (Crumpler et al. 1989; Tezvergil et al. 2003; Foitzik & Attin 2004). Bei der Reparatur eines Nanohybridkomposits zeigten die mittels Diamanten angerauten Proben die besten Scherhaftfestigkeitswerte, gefolgt von Abrasion durch Aluminiumtrioxidpartikel (Yesilyurt et al. 2009).

Obwohl Phosphorsäure wenig bis keine Auswirkung auf die Oberflächenrauigkeit aufweist, wird sie oft nach dem mechanischen Anrauen der Oberfläche zur Reinigung der Proben verwendet (Gregory et al. 1990; Ahlers 2006; Papacchini et al. 2007a; Ivanovas et al. 2011; Loomans et al. 2011). Einige Studien untersuchten dennoch die Wirkung von Phosphorsäure als Mittel zur Erhöhung der Oberflächenrauigkeit. Die Anätzung der Oberfläche durch Phosphorsäure oder Flusssäure zur Erhöhung der Rauigkeit schnitt in den meisten Studien eher schlecht ab (Brosh et al. 1997; Tyas et al. 2000; Lucena-Martín et al. 2001; Özcan et al. 2005; Rodrigues, Junior et al. 2009; Yesilyurt et al. 2009). Vereinzelt werden sie dagegen auch empfohlen (Swift, JR. et al. 1992; Loomans et al. 2011).

Besonders bei bereits stattgefundenener Kontamination der Füllungsoberfläche, wie es bei Spätreparaturen der Fall ist, sollte ein Haftvermittler eingesetzt werden (Lloyd & Dhuru 1985). Haftvermittler scheinen einen größeren Einfluss auf die Haftfestigkeit auszuüben als die mechanische Oberflächenbehandlung (Magni et al. 2011) und steigern die Reparatur-Haftfestigkeitswerte (Lloyd & Dhuru 1985; Azarbal et al. 1986; Chiba et al. 1989; Brosh et al.

1997; Hisamatsu et al. 2002; Padipatvuthikul & Mair 2007; Rathke et al. 2009; Staxrud & Dahl 2011). Sie helfen bei der Benetzung der Füllungsoberfläche und ermöglichen einen chemischen Verbund zwischen den Kompositschichten (Brosh et al. 1997). Auch für die Haftung der neuen Füllung an Schmelz und Dentin ist die Verwendung eines Haftvermittlers essentiell (Thiele 2002).

Gefüllte Adhäsive werden von diversen Autoren bevorzugt (Perdigão et al. 1999; Teixeira et al. 2005), es existieren jedoch auch Aussagen zugunsten von ungefüllten Adhäsiven (Boyer et al. 1978; Yesilyurt et al. 2009). Einigen Studien zufolge ist der alleinige Einsatz eines Bonding-Systems genauso wirkungsvoll wie die mechanische Bearbeitung der Verbundfläche mittels Abrasion (Rathke et al. 2009) oder dieser sogar überlegen (Padipatvuthikul & Mair 2007). Eine im Jahr 2011 veröffentlichte Studie gibt allerdings an, dass die Bearbeitung der Substratfüllung mit einer Kombination aus Abrasion durch Siliziumdioxidpartikel, Silan und einem Adhäsiv besser abgeschnitten habe als die Verwendung eines Adhäsivs allein (Rinastiti et al. 2011).

Statt gefüllte oder ungefüllte Adhäsive als Haftvermittler einzusetzen, wird von einigen Autoren empfohlen, eine Schicht aus fließfähigem Komposit zu applizieren (Papacchini et al. 2007a; Papacchini et al. 2008; Ivanovas et al. 2011).

Enthält das Material der Substratfüllung anorganische Füllerpartikel, bietet sich der Gebrauch eines Silans (Swift, JR. et al. 1994; Tezvergil et al. 2003; Brendeke & Özcan 2007; Özcan et al. 2007; Akimoto et al. 2011) oder silanhaltigen Primers (Hisamatsu et al. 2002; Fawzy et al. 2008; Loomans et al. 2011) an, welcher eine kovalente Bindung über Hydroxylgruppen mit den Füllern des Ausgangsmaterials und den Monomeren des Haftvermittlers eingeht (Tezvergil et al. 2003; Özcan et al. 2007; Lung & Matinlinna 2012) und die Benetzungsmöglichkeit der unregelmäßigen Füllungsoberfläche durch das Adhäsivsystem

erhöht (Bouschlicher et al. 1997). Dieses Verfahren zeigt jedoch nur Erfolge, wenn genügend freie Füllpartikel auf der Füllungsoberfläche vorhanden sind. Außerdem sollte darauf geachtet werden, dass angrenzender Schmelz beziehungsweise Dentin nicht durch das Silan kontaminiert werden, um die Haftfestigkeit des Reparaturkomposits an der Zahnhartsubstanz nicht zu gefährden (Hamano et al. 2011).

Bei einem hohen Gehalt des Ausgangsmaterials zum Beispiel an Barium oder Strontium ist auch die Verwendung eines selbstätzenden Primers durchführbar, welcher eine chemische Reaktion zwischen der Säure des Haftvermittlers und den Metallionen des Ausgangsmaterials ermöglicht (Akimoto et al. 2011).

Handelt es sich bei dem Ausgangsmaterial nicht um dimethacrylatbasierte Komposite, erfolgt eine entsprechende Anpassung des Reparaturprotokolls. Bei Siloranen wird für eine homotype Reparatur der Einsatz eines fließfähigen Silorans als Haftvermittler empfohlen. Soll als Reparaturmaterial ein dimethacrylatbasierter Kunststoff zum Einsatz kommen, sollte auch der Haftvermittler auf Dimethacrylat basieren (Ivanovas et al. 2011). Im Fall eines methacrylatbasierten Reparaturkomposits wird zusätzlich die Verwendung eines Silans vor Aufbringen des Adhäsivs befürwortet (Wiegand et al. 2012).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zahlreiche verschiedene Reparaturprotokolle empfohlen und verwendet werden. Bei der Entscheidungsfindung ist es hilfreich, die genaue Zusammensetzung der verwendeten Materialien zu kennen (Loomans et al. 2011). In der Regel werden nach dem Anrauen der Substratfüllungsoberfläche ein Silan und ein niedrig visköser Haftvermittler appliziert (Hamano et al. 2011).

2.2.3.3 Reparaturkomposit

Für den Langzeiterfolg einer Reparatur ist nicht entscheidend, ob für die Reparaturfüllung oder Füllungsreparatur dasselbe Komposit verwendet wurde wie für die Substratfüllung (Kamann & Gängler 2000; Foitzik & Attin 2004), obwohl Aussagen zugunsten homologer Reparaturen existieren (Baur & Ilie 2012). Das Adhäsiv sollte aber dem Reparaturkomposit angepasst sein (Foitzik & Attin 2004). Aus einer Studie von *Shahdad und Kennedy* geht hervor, dass bei Verwendung von Substrat- und Reparaturkompositen der gleichen chemischen Matrixzusammensetzung keine signifikant höheren Haftfestigkeitswerte resultierten als bei chemisch unterschiedlichem Aufbau der beiden Materialien (Shahdad & Kennedy 1998). Die chemische Zusammensetzung der Matrix des verwendeten Haftvermittlers scheint eine größere Rolle zu spielen als die des Reparaturwerkstoffes (Yesilyurt et al. 2009). Auch das Material der Substratfüllung, welches dem behandelnden Zahnarzt oft nicht bekannt ist, hat einen größeren Einfluss auf die Haftfestigkeit als das Reparaturmaterial (Baur & Ilie 2012).

Kamann und Gängler sehen die Verarbeitungseigenschaften des Reparaturkomposits, dessen physikalische Eigenschaften wie Druck-, Zug- und Biegefestigkeit, die werkstoffkundliche Beziehung der verwendeten Materialien und eine eventuell bestehende kariostatische Wirkung als wichtige Entscheidungsparameter bei der Wahl des Reparaturmaterials an (Kamann & Gängler 2000). In einer Studie, in der der Einfluss der Temperatur des Reparaturkomposits auf die Haftfestigkeit untersucht wurde, konnte festgestellt werden, dass die höchsten Werte bei einer Erhitzung des Materials auf 37°C erreicht wurden (Papacchini et al. 2007a).

Aus einer 2012 veröffentlichten Studie geht hervor, dass der Einfluss verschiedener Materialien auf die Haftfestigkeit davon abhängig ist, ob sie als Substrat- oder

Reparaturmaterial zum Einsatz kommen. Als erfolgreichste Ausgangsmaterialien erwiesen sich ein Ormocer sowie ein dimethacrylatbasiertes, stopfbares Komposit. Als Reparaturkomposit konnte sich ein Siloran vor den anderen behaupten, während sehr hoch gefüllte Komposite, möglicherweise aufgrund ihrer schlechteren Benetzungsfähigkeit, nicht als Reparaturmaterial empfohlen werden (Baur & Ilie 2012).

Hybridkomposite weisen als Reparaturmaterial eine höhere Frakturresistenz auf als Mikrofüllerkomposite (Gregory & Moss 1990; Farid & Abdel-Mawla 1995; Ahlers et al. 1996). Im direkten Vergleich erwiesen sich für ein Mikrohybridkomposit mehr Reparaturmethoden als erfolgreich als für ein Nanohybridkomposit (Loomans et al. 2011).

2.3 Rheologie und Verarbeitungseigenschaften von Kompositen

Kommerziell erhältliche Komposite variieren in ihren Verarbeitungseigenschaften und in ihrer Konsistenz (Chiang et al. 2008). Dies spielt für praktizierende Zahnärzte eine große Rolle, da die durch rheologische Eigenschaften wie Viskoelastizität und Fließvermögen mitbestimmten Verarbeitungseigenschaften eines Füllungsmaterials die Adaption desselben an die Kavitätenwände und die Gestaltung der Oberflächenmorphologie der Füllung sowohl vereinfachen als auch erschweren können. Außerdem unterscheiden sich die Komposite in ihrem Verhalten, an den Füllungsinstrumenten haften zu bleiben. Dadurch werden Behandlungszeit und Qualität, Erfolgsaussicht und Lebensspanne der Restauration beeinflusst (Lee et al. 2003; Lee et al. 2006; Lee et al. 2007; Beun et al. 2008). Zurzeit stehen wenige objektive Methoden zur Quantifizierung und zum Vergleich der Verarbeitungseigenschaften von Kompositen zur Verfügung (Tyas et al. 1998). Trotzdem ist eine Entwicklung in der Forschung zu erkennen, die sich nicht nur auf die Steigerung der physikalischen Eigenschaften der Komposite fokussiert, sondern sich auch der Verbesserung dieser eher

subjektiven Parameter widmet (Ferracane et al. 1981; Lee et al. 2006). Die Verarbeitungseigenschaften eines Werkstoffes können die Entscheidung des Zahnarztes für oder gegen diesen bei einer gegebenen Indikation mitbestimmen (Lee et al. 2003). Es werden oft Komposite mit einer bestimmten Konsistenz bevorzugt verwendet, da letztere Einfluss auf die Applikation und die Bearbeitung des Materials hat (Opdam et al. 1996).

Konsistenz und Fließeigenschaften eines Materials beeinflussen die Möglichkeit, dieses in der Kavität korrekt zu platzieren und zu modellieren, ohne dass es zur Bildung von Lücken zwischen Werkstoff und Kavitätenrändern oder zwischen den einzelnen Schichten des Materials kommt (Ferracane et al. 1981; Tyas et al. 1998; Al-Sharaa & Watts 2003; Lee et al. 2003; Lee et al. 2006; in Lee et al. 2007). Ebenfalls besteht eine direkte Beziehung zwischen der Viskosität eines Komposits und dessen Verarbeitungscharakteristika, wie Formbarkeit, Einfachheit der Platzierung, Konturierung der Restauration, Haftung an der Zahnhartsubstanz oder dem Instrument und Standfestigkeit des Materials (Jacobsen et al. 1977; Ferracane et al. 1981; Opdam et al. 1996; Bayne et al. 1998; Leinfelder et al. 1998; Leinfelder & Prasad 1998; Tyas et al. 1998; Al-Sharaa & Watts 2003; Lee et al. 2003).

2.3.1 Einflussparameter auf die rheologischen Eigenschaften von Kompositen

2.3.1.1 Beeinflussung der rheologischen Eigenschaften durch Veränderungen der organischen und anorganischen Phase

Die Viskosität eines Komposits wird sowohl von seiner organischen (Tavas & Watts 1989; Taylor et al. 1998; Silikas & Watts 1999; Chiang et al. 2008) als auch von der anorganischen Phase (Kim & Jang 1998; Schulze et al. 2003) bestimmt. Die Matrix eines dimethacrylatbasierten Komposits besteht in der Regel zum Großteil aus Bis-GMA (Bisphenol-A-glycidylmethacrylat), dem weitere (Ko-)Monomere wie TEGDMA

(Triethylenglycol-Dimethacrylat), UDMA (Urethandimethacrylat), Bis-EMA (Bisphenol-A-polyethylenglykoldietherdimethacrylat) oder HDDMA (Hexandioldimethacrylat) unter anderem als Verdünnungsmittel beigelegt werden. Außerdem sind Komposite mit andersartiger Matrix erhältlich, beispielsweise spezielle, langkettige (Du Pont-) Monomere enthaltende Komposite, Urethan-Monomere enthaltende Komposite, polyacrylsäure-modifizierte Komomere, Ormocere oder Silorane (Ernst 2011, Ilie & Hickel 2011b). Anorganische Füllkörper sollen die mechanischen Eigenschaften wie Abrasionsfestigkeit und Härte steigern sowie die Polymerisationsschrumpfung und den thermischen Ausdehnungskoeffizienten reduzieren (Willems et al. 1992). Typ und Menge jedes enthaltenen Monomers sind verantwortlich für die Viskosität der organischen Matrix. Diese wiederum wird stark von der Menge, Form und Größe der Füllerpartikel sowie deren Oberflächenbehandlung beeinflusst (Lee et al. 2003; Beun et al. 2008). Außerdem spielt das räumliche Verhältnis der Füllkörper untereinander und die Grenzflächeninteraktion zwischen Füllerpartikeln und Matrix eine Rolle. Interaktionen wie Kollisionen, Partikelrotationen, mechanische Interferenzen oder Agglomerationen können die Viskosität eines Komposits beeinflussen (Leinfelder & Prasad 1998; Tyas et al. 1998; Lee et al. 2003; Lee et al. 2006).

Bis-GMA, Grundbestandteil vieler dimethacrylatbasierter Komposite, besitzt aufgrund der intermolekularen Wasserstoffbindungen eine vergleichsweise hohe Viskosität, weshalb oft niedriger visköse (Ko-) Monomere wie TEGDMA hinzugegeben werden. Somit kann auch der Füllergehalt erhöht werden, ohne dass das Material zu hoch viskös für eine angenehme Verarbeitung wird (Sankarapandian et al. 1997; Sideridou et al. 2002). Eine an experimentellen Kompositen durchgeführte Studie zeigte, dass sich mit zunehmender Menge an TEGDMA die Polymerisationsschrumpfung erhöht, während die Viskosität des Komposits abnimmt (Ellakwa et al. 2007). Letzteres deckt sich mit den Ergebnissen einer weiteren Studie (Lee et al. 2006). Außerdem führt TEGDMA zu einer erhöhten Wasseraufnahme in die

Matrix (Sideridou et al. 2002). Auch ein erhöhter Anteil an dem (Ko-) Monomer UDMA (Urethandimethacrylat) führt zu einer Verringerung der Viskosität. Ersetzt man jedoch einen Teil des TEGDMA durch UDMA kommt es zu einer Steigerung der Viskosität (Ellakwa et al. 2007).

Eine Erhöhung des Füllkörperanteils experimenteller Komposite führt zu einer exponentiellen Zunahme der Viskosität (Lee et al. 2006). In einer früheren Studie von *Lee et al.* stieg zwar die Viskosität mit wachsendem Füllkörperanteil, allerdings bestand nur eine schwache, nicht-lineare Beziehung zwischen dem Volumengehalt der Füller und der Viskosität. Die Größenverteilung der Füller spielte dafür eine größere Rolle (Lee et al. 2003).

Ein Anstieg des Füllkörpergehalts kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden, beispielsweise durch die Kombination relativ kleiner Füller mit Füllern unterschiedlicher Größe, was eine dichtere Verteilung der Füllkörper und somit auch eine Erhöhung der möglichen Volumenfraktion an Füllstoffen erlaubt. Auch die Verwendung kugelförmiger Füllkörper unterschiedlicher Dimensionen erleichtert die Einbindung einer größeren Anzahl anorganischer Füller in die Matrix (Kim et al. 2002; Beun et al. 2007). Bei identischen Füllervolumina kommt es mit sinkender Füllkörpergröße zu einer Viskositätssteigerung. Dies konnten *Lee et al.* anhand von Versuchen mit Siliziumdioxid- füllkörpern (0,04 μm versus 0,5 μm) und Bariumfüllern (0,7 μm versus 1,0 μm) feststellen (Lee et al. 2006). Sehr kleine (Nano-)Partikel liefern insgesamt eine größere Oberfläche bei gleichem Volumen und erhöhen signifikant die Viskosität. Dies geschieht aufgrund einer erhöhten Anzahl polarer Bindungen der Füllerpartikel zur sie umgebenden Matrix und vermehrter Interaktion zwischen den einzelnen Füllerpartikeln. Gleichzeitig wird die Herstellung einer homogenen Mischung zwischen Nanofüllern und Matrix erschwert. Schließlich kommt es zur Agglomeration der sehr kleinen Partikel (meistens Siliziumdioxidfüller) und zur Bildung größerer Zusammenschlüsse mit Dimensionen von 0,04 – 0,4 μm (Anusavice & Phillips 2003; Lee et

al. 2006). Amorphe Siliziumdioxidpartikel führen zudem zu einer leichteren Verarbeitung eines Komposits (Kim et al. 2002).

Lee et al. stellten fest, dass die Steigerung des Anteils an 0,7 µm großen Barium-Füllkörpern von 50% auf 75% einen Anstieg der Viskosität herbeiführt. Der gleiche Effekt zeigte sich bei der Substitution von 5% oder 10% 0,7 µm großer Bariumglas-Füllkörper durch 0,04 µm große Siliziumdioxid-Füllerpartikel bei gleich bleibendem Füller-Gewichtsanteil. Auch bei identischem Volumenanteil und gleicher Füllkörperform zeigte die Reduzierung der Füllkörpergröße einen Viskositätsanstieg. Der Einfluss der Füllkörpergröße auf die Viskosität wächst mit zunehmendem Füllkörperanteil. Dies liegt daran, dass bei geringer Partikelkonzentration die schwächere Interaktion zwischen Füllerpartikeln den Einfluss der Füllkörpergröße verringert und umgekehrt (Lee et al. 2006). *Beun et al.* dagegen fanden keine Korrelation zwischen den rheologischen Eigenschaften fließfähiger Komposite und dem Gewichtsanteil der Füllkörper oder deren Form (Beun et al. 2008). Eine andere Untersuchung zu fließfähigen Kompositen führte zu dem Ergebnis, dass keine Korrelation zwischen dem Füllkörperanteil und dem rheologischen Verhalten besteht, dafür aber der Füllkörpertyp und dessen Oberflächenbehandlung wichtig zu sein scheinen (Beun et al. 2012). *Lee et al.* stellten bei einem Vergleich des Einflusses von 0,5 µm großen, runden Siliziumdioxidfüllern mit 0,7 µm großen, unregelmäßig geformten Bariumglaspartikeln bei einem einheitlichen Fülleranteil von 30 Vol.% auf die Viskosität eines Komposits fest, dass sich bei letzterem eine niedrigere Viskosität ergab. Dies widersprach ihren Erwartungen, da sie von einer stärkeren Friktion der unregelmäßigen Bariumglasfüllkörper und einer daraus folgenden höheren Viskosität ausgegangen waren. Sie erklärten die Beobachtung damit, dass die Füllstoffe umgebende Silan wie ein Schmiermittel gewirkt haben muss (Lee et al. 2006). Auch andere Studien belegen, dass sich eine Silanisierung der anorganischen Füllerpartikel, Veränderungen ihrer Größe und Form und ihr Verhältnis untereinander und zur organischen Matrix

viskositätsbeeinflussend auswirken (Tavas & Watts 1989; Kim & Jang 1998; Taylor et al. 1998; Silikas & Watts 1999; Kaleem et al. 2009).

2.3.1.2 Veränderung der rheologischen Eigenschaften durch äußere Einflüsse

Mit steigender Temperatur sinkt die Viskosität von Kompositen (Silikas & Watts 1999; Lee et al. 2006), während ihre Klebrigkeit zunimmt. Letztere sinkt jedoch, wenn das Material mit einer höheren Bewegungsgeschwindigkeit eingebracht wird (Ertl et al. 2010). *Beun et al.* weisen auf die Thixotropie fließfähiger Komposite hin (Beun et al. 2009).

Lee et al. erhöhten in einer Studie die Temperatur der Komposite von 25°C auf 35°C. Dabei kam es zu einer starken Verringerung der Viskosität. Hoch visköse Monomer-Matrizes mit einem hohen Gehalt an Bis-GMA waren empfindlicher für Temperaturschwankungen als die mit niedrigem Bis-GMA-Anteil. Außerdem zeigte sich ein pseudoplastisches Verhalten der Komposite mit dem Ergebnis, dass die Viskosität von Kompositen mit steigender Oszillationsfrequenz abnahm. Dies basiert darauf, dass sich in einer Dispersion aus Feststoffen in einer Flüssigkeit ab einem Gewichtsanteil der festen Partikel von mehr als 30 % die Viskosität als eine Funktion der Scherrate erweist (Lee et al. 2006). Mit zunehmender Scherrate ändern Monomere der Matrix ihre Ausrichtung oder die räumliche Orientierung der anorganischen Füllpartikel wandelt sich reversibel, was zu einer Verminderung der Interaktion zwischen der organischen Matrix und den Füllkörpern führt. Die Distanz zwischen einzelnen Füllpartikeln oder zwischen Füllkörpern und Matrixbestandteilen kann sich vergrößern, was die Zerstörung der molekularen Bindung zur Folge hat (Kim & Jang 1998; Lee et al. 2006). Auch andere Studien berichten von dem nichtnewtonschen Verhalten einer Verminderung der Viskosität bei steigender Scherrate (Lee et al. 2003; Beun et al. 2008; Lee et al. 2010; Beun et al. 2012). In der Praxis wird dieser Effekt zum Beispiel bei der Anfertigung von Füllungen ausgenutzt. Schnelles, leichtes Beklopfen des Materials in der

Kavität macht es fließfähiger und verbessert die Anpassung an die Kavitätenwände (Lee et al. 2006). Außerdem kann das Einsetzen von Keramikinlays vereinfacht werden, indem man sich der Ultraschall-Technik bedient und damit die Viskosität des Befestigungskomposits reduziert (Ferracane et al. 1981; van Meerbeek et al. 1994). Bringt man Komposite mithilfe einer Applikationsspritze in die Kavität ein, bewegt sich das Material aufgrund der auf die Spritze wirkenden Kraft unter einer hohen Scherrate durch die Nadel, was zu einer Verringerung der Viskosität führt. Somit kann das Material besser in die Kavität oder auf eine Oberfläche fließen. Nach Beendigung der Extrusion wirkt keine externe Kraft mehr auf den Werkstoff (Lee et al. 2010).

In einer Studie von *Papacchini et al.* wurde der Einfluss der Temperatur auf das viskoelastische Verhalten von Kompositen hinsichtlich ihrer Eignung für Reparaturen untersucht. Sie kamen zu dem Schluss, dass die besten Haftfestigkeitswerte mit einem fließfähigen Komposit als Haftvermittler erzielt werden, unabhängig von dessen Temperatur. War die Interaktion zwischen Haftvermittler und Temperatur signifikant, hing der Effekt des Haftvermittlers von der Temperatur des Reparaturmaterials ab und umgekehrt. Eine deutliche Viskositätsminderung konnte bei der Erhöhung der Temperatur von 4°C auf 37°C festgestellt werden. Dies resultierte in einem stärkeren Haftverbund und höherer Haftfestigkeit. Die Haftfestigkeitswerte, die bei einer Reparatur ohne Einsatz eines Haftvermittlers mit vorgewärmtem Reparaturmaterial erreicht wurden, waren genauso hoch wie die einer Reparatur unter Verwendung eines ungefüllten Adhäsivs. Eine Erwärmung des Komposits von Zimmertemperatur auf 37°C resultierte in verbesserten Fließ- und Verarbeitungseigenschaften. Das Material penetrierte tiefer in Mikrorententionen der Substratoberfläche. Gleichzeitig sank der Anteil der adhäsiven zugunsten der kohäsiven oder gemischten Frakturen bei steigender Temperatur des Reparaturmaterials (Papacchini et al. 2007a).

Die rheologischen Eigenschaften von Kompositen hinsichtlich ihrer Verarbeitungsmöglichkeiten werden also stark von der Zusammensetzung der organischen und anorganischen Phase, der Temperatur und der Einwirkung äußerer Kräfte beeinflusst (Lee et al. 2006). Die Scherrate übt den größten Einfluss auf die Viskosität von Kompositen aus (Kim & Jang 1998).

2.3.2 Vergleich fließfähiger mit stopfbaren Kompositen

Nach ihrer Viskosität lassen sich Komposite in fließfähige, „normalvisköse“ Hybrid- und stopfbare Komposite unterteilen (Helvatjoglu-Antoniades et al. 2006). Zwischen diesen drei Kompositklassen, aber auch innerhalb der Gruppen, also zwischen den Produkten verschiedener Hersteller, existieren erhebliche Differenzen hinsichtlich der Fließfähigkeit der Materialien (Lee et al. 2003).

Aufgrund ihres geringeren Füllkörpergehalts weisen fließfähige Komposite eine niedrige Viskosität auf (Bayne et al. 1998; Helvatjoglu-Antoniades et al. 2006; Papadogiannis et al. 2008; Ertl et al. 2010). Sie zeigen ein thixotropes (Beun et al. 2009) und viskoelastisches (Beun et al. 2012) Verhalten. Allerdings steigt mit sinkender Viskosität die Tendenz, an Modellierinstrumenten haften zu bleiben (Lee et al. 2006).

Ursprünglich wurden fließfähige Komposite für den Zahnhalsbereich konzipiert. In diesem Gebiet sollen durch die Elastizität des Materials Verformungen durch okklusale Kräfte kompensiert und die Bildung von Randspalten oder Absplitterungen vermieden werden (Leevailoj et al. 2001; Ernst 2006). Mithilfe ihres guten Fließvermögens können sie zu einer Reduzierung sowohl des Schrumpfstresses als auch des Auftretens von Randundichtigkeiten und möglichen Debondings beitragen (Unterbrink & Liebenberg 1999; Leevailoj et al. 2001; Lee et al. 2010). In Kavitäten können sie somit als Liner unter einer Schicht aus stopfbarem Material eingesetzt werden, um einen besseren Randschluss der

Füllung zu gewährleisten (Steet et al. 2000). Allerdings weisen sie im Vergleich mit höher viskösen Materialien eine stärkere Polymerisationsschrumpfung auf (Labella et al. 1999). Situationen, die eine gute Penetration des Werkstoffs erfordern oder für den behandelnden Zahnarzt schwer zugänglich sind, stellen eine weitere Indikation dar (Leinfelder et al. 1999). Hier bietet sich die Verwendung einer Komposit-Spritze mit Applikationsspitze an (Lee et al. 2003; Beun et al. 2008). Zudem werden sie zur Versiegelung von Fissuren und zur Reparatur vorhandener Restaurationen eingesetzt (Bayne et al. 1998; Lee et al. 2003; Helvatjoglu-Antoniades et al. 2006). Für den Gebrauch in stark belasteten und verschleißanfälligen Arealen sind sie aufgrund ihrer geringen mechanischen Eigenschaften kontraindiziert (Bayne et al. 1998; Leinfelder et al. 1999). Dazu gehört nicht zuletzt ihr eher niedriger Elastizitätsmodul (Sabbagh et al. 2002; Helvatjoglu-Antoniades et al. 2006). Nach der Klassifizierung durch die ISO-Norm 4049, wonach Füllungen für den okklusalen Bereich eine Biegefestigkeit von mindestens 80 MPa aufweisen müssen, lassen sich jedoch neben Ormoceren, Hybrid-, Nano-Hybrid- und stopfbaren Kompositen auch viele fließfähige Materialien dafür als geeignet einstufen. *Ilie und Hickel* kommen allerdings zu dem Schluss, dass ein zu niedriger Elastizitätsmodul zu katastrophalem Versagen führen kann. Sie schlagen daher vor, auch ein Limit bezüglich des Elastizitätsmoduls einzuführen (Ilie & Hickel 2009a).

Stopfbare Komposite dagegen beanspruchen eine hohe Viskosität und eine geringe volumetrische Polymerisationsschrumpfung für sich und werden für den Einsatz im Seitenzahnbereich empfohlen. Sie wurden auch mit dem Ziel entwickelt, Verschleißerscheinungen und das Auftreten von Frakturen zu minimieren (Abe et al. 2001, Ilie & Hickel 2009a). Allerdings fanden *Choi et al.* heraus, dass die volumetrische Polymerisationsschrumpfung von stopfbaren Kompositen genauso hoch oder höher ist als die von normalviskösen Kompositen (Choi et al. 2000). Stopfbare Komposite können aufgrund ihrer guten Verarbeitungseigenschaften mit Techniken ähnlich wie bei der Verwendung von

Amalgam eingebracht werden (Sarrett et al. 2006). Sie sollen zudem die Erzeugung ausreichender interproximaler Kontakte ermöglichen (Papadogiannis et al. 2008). Allerdings zeigten stopfbare Komposite im Vergleich mit Hybrid-Kompositen keinen oder nur einen geringen Vorteil bezüglich der Qualität der Approximalkontakte. Sowohl normal- als auch hochvisköse (stopfbare) Komposite erreichten hohe proximale Kontaktstärken in Klasse II-Kavitäten, welche keinen signifikanten Unterschied zur ursprünglichen Kontaktstärke des unpräparierten Zahnes aufwiesen, jedoch höher waren als die von niedrigviskösen (fließfähigen) Kompositen (Peumans et al. 2001; Klein et al. 2002). Eine hohe Verschleißfestigkeit soll den Einsatz in kaukrafttragenden Gebieten gestatten. Aufgrund des hohen Füllkörpergehalts weisen sie die dafür nötige Mikrohärtigkeit auf (Beun et al. 2012). Auch ihr hohes Elastizitätsmodul qualifiziert sie für den Gebrauch in stark belasteten Bereichen, da sie so okklusale Kräfte und Deformationen standhalten können (Lambrechts et al. 1987; Unterbrink & Liebenberg 1999; Helvatjoglu-Antoniades et al. 2006). Sie schneiden jedoch im Vergleich mit herkömmlichen Kompositen bezüglich der physikalischen Eigenschaften nicht immer besser ab (Abe et al. 2001).

In einer Untersuchung von 72 verschiedenen Kompositen acht unterschiedlicher Materialklassen zeigte sich, dass sich Hybrid-, Nano-Hybrid- und stopfbare Komposite sowie Ormocere hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften als Materialklassen nicht signifikant voneinander unterscheiden. Sie erreichten die höchsten Biegefestigkeitswerte. Infolge dieser Laborstudien zeigten stopfbare Komposite bezüglich der Eignung in stark belasteten Gebieten keine Vorteile gegenüber Hybrid-Kompositen. Fließfähige Komposite und Komposmere unterschieden sich in Bezug auf die meisten mechanischen Eigenschaften nicht signifikant von mikrogefüllten Kompositen. Sie erzielten lediglich eine höhere diametrale Zugfestigkeit. Insgesamt wiesen die Materialien jedoch auch innerhalb ihrer Materialklassen große Unterschiede auf. Es stellte sich zudem heraus, dass der Volumenanteil an Füllkörpern, im

Vergleich mit dem Materialtyp und dem Gewichtsanteil der Füller, den größten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften der Materialien ausübte. Maximale Biegefestigkeit und maximaler Elastizitätsmodul wurden bei einem Füllkörpergehalt von 60 Vol.% erzielt (Ilie & Hickel 2009a). *Manhart et al.* stellten zudem fest, dass das Fraktur- und Verschleißverhalten von Kompositen stark vom Füllersystem beeinflusst wird, während die Materialkategorie hierbei eine untergeordnete Rolle spielt (Manhart et al. 2000).

2.3.3 Bulk-Fill-Komposite

Innerhalb der letzten Jahre wurde die Materialklasse der Bulk-Fill-Komposite eingeführt. Ziel war es, durch Reduzierung der nötigen Anzahl von Materialschichten beim Legen der Füllung Zeit einzusparen, sowohl während der manuellen Werkstoffverarbeitung als auch bei der Lichtpolymerisation. Inkremente von 4-5 mm Tiefe sollten so in einem einzigen Schritt mit einmaliger Polymerisation möglich sein. Tatsächlich kamen *Czasch und Ilie* nach der Untersuchung zweier fließfähiger Bulk-Fill-Komposite zu dem Ergebnis, dass 20 Sekunden Lichtpolymerisation zur Aushärtung einer 4 mm dicken Kompositschicht ausreichen. Aushärtungsgrad und mikromechanische Eigenschaften bleiben innerhalb dieser Parameter konstant (Czasch & Ilie 2013). Eine mit einem konventionellen stopfbaren Komposit durchgeführte Studie lieferte Hinweise darauf, dass Schichten von bis zu 4 mm Tiefe ohne Verlängerung der Polymerisationsdauer im Vergleich zum herkömmlichen Vorgehen nicht adäquat ausgehärtet werden konnten (Abbas et al. 2003). Die größere Durchhärtungstiefe von Bulk-Fill-Materialien im Vergleich zu konventionellen, in schmalen Inkrementen verarbeiteten Kompositen, wird unter anderem durch eine veränderte Transluzenz der Bulk-Fill-Komposite erreicht. Dies wird wiederum durch eine Reduzierung des Füllstoffgehalts ermöglicht. Die Größe der Füllkörper in vielen Bulk-Fill-Kompositen beträgt 20 µm oder mehr, was bei gleichem Füllstoffgehalt die Oberfläche der Füller und somit die

Interferenzfläche zwischen Matrix und Füllern verkleinert. Folge ist eine geringere Lichtstreuung bei der Polymerisation. Das Licht kann in tiefere Schichten des Werkstoffes eindringen. Zusätzliche Nano-Füller mit Dimensionen unterhalb der Wellenlänge des sichtbaren Lichts (390 - 750 nm) können sichtbares Licht weder streuen noch absorbieren, was zusätzlich zu einer verbesserten Transluzenz und Ästhetik führt (Kim et al. 2007; Ilie et al. 2013).

Die Untersuchung von sieben Bulk-Fill-Kompositen ergab, dass diese sich insgesamt in ihrer Zusammensetzung nicht wesentlich von herkömmlichen Kompositen unterscheiden. Sie enthalten Monomere wie Bis-GMA, UDMA, TEGDMA und EBPDMa ebenso wie ein herkömmliches Füllersystem. Ausnahmen bilden SDR (Stress Decreasing Resin)-haltige Komposite, deren Matrix ein patentiertes Urethan-Dimethacrylat mit eingeschlossenen photoaktiven Gruppen aufweist, welche die Polymerisation beeinflussen sowie Komposite mit einem „Initiator Booster“ zusätzlich zu einem regulären Initiatorsystem (Ilie et al. 2013).

Als Materialkategorie hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften, wie Vickers-Härte und Elastizitätsmodul, lassen sich Bulk-Fill-Komposite zwischen Nano- und Mikro-Hybrid-Kompositen und fließfähigen Kompositen (Flowables) einordnen. Sie besitzen eine ähnlich hohe Biegefestigkeit wie Nano- und Mikrohybride und ein akzeptables Kriechverhalten ähnlich den Flowables (El-Safty et al. 2012; Ilie et al. 2013). In Bezug auf die Randundichtigkeit schnitten zwei fließfähige Bulk-Fill-Komposite vergleichbar zu einem konventionellen Komposit ab (Moorthy et al. 2012). Ein experimentelles SDR - Bulk-Fill-Komposit erzielte die niedrigsten Schrumpfungsspannungswerte im Vergleich zu regulären fließfähigen und normal-viskösen Nano- und Mikro-Hybrid-Kompositen und einem Siloran-basierten Komposit (Ilie & Hickel 2011a). Auch Wasseraufnahme und Biokompatibilität scheinen herkömmlichen Kompositen zu entsprechen (Fleming et al. 2008). Der niedrigere Elastizitätsmodul von Bulk-Fill-Kompositen im Vergleich zu Mikro- und Nano-Hybriden

könnte allerdings in Kaukraft tragenden Regionen zu einer Deformierung des Materials bis hin zu Frakturen führen. Einige Hersteller empfehlen daher bei Füllungen aus niedrig viskösen Bulk-Fill-Kompositen die Applikation einer zusätzlichen, abschließenden Schicht mit einem konventionellen Komposit, um unzureichende mechanische Eigenschaften ihres Bulk-Fill-Materials zu kompensieren (Ilie et al. 2013). Es bestehen zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen verschiedenen Vertretern der Bulk-Fill-Gruppe hinsichtlich ihrer Viskosität, Aushärtungstiefe und ihrer makro- und mikromechanischen Eigenschaften (Czasch & Ilie 2013; Ilie et al. 2013). Das in der vorliegenden Studie verwendete Bulk-Fill-Komposit SonicFill (Kerr) wies beispielsweise im Vergleich mit vier anderen Bulk-Fill-Materialien eine signifikant höhere Biegefestigkeit auf (Ilie et al. 2013).

3. Fragestellung

Die Reparatur defekter Kompositfüllungen stellt eine für Zahnärzte und Patienten gleichermaßen attraktive Alternative zur vollständigen Entfernung und Erneuerung von Restaurationen dar, zumal sie zum Bereich der minimalinvasiven Zahnheilkunde zählt (Tyas et al. 2000). Die große Vielfalt an lichtpolymerisierenden, vor allem methacrylatbasierten Kompositen in Hinsicht auf die chemische Zusammensetzung ihrer organischen Matrix und ihres Füllergehalts wirft die Frage auf, ob und wie Füllungsmaterialien erfolgreich repariert und im Sinne einer Reparatur miteinander kombiniert werden können (Brosh et al. 1997; Özcan et al. 2007; Papacchini et al. 2007a; Rathke et al. 2009; Ivanovas et al. 2011; Baur & Ilie 2012). Einige Studien zeigen, dass nicht nur chemisch ähnliche, sondern auch recht unterschiedliche Komposite, wie herkömmliche methacrylatbasierte Komposite, Silorane und Ormocere miteinander kompatibel sein können (Gregory et al. 1990; Mitsaki-Matsou et al. 1991; Ivanovas et al. 2011; Maneenut et al. 2011; Baur & Ilie 2012).

In diesem Zusammenhang wurde evaluiert, dass der Ersatz eines Adhäsivs durch ein fließfähiges Komposit mit einer niedrigen Viskosität bei der Reparatur von methacrylatbasierten Füllungsmaterialien zu erhöhten Reparaturhaftfestigkeitswerten führt (Papacchini et al. 2008). Ebenso resultiert die Applikation einer Schicht fließfähigen Komposits zusätzlich zu einem Adhäsiv in einer signifikant besseren Randadaptation und weniger Undichtigkeiten in Klasse II-Restaurationen in vitro (Frankenberger et al. 2003a).

Der viskositätsmindernde Effekt der Schallaktivierung wurde bisher unter anderem für das Einsetzen indirekter Keramikrestaurationen genutzt (Ferracane et al. 1981; van Meerbeek et al. 1994). Das neuartige System SonicFill der Firmen KaVo (Biberach, Deutschland) und Kerr (Orange, USA) wirbt damit, durch die Verwendung von Schallenergie ein Komposit zu verflüssigen und so dessen Applikation zu erleichtern. Es soll eine sehr gute Adaptation bei

nur geringer Klebrigkeit aufweisen. Nach dem Befüllen der Kavität zeigt das Material Standfestigkeit und kehrt zu etwa 70% der höheren Ausgangsviskosität zurück (Kerr SonicFill 2013).

Ziel der vorliegenden Studie ist, in vitro herauszufinden, ob der Einsatz von Schallaktivierung, angewendet auf verschiedene Komposite, für die Reparatur von Kompositrestaurationen sinnvoll ist.

Die Ermittlung der Reparaturhaftfestigkeit erfolgt mithilfe eines Scherversuches. Es werden fünf verschiedene, auf Methacrylat basierende Komposite miteinander kombiniert, wobei eine Hälfte der Proben unter Verwendung der verflüssigenden Wirkung des SonicFill-Handstücks „repariert“ wird. Als Haftvermittler dienen ein Silan-Primer sowie ein gefülltes Adhäsiv.

Auf folgende Fragestellungen sollte dabei eingegangen werden:

- Kann man das SonicFill-Handstück auch mit anderen Materialien als mit dem dafür vorgesehenen Komposit SonicFill kombinieren?
- Auf welche Gruppe zeigt der Einsatz der Schallenergie den größten beziehungsweise kleinsten Einfluss?
- Erhöht sich die Reparaturhaftfestigkeit auf Methacrylat basierender Komposite bei Senkung der Viskosität des Reparaturmaterials durch Schallaktivierung im Vergleich zu einer herkömmlichen Reparaturmethode?
- Welche Materialkombination erzielt die höchsten Werte für die Reparaturhaftfestigkeit?

- Ist eine homotype Reparatur einer heterotypen überlegen?
- Wie hoch ist die resultierende Reparaturverbundfestigkeit im Vergleich zur kohäsiven beziehungsweise inkrementellen Verbundfestigkeit?
- Besteht ein Zusammenhang zwischen Bruchmodus und Scherhaftfestigkeit?

4. Material und Methode

Die vorliegende Arbeit dient der Untersuchung der Scherhaftfestigkeit unterschiedlicher auf Füllungsflächen aufgetragener Komposite. Die Proben wurden unter zwei verschiedenen Aufbringbedingungen, aber unter Einhaltung eines gemeinsamen Reparaturprotokolls hergestellt. Zudem wurde eine positive Kontrollgruppe angefertigt. Alle Arbeitsschritte wurden von derselben Person ausgeführt.

Die variierten Parameter lauten wie folgt:

Füllungsmaterial

- Grandioso Flow (Voco, Cuxhaven, Deutschland)
- Clearfil Majesty Posterior (Kuraray, Tokyo, Japan)
- Clearfil Majesty Esthetic (Kuraray, Tokyo, Japan)
- Estelite Sigma Quick (Tokuyama, Tokyo, Japan)
- SonicFill (Kerr, Orange, USA)

Reparaturmaterial

- Grandioso Flow (Voco, Cuxhaven, Deutschland)
- Clearfil Majesty Posterior (Kuraray, Tokyo, Japan)
- Clearfil Majesty Esthetic (Kuraray, Tokyo, Japan)
- Estelite Sigma Quick (Tokuyama, Tokyo, Japan)
- SonicFill (Kerr, Orange, USA)

Aufbringmodus des Reparaturkomposits

- konventionell mit Handinstrumenten aus Stahl
- schallaktiviert über Stufe 1 des SonicFill-Handstücks (KaVo, Biberach, Deutschland)

Die genannten Materialien wurden jeweils mit sich selbst und den vier anderen Kompositen unter Verwendung eines Haftvermittlers je sowohl konventionell unter Verwendung von Handinstrumenten als auch unter Ausnutzung des viskositätsverändernden Effekts des SonicFill-Handstücks „repariert“, woraus sich 50 Materialkombinationen ergeben.

Pro Kombination wurden 15 Proben angefertigt. Insgesamt ergaben sich somit 750 Proben. Als Referenz wurde die Inkrementelle Verbundfestigkeit herangezogen. Dafür wurde eine positive Kontrollgruppe mit jeweils 15 Proben pro Material angelegt, in der jedes Material noch einmal mit sich selbst kombiniert wurde. Dabei wurde die simulierte Reparaturfüllung direkt auf die frisch hergestellten Ausgangsfüllungen aufgebaut und lichtgehärtet. Erst danach folgte eine einmalige zweimonatige Alterung in bidestilliertem Wasser bei 37°C.

Somit ergibt sich eine Gesamtzahl von 825 Proben.

Anschließend wurden die Proben auf ihre Scherhaftfestigkeit und ihren Bruchmodus hin untersucht und der Einfluss der Schallaktivierung durch das SonicFill-Handstück evaluiert.

4.1 Material

4.1.1 Verwendete Restaurationsmaterialien

Es wurden fünf verschiedene, auf Methacrylat basierende lichthärtende Komposite für diese Studie verwendet, welche sowohl als Substrat- als auch als Reparaturmaterial benutzt wurden.

Grandioso Flow (Voco, Cuxhaven, Deutschland)

Bei Grandioso Flow handelt es sich um ein fließfähiges Nano-Hybrid-Komposit.

Die Füllstoffe bestehen im Wesentlichen aus Glaskeramikfüllern mit einer mittleren Partikelgröße von 1 µm und funktionalisierten Siliziumdioxid-Nanopartikeln zwischen 20 und 40 nm. Die Matrix setzt sich vor allem aus Bis-GMA (Bisphenol-A-glycidylmethacrylat), Bis-EMA (Bisphenol-A-polyethylenglykoldietherdimethacrylat), TEGDMA (Triethylenglycol-Dimethacrylat) und HDDMA (Hexandioldimethacrylat) zusammen.

Als Indikationen werden vom Hersteller unter anderem alle Füllungsklassen angegeben. Da es sich um ein fließfähiges Komposit handelt, welches im Vergleich zu stopfbaren Kompositen eine geringere Viskosität aufweist, eignet es sich zum Beispiel auch für den Einsatz bei erweiterten Fissurenversiegelungen. Zudem ist es laut Hersteller zur Füllungsreparatur geeignet. Es wird von einer besseren Benetzung des Kavitätenbodens im Vergleich zu stopfbaren Kompositen ausgegangen (Voco Home 2013).

Clearfil Majesty Posterior (Kuraray, Tokyo, Japan)

Clearfil Majesty Posterior ist mit einem Fülleranteil von 92 Gew. % beziehungsweise 82 Vol. % ein hochgefülltes Nanohybridkomposit, welches vor allem für den Gebrauch im Seitenzahnbereich entwickelt wurde. Der Indikationsbereich umfasst alle Kavitätenklassen sowie auch intraorale Reparaturen von Kronen und Brücken. Die Füllerpartikel setzen sich aus silanisierten glaskeramischen Füllkörpern mit einer mittleren Größe von 1,5 µm und oberflächenbehandelten Aluminiumoxid-Füllkörpern einer mittleren Größe von 20 nm zusammen. Die Matrix besteht vor allem aus Bis-GMA, einem hydrophoben aromatischen Dimethacrylat sowie TEGDMA (Kuraray Home 2013a).

Clearfil Majesty Esthetic (Kuraray, Tokyo, Japan)

Es handelt sich bei Clearfil Majesty Esthetic um ein Nanohybridkomposit, das besonders den ästhetischen Ansprüchen an Frontzahnrestaurationen gerecht werden soll. Laut Hersteller ist das Material für alle Kavitätenklassen und auch für intraorale Reparaturen frakturierter Kronen und Brücken geeignet.

Der Fülleranteil (78 Gew.% beziehungsweise 66 Vol.%) ist aufgebaut aus silanisierten Bariumglasfüllern mit einer mittleren Größe von 0,7 µm und vorpolymerisierten organischen Füllern mit Nano-Füllern. Die Matrix weist Bis-GMA und ein hydrophobes aromatisches Dimethacrylat auf (Kuraray Home 2013b).

Estelite Sigma Quick (Tokuyama, Tokyo, Japan)

Bei diesem Restaurationsmaterial handelt es sich laut Herstellerangaben um ein universal einsetzbares Sub-Mikrofüller-Komposit für den Front- und Seitenzahnbereich.

Hervorgehoben wird die Verwendung der “Radical Amplified Photopolymerization Technology” (RAP), ein Initiatorsystem, das eine lange Verarbeitungsspanne bei sehr kurzer Polymerisationszeit gewährleisten soll. Zum Erreichen einer naturähnlichen Ästhetik werden kugelförmige Sub-Mikronfüller mit einer einheitlichen Größe von 0,2 µm eingesetzt.

Der Füllkörperanteil von 82 Gew.% beziehungsweise 71 Vol.% setzt sich zusammen aus Siliziumdioxid-, Zirkoniumdioxid- und organischen Partikeln. Die Matrix enthält unter anderem Bis-GMA und TEGDMA (Tokuyama Home 2013).

Sonic Fill (Kerr, Orange, USA)

Das SonicFill-System wurde von den Firmen Kerr und KaVo in Zusammenarbeit entwickelt.

Zum Applizieren des Nano-Hybrid-Komposits SonicFill von Kerr wird das KaVo SONICfill Handstück (KaVo, Biberach, Deutschland) benötigt. Auf dieses werden Unidose Tips, zum Handstück passende Komposit-Kartuschen, aufgeschraubt, aus denen das Restaurationsmaterial direkt in die Kavität eingebracht wird. Sie haben eine abgewinkelte Form und besitzen an ihrem Ende einen Durchmesser von 1,5 mm. Mit einem Ringschalter am hinteren Ende des SONICfill Handstücks lässt sich die Applikationsgeschwindigkeit in 5 verschiedenen Stufen einstellen. Stufe 1 repräsentiert die niedrigste Geschwindigkeit, Stufe 5 die höchste. Stufe 1 bietet zugleich die höchste Fließfähigkeit, da das Komposit über eine längere Zeit schallaktiviert wird.

SonicFill ist für alle Kavitätenklassen im Seitenzahnbereich indiziert und soll die Eigenschaften eines fließfähigen Komposits mit denen eines universellen Komposits verbinden. Dies soll dadurch erreicht werden, dass das Komposit durch die frei werdende Schwingungsenergie bei Betätigung der Schallaktivierung durch das Handstück fließfähiger, das heißt weniger viskös, gemacht wird.

Die Kavität soll so schneller und, wegen besserer Wandadaptation, zuverlässiger gefüllt werden können. Die Viskositätsminderung beträgt laut Herstellerangaben bis zu 87%. Ermöglicht wird dies durch einen nicht weiter beschriebenen rheologischen Modifikator im Komposit.

Nach Abschalten des Handstücks steigt die Viskosität laut Hersteller wieder auf ca. 70% des Ausgangswertes, was die Verarbeitung und Modellierung aufgrund der Standfestigkeit und des Nicht-Klebens am Instrument erleichtern soll.

Ebenso zeichnet sich das Komposit laut Hersteller durch außerordentliche Festigkeit, geringe Schrumpfung und hohe Aushärttiefe aus. Eine lichtinduzierte Polymerisation von Schichten bis zu 5 mm Dicke soll so möglich sein. Damit gehört SonicFill zu den Bulk-Fill-Kompositen (Kerr SonicFill 2013).

Tabelle 1: Übersicht über Verarbeitung und Zusammensetzung der verwendeten Füllungsmaterialien (Herstellerangaben)

Material	Grandioso Flow (Voco, Cuxhaven, Deutschland)	Clearfil Majesty Posterior (Kuraray, Tokyo, Japan)	Clearfil Majesty Esthetic (Kuraray, Tokyo, Japan)	Estelite Sigma Quick (Tokuyama, Tokyo, Japan)	SonicFill (Kerr, Orange, USA)
Typ	fließfähiges Nanohybrid	Nanohybrid	Nanohybrid	Sub-Mikrofüller	Nanohybrid Bulk-Fill
LOT	1115441	0108AB	0047AA	107E41	3756179
Farbe	A2	A2	A2	A3	A3
Verar- beitung	20 sec Polymerisation, 2 mm Inkremente	20 sec Polymerisation 2 mm Inkremente	20 sec Polymerisation 2 mm Inkremente	20 sec Polymerisation 2 mm Inkremente	20 sec Polymerisation 2 mm Inkremente
Matrix	Bis-GMA, Bis-EMA, TEGDMA, HDDMA	Bis-GMA, hydrophobes aromatisches Dimethacrylat, TEGDMA	Bis-GMA, hydrophobes aromatisches Dimethacrylat	Bis-GMA, TEGDMA	Bis-GMA, TEGDMA, EBPADMA ¹
Füll- körper	Glaskeramik- füller, funktionalisierte Siliziumdioxid- Nanopartikel	silanisierte glaskeramische Füllkörper, oberflächen- behandelte Aluminiumoxid- Füllkörper	silanisierte Bariumglasfüller, vorpolymerisierte organische Füller mit Nano-Füllern	Siliziumdioxid, Zirkoniumdioxid, organische Partikel	Siliziumdioxid, Glas, Oxide ¹
Füll- stoff- gehalt	81 Gew. % 65 Vol. %	92 Gew. % 82 Vol. %	78 Gew. % 66 Vol. %	82 Gew. % 71 Vol. %	83,5 Gew. % Vol. % unbekannt (keine Angaben)

Bis-GMA: Bisphenol-A-glycidylmethacrylat; Bis-EMA: Bisphenol-A-polyethylenglykoldietherdimethacrylat;
EBPADMA: ethoxyliertes Bisphenol-A-dimethacrylat; HDDMA: Hexandioldimethacrylat;
TEGDMA: Triethylenglycol-Dimethacrylat

¹ Diese Werte stammen aus einer 2013 veröffentlichten Studie (Ilie et al. 2013).

Tabelle 2: Elastizitätsmodule nach Universalhärteversuch und Drei-Punkt-Biegeversuch

Material	E-Modul nach Universalhärteversuch in GPa	E-Modul nach Drei-Punkt-Biegeversuch in GPa
Grandioso Flow (Voco, Cuxhaven, Deutschland)	15,21 (0,59) ¹	5,93 (1,16) ¹
Clearfil Majesty Posterior (Kuraray, Tokyo, Japan)	31,36 (1,60) ¹	9,86 (1,46) ¹
Clearfil Majesty Esthetic (Kuraray, Tokyo, Japan)	9,38 (0,44) ¹	4,07 (0,49) ¹
Estelite Sigma Quick (Tokuyama, Tokyo, Japan)	11,54 (0,36) ²	5,18 (0,75) ²
SonicFill (Kerr, Orange, USA)	15,93 (0,66) ³	6,92 (0,58) ³

¹ Es handelt sich um interne, bisher nicht veröffentlichte Daten aus der Datenbank der LMU (Dr. N. Ilie).

² Diese Werte stammen aus einer 2012 veröffentlichten Studie (Ilie et al. 2012).

³ Diese Werte stammen aus einer 2013 veröffentlichten Studie (Ilie et al. 2013).

¹⁻³ Es lagen identische Untersuchungsbedingungen vor.

4.1.2 Verwendete Haftvermittler

Silane Primer (Kerr, Orange, USA)

Hierbei handelt es sich um eine Mischung aus Silan und Primer (BisGMA, TEGDMA, BisDMA).

Optibond FL (Kerr, Orange, USA)

Optibond FL ist ein radioopakes, aus zwei Komponenten bestehendes Total-Etch-Adhäsiv. Es setzt sich aus einem Primer und einem gefüllten Adhäsiv zusammen, welches photopolymerisiert wird. In dieser Studie wurde auf die Verwendung des Primers verzichtet.

Tabelle 3: Verarbeitung der Haftvermittler und deren Zusammensetzung

Material	LOT	Verarbeitung	Materialzusammensetzung
Optibond FL (Ätzel) (Kerr, Orange, USA)	4423527	Applikation 20 sec, Spülen, Trocknen	36-39% H ₃ PO ₄ , Pigmente
Silane Primer (Kerr, Orange, USA)	4346576	15 sec Applikation durch Einmassieren mit Applikationsstäbchen (Kerr, Orange, USA), Verteilen mit Druckluft	3 Gew.% Silan; 15 Gew.% Monomere (BisGMA, TEGDMA, Bis-DMA); 82 Gew.% Ethanol; <1% Additive und Initiatoren
Optibond FL (Adhäsiv) (Kerr, Orange, USA)	4440150	15 sec Applikation durch Einmassieren mit Applikationsstäbchen (Kerr, Orange, USA), Verteilen mit Druckluft, 20 sec Polymerisation	Bis-GMA, HEMA, GDMA, CC, 2-Ethylhexyl-4- (dimethylamino)benzoat (Co-Initiator), Füller (SiO ₂ , Bariumaluminoborosilicat, Na ₂ SiF ₆), coupling factor A174 (ca. 48 Gew.% Füllergehalt)

CC: Campherchinon (Photo-Initiator); Bis-DMA: Bisphenol-A-Dimethacrylat; Bis-GMA: Bisphenol-A-glycidylmethacrylat; HEMA: 2-Hydroxyethylmethacrylat; TEGDMA: Triethylenglycol-Dimethacrylat, H₃PO₄: Phosphorsäure

4.2 Methode

4.2.1 Reparaturgruppe

4.2.1.1 Probenpräparation und Alterung des Substrats

Mit Hilfe eines Stahlzylinders wurden Acrylzyylinder (Technovit 4004, Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) hergestellt, in welche mittig mit einem diamantierten Bohrer eine runde Kavität von 2 mm Tiefe und 6 mm Durchmesser angelegt wurde. Diese Kavität wurde mithilfe eines sauberen Füllungsinstruments aus hochvergütetem Edelstahl mit einem der fünf Materialien aufgefüllt und das eingebrachte Material mit einem durchsichtigen, 0,05 mm schmalen Kunststoffstreifen (Universalstreifen, Frasco, Tettang, Deutschland) abgedeckt und mit einem Objektträger geglättet. Nach Entfernen des Objektträgers wurde die Substratfüllung durch den Frascostreifen 20 Sekunden mit einer blauen Licht emittierenden LED-Lampe (Bluephase, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein, Modus HIP) bei einer

Lichtintensität von 1435 mW/cm^2 polymerisiert. Die Lampe wurde senkrecht und ohne Abstand zur Füllungsoberfläche positioniert. Die Leistung der Lampe wurde regelmäßig überprüft sowie der Lichtleiter nach jedem Gebrauch nach Verunreinigungen untersucht und gegebenenfalls gesäubert.

Bei dem Komposit SonicFill (Kerr, Orange, USA) wurde die Kavität mithilfe des SonicFill-Handstücks (KaVo, Biberach, Deutschland) auf Stufe 1 direkt gefüllt, bei den Kompositen Clearfil Majesty Esthetic, Clearfil Majesty Posterior und Estelite Sigma Quick wurden Handinstrumente zum Füllen verwendet. Grandioso Flow wurde mithilfe der zugehörigen Applikationsspritze eingebracht. Kanülen für Grandioso Flow wurden nach jeder Benutzung ausgewechselt und Edelstahl-Handinstrumente gründlich von Rückständen gereinigt.

Anschließend erfolgte eine zweimonatige Lagerung in bidestilliertem Wasser bei 37°C , welches alle zwei Wochen erneuert wurde.

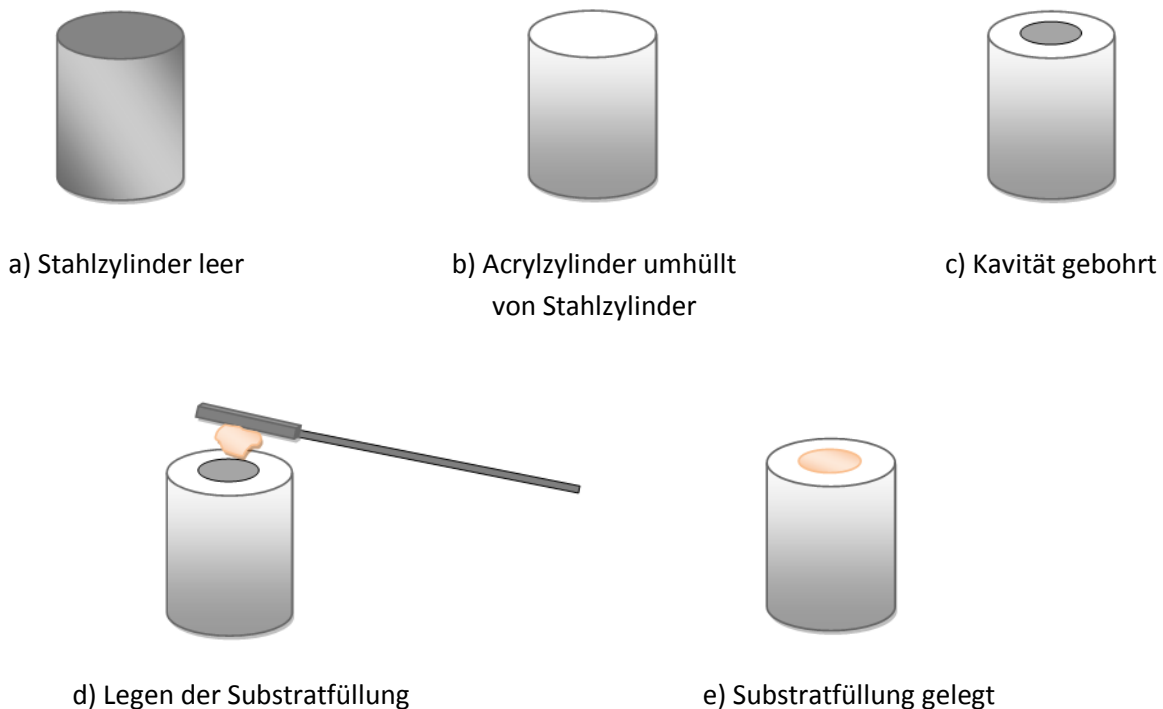


Abbildung 1: Herstellung der Substratfüllung

4.2.1.2 Herstellung und Alterung der Reparaturfüllung

Nach Ablauf der zwei Monate künstlicher Alterung wurden die Ausgangsfüllungen an ihrer Oberfläche mithilfe von Siliziumkarbidpapier der Körnung 400 (Leco, St. Joseph, USA) unter Wasserkühlung angeraut und anschließend getrocknet. Danach wurde ein 1cm² großer Streifen Klebeband mittig auf der Oberfläche der Probe appliziert, in welches zuvor ein Loch mit einem Durchmesser von 3 mm gestanzt worden war.

Anschließend erfolgte zur Reinigung der Oberfläche von Schleifpartikeln für 20 Sekunden die Applikation von 37,5%iger Phosphorsäure (Kerr, Orange, USA) auf die Oberfläche der Ausgangsfüllung. Nach gründlichem Abspülen der Säure und Trocknung mit Druckluft folgte das Einmassieren des Silans (Silane Primer, Kerr, Orange, USA) mit einem Applikationsstäbchen, das nach 15 Sekunden mit dem Luftbläser dünn verblasen wurde. Danach wurde das Adhäsiv (Optibond FL, Kerr, Orange, USA) aufgetragen und einmassiert, ebenfalls nach 15 Sekunden dünn verblasen und für 20 Sekunden im Softstart-Modus polymerisiert (Bluephase, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein, Modus LOP).

Mithilfe einer dafür hergestellten Matrize aus Registriersilikon (Regisil, Dentsply, York, USA) wurde dann ein die Reparaturfüllung simulierender Zylinder aus einem der fünf Materialien mit 4 mm Höhe und 3 mm Durchmesser auf der Ausgangsfüllung aufgebracht. Als Vorlage für die Matrizen diente ein bereits gefüllter Stahlzylinder, in dem mittig ein Metallstab mit einem Durchmesser von 3 mm befestigt war und somit die genaue Position und Dimension der späteren Reparaturfüllung widerspiegelte. Die fertig ausgehärteten Matrizen wurden mit einem Skalpell so zerschnitten, dass die beiden Hälften lückenlos zusammengefügt und nach Polymerisation des Reparaturkunststoffs einfach und drucklos wieder entfernt werden konnten. Die Höhe der Matrizen betrug genau 4 mm.

Die Komposite wurden in zwei jeweils 2 mm hohen Inkrementen aufgetragen, welche jeweils 20 Sekunden mit einer Lichtintensität von 1435 mW/cm^2 im High Power-Programm mit minimal möglichem Abstand zur Füllungsoberfläche polymerisiert wurden (Bluephase, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein, Modus HIP).

- a) Die erste Hälfte der Reparaturfüllungen wurde konventionell unter Verwendung von hochvergüteten dentalen Handinstrumenten aus Edelstahl geschichtet. Es erfolgte nach jedem Füllvorgang eine gründliche Reinigung der Instrumente, um eine Kontamination des nachfolgenden Werkstoffs zu vermeiden. Das fließfähige Komposit Grandioso Flow wurde mithilfe der zugehörigen Applikationsspritze direkt eingebracht. Die Kanüle wurde nach jeder Benutzung ausgewechselt und durch eine unbenutzte ersetzt.
- b) Für die zweite Hälfte der Reparaturfüllungen wurde das Komposit direkt mit dem SonicFill-Handstück (KaVo, Biberach, Deutschland) auf Stufe 1 eingebracht. Da nur die eigens dafür hergestellten SonicFill-Kartuschen mit dem Handstück kompatibel sind, wurde für das Einbringen der anderen vier Komposite die dafür notwendige Anzahl von Kartuschen gründlich geleert und gereinigt. Dafür war es nötig, durch Abschrauben der Böden die SonicFill-Kartuschen vorsichtig auseinander zu nehmen. Anschließend konnte der Kunststoff in einem Stück entnommen werden. Die nun leeren Behälter wurden gründlich manuell gesäubert, um eventuelle Rückstände des SonicFill-Komposits restlos zu entfernen und mithilfe von Edelstahlinstrumenten mit dem gewünschten Material neu befüllt. Schließlich erfolgte die erneute Zusammensetzung der Kartuschen. Die Kartuschen wurden sorgfältig mit dem Namen des enthaltenen Komposits beschriftet und ausschließlich mit dem entsprechenden

Material nachbefüllt. Nun konnte die Applikation wie mit dem SonicFill-Komposit unter Schallaktivierung durchgeführt werden.

Es wurde somit jedes Material mit sich selbst und jedem der anderen sowohl auf konventionellem Weg als auch unter Schallaktivierung repariert.

Abschließend erfolgte erneut eine Alterung der nun reparierten Füllung über zwei Monate in bidestilliertem Wasser bei 37 °C.

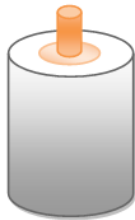


Abbildung 2: Reparaturzylinder auf Substratfüllung

4.2.2 Positive Kontrollgruppe

Für die Evaluierung der Inkrementellen Verbundfestigkeit wurde analog der anderen Gruppen die Kavität im Kunststoffzylinder gefüllt. Danach wurde sofort eine Matrize mit den gleichen Maßen, wie sie bei den Reparaturfüllungen verwendet wurden, aufgesetzt und in zwei jeweils 2 mm hohen Schichten gefüllt, die auch jeweils 20 Sekunden lichtgehärtet wurden. Das Komposit SonicFill wurde mit dem dazugehörigen Handstück auf Stufe 1 appliziert, während die anderen Komposite konventionell mit Handinstrumenten beziehungsweise mit Applikationsspritze (Grandioso Flow) eingebracht wurden. Danach wurden die Proben einmalig über zwei Monate in bidestilliertem Wasser bei 37 °C gelagert.

Tabelle 4: Übersicht über die Kombinationen von Materialien und Reparaturmethoden

Material Substrat Material Reparatur	Grandioso Flow	Clearfil Majesty Posterior	Clearfil Majesty Esthetic	Estelite Sigma Quick	SonicFill
Grandioso Flow	H, S, K	H, S	H, S	H, S	H, S
Clearfil M. Posterior	H, S	H, S, K	H, S	H, S	H, S
Clearfil M. Esthetic	H, S	H, S	H, S, K	H, S	H, S
Estelite Sigma Quick	H, S	H, S	H, S	H, S, K	H, S
SonicFill	H, S	H, S	H, S	H, S	H, S, K(schallaktiviert)

H: Reparaturfüllung mit Handinstrumenten gelegt

S: Reparaturfüllung unter Schallaktivierung des Reparaturkomposits gelegt

K: Positive Kontrollgruppe

Es ergeben sich 55 Gruppen mit jeweils 15 Proben.

4.2.3 Messung der Scherhaftfestigkeit

Nach Ablauf der künstlichen Alterung wurde ein Makro-Scherversuch mit einer Universalprüfmaschine (MCE 2000ST, Quicktest Prüfpartner GmbH, Langenfeld, Deutschland) durchgeführt, um die Verbundfestigkeit zwischen den verschiedenen Materialien und bei Anwendung des SonicFill-Handstücks (Stufe 1) beziehungsweise ohne Hilfsmittel zu evaluieren.

Dafür wurden die Proben beziehungsweise die Prüfkörper einzeln in der Einspannvorrichtung befestigt. Dann wurde der Scherstempel mit integrierter Kraftmessung mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 mm/min gegen den Prüfkörper gefahren. Bis zum Erreichen der Bruchlast stieg somit die Kraft kontinuierlich an, bis es zur Abscherung des aufgetragenen Zylinders von der Substratfüllung kam.

Die gemessenen Scherkräfte wurden in der Maßeinheit N in einer Tabelle aufgezeichnet und die dazugehörige Scherhaftfestigkeit errechnet. Unter Haftfestigkeit versteht man die Kraft pro Flächeneinheit, die erforderlich ist, um den Bruch einer Klebeverbindung hervorzurufen, der in oder nahe der Verbundoberfläche auftritt (Oilo 1993). Sie wird in Megapascal (MPa) angegeben und ergibt sich aus der Bruchlast pro Fläche. Für letztere wurde der Durchmesser der Reparaturfläche an zwei Stellen gemessen und so die Klebefläche ermittelt.

Die zugrunde liegende Formel lautet: $\delta_s = F/A$, mit δ_s = Scherhaftfestigkeit in MPa, F = Scherkraft in N und A = Reparaturfläche in mm^2 .

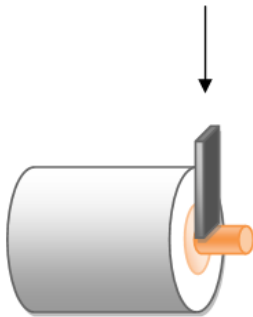


Abbildung 3: Durchführung des Scherversuchs (Abwärtsbewegung der Transverse)



Abbildung 4: Universalprüfmaschine

4.2.4 Bruchmodusanalyse

Es wurde ebenfalls untersucht, ob es sich um adhäsive, kohäsive oder gemischt adhäsiv-kohäsive Frakturen handelt.

Dazu kamen ein Stereomikroskop (Axioskop 2Mat, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) und bei ausgewählten Proben ein Rasterelektronenmikroskop (Supra 55 VP, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) bei unterschiedlicher Vergrößerung zum Einsatz.

Bei Betrachtung der Bruchflächen erfolgte folgende Differenzierung der Bruchmodi:

Kohäsive Fraktur – innerhalb einer Kompositschicht

Adhäsive Fraktur – innerhalb der Adhäsivschicht

Gemischte Fraktur – adhäsive und kohäsive Fraktur

Der prozentuale Anteil der Frakturmodi in den einzelnen Versuchsgruppen wurde statistisch erfasst.

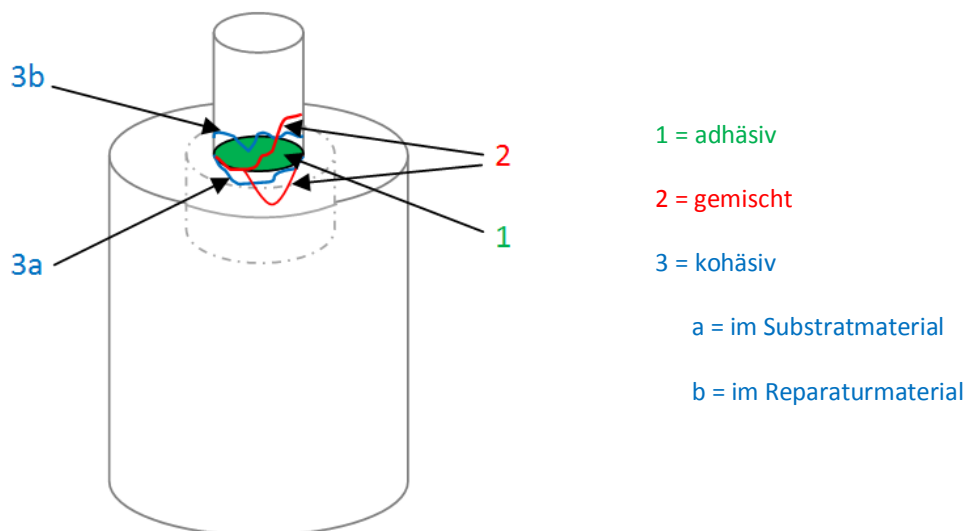


Abbildung 5: Mögliche Frakturverläufe und deren Klassifikationen

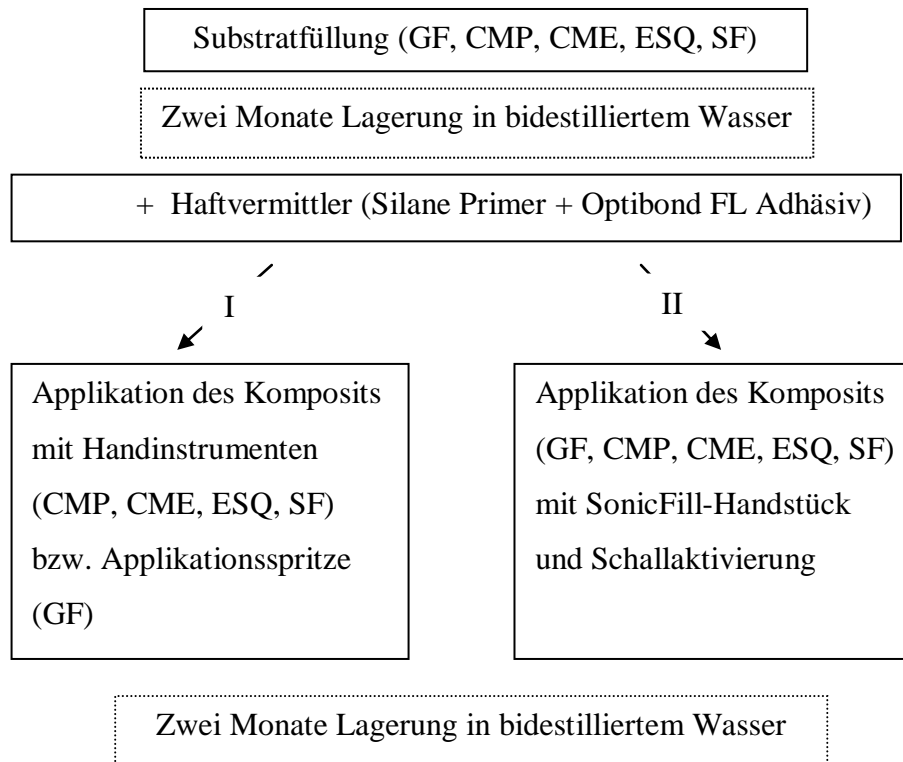
4.2.5 Analyse der Füllkörper

Unter dem Rasterelektronenmikroskop (Supra 55 VP, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) wurden bei unterschiedlichen Vergrößerungen Übersichtsbilder aufgenommen, die Rückschlüsse auf die Füllkörper der jeweiligen Komposite, also deren Verteilung, Größe und Form, ermöglichen. Dabei kam der Back-Scatter-Modus zum Einsatz. Zur Vorbereitung wurden dafür mithilfe einer Matrize aus jedem der fünf Restaurationsmaterialien Zylinder mit einem Durchmesser von 4 mm und einer Höhe von 2 mm angefertigt. Die Oberflächen wurden mit Siliziumkarbidpapier (Leco, St. Joseph, USA) absteigender Korngröße bis zu einer Körnung von 2000 grit plan und glatt geschliffen und mit Diamantspray (DP Spray P, 1 µm, Struers, Willich, Deutschland) poliert. Bis zur mikroskopischen Untersuchung wurden die Proben trocken und staubfrei gelagert.

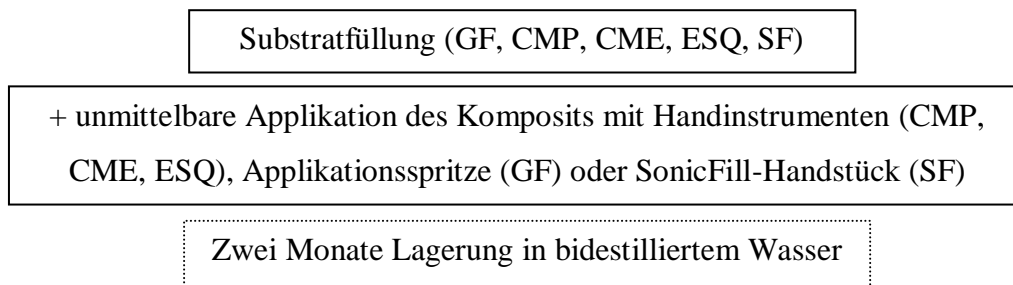
4.2.6 Versuchsaufbau

Es entstanden unter Einsatz der Haftvermittler Silane Primer und Optibond FL (Adhäsiv) folgende Kombinationen der als Substrat- und Reparaturmaterial verwendeten Komposite Grandioso Flow (F), Clearfil Majesty Posterior (P), Clearfil Majesty Esthetic (E), Estelite Sigma Quick (Q) und SonicFill (S):

a) Reparaturgruppen



b) Kontrollgruppen



Daraus ergeben sich 50 Reparaturgruppen und fünf Kontrollgruppen mit (n = 15).

Tabelle 5: Übersicht der untersuchten Kombinationen

	GF	CMP	CME	ESQ	SF
Kontrollgruppe	x	x	x	x	x
GF (Reparatur konventionell)	x	x	x	x	x
CMP (Reparatur konventionell)	x	x	x	x	x
CME (Reparatur konventionell)	x	x	x	x	x
ESQ (Reparatur konventionell)	x	x	x	x	x
SF (Reparatur konventionell)	x	x	x	x	x
GF (Reparatur mit SonicFill-Handstück)	x	x	x	x	x
CMP (Reparatur mit SonicFill-Handstück)	x	x	x	x	x
CME (Reparatur mit SonicFill-Handstück)	x	x	x	x	x
ESQ (Reparatur mit SonicFill-Handstück)	x	x	x	x	x
SF (Reparatur mit SonicFill-Handstück)	x	x	x	x	x

GF = Grandioso Flow; CMP = Clearfil Majesty Posterior; CME = Clearfil Majesty Esthetic; ESQ = Estelite Sigma Quick; SF = SonicFill

Anschließend wurden die Proben im Scherversuch bis zum Bruch belastet.

4.2.7 Statistische Auswertung

Für die statistische Auswertung der erhobenen Daten wurde das Programm SPSS für Windows, Version 20.0, herangezogen. Neben einem t-Test erfolgte eine Varianzanalyse durch multi- und univariate ANOVA, als Post-hoc-Test diente der Tukey-HSD-Test. Eine Weibull-Analyse wurde zur Evaluierung des Weibull-Parameters m , also der Zuverlässigkeit der Reparaturkombinationen, durchgeführt. Der lineare Zusammenhang zwischen verschiedenen Faktoren wurde durch den Korrelationskoeffizienten nach Pearson wiedergegeben. Die Analysen des Füllkörperanteils der Komposite und des Bruchmodus (adhäsiv, gemischt, kohäsiv, siehe Abbildung 5) erfolgten deskriptiv. Zur Darstellung der Haupteffekte wurde ein Allgemeines Lineares Modell verwendet. Abhängige Parameter stellten Scherhaftfestigkeit und Weibull-Parameter m dar. Substratmaterial, Reparaturmaterial, Schalleinsatz und deren Kombinationen fungierten als unabhängige

Parameter. Die Effektstärke wurde durch das partielle Eta-Quadrat η^2_p angegeben. Das Signifikanzniveau lag bei $p < 0,05$.

5. Ergebnisse

Es erfolgten ein t-Test zur Untersuchung des Einflusses der Schallaktivierung des Reparaturmaterials auf die Scherhaftfestigkeit und eine Varianzanalyse mittels ANOVA. Dabei wurde untersucht, inwiefern die Mittelwerte der Zielvariablen (Haftfestigkeit) sich in Zusammenhang mit verschiedenen unabhängigen Variablen und Faktorstufen unterscheiden. Als Post-Hoc-Test wurde der Tukey-HSD-Test durchgeführt. Er gibt Auskunft über Art und Größe der entdeckten Unterschiede. Das statistische Signifikanzniveau lag bei $p < 0,05$. Die Effektgröße partielles Eta-Quadrat η^2 gibt den Anteil der aufgeklärten Varianz an der Gesamtvarianz der Stichprobenebene an. Er wird über die Quadratsumme des systematischen Effekts, geteilt durch die gesamte Quadratsumme, berechnet. Mithilfe der Weibull-Analyse konnten Aussagen über die Zuverlässigkeit der ermittelten Ergebnisse gemacht werden. Der Korrelationskoeffizient nach Pearson gibt den Grad eines linearen Zusammenhangs zwischen zwei Merkmalen an, falls ein solcher vorhanden ist.

Die folgende Tabelle zeigt die Haftfestigkeitsmittelwerte in Megapascal (MPa), die Standardabweichung der Haftfestigkeit (in Klammern) bezogen auf Substratmaterial (in Spalten) und Füllmaterial (in Zeilen) und den prozentualen Anteil der Haftfestigkeitsmittelwerte der Substrat- und Reparaturmaterialien an den kohäsiven Festigkeitswerten der zugehörigen positiven Kontrollgruppe.

Tabelle 6: Scherhaftfestigkeitsmittelwerte und Standardabweichungen in MPa

Substratmaterial		GF	CMP	CME	ESQ	SF	Reparaturmaterial	
							Mittelwert	% d. inkrem. Werts
Kontrollgruppe		35,8 (9,4)	38,2 (6,6)	30,9 (5,9)	29,1 (2,3)	45,3 (6,0)		
Reparaturmaterial								
GF (konv.)		22,0 (7,6)	17,9 (7,5)	22,0 (6,7)	17,9 (7,5)	26,4 (8,1)	21,2	59,3
CMP (konv.)		26,7 (7,5)	27,7 (6,9)	28,1 (8,0)	17,8 (6,2)	24,3 (9,7)	24,9	65,2
CME (konv.)		16,8 (5,8)	14,8 (4,0)	21,6 (5,4)	10,3 (4,8)	18,4 (6,2)	16,4	53,0
ESQ (konv.)		14,1 (6,0)	13,8 (3,2)	20,2 (5,1)	12,3 (4,9)	16,7 (7,2)	15,4	52,9
SF (konv.)		21,9 (6,1)	19,4 (4,6)	23,1 (6,9)	18,4 (3,4)	20,9 (4,7)	20,7	45,8
Substratm. ohne KG	Mittelwerte	20,3	18,7	23,0	15,3	21,3		
	% d. inkrem. Werts	56,6	49,0	74,4	52,6	47,1		
GF (Schall)		15,4 (6,9)	14,6 (5,2)	19,4 (6,4)	15,1 (4,2)	19,3 (7,4)	16,7	46,7
CMP (Schall)		26,3 (7,4)	23,7 (5,1)	23,1 (5,4)	19,7 (6,7)	26,7 (8,2)	23,9	62,6
CME (Schall)		16,1 (4,9)	14,4 (5,4)	17,8 (4,4)	11,7 (4,6)	20,0 (7,1)	16,0	51,7
ESQ (Schall)		15,0 (5,2)	14,7 (4,0)	17,8 (5,5)	12,1 (2,9)	19,1 (4,8)	15,7	54,1
SF (Schall)		22,9 (7,5)	14,7 (2,9)	18,3 (7,6)	18,4 (6,2)	21,0 (7,9)	19,1	42,1
Substratm. ohne KG	Mittelwerte	19,1	16,4	19,3	15,4	21,2		
	% d. inkrem. Werts	53,4	43,0	62,4	52,8	46,8		

KG = Kontrollgruppe; Substratmat. = Substratmaterial; GF = Grandioso Flow; CMP = Clearfil Majesty Posterior; CME = Clearfil Majesty Esthetic; ESQ = Estelite Sigma Quick; SF = SonicFill; konv. = Reparatur konventionell mit Handinstrumenten durchgeführt; Schall = Reparatur mit SonicFill-Handstück auf Stufe 1 durchgeführt; % d. inkrem. Werts = Prozent des inkrementellen Mittelwerts (prozentualer Anteil des gemessenen Scherhaftfestigkeitsmittelwerts eines Materials am evaluierten Mittelwert der Inkrementellen Verbundfestigkeit dieses Materials)

Wie in Tabelle 6 abzulesen, erzielte unter den positiven Kontrollgruppen SonicFill mit 45,3 MPa den höchsten Haftfestigkeitsmittelwert. Darauf folgen Clearfil Majesty Posterior mit 38,2 MPa, Grandioso Flow mit 35,8 MPa, Clearfil Majesty Esthetic mit 30,9 MPa und schließlich Estelite Sigma Quick mit 29,1 MPa.

Aus der Tabelle wird ebenfalls ersichtlich, dass der höchste Mittelwert für die Verbundhaftfestigkeit mit der Kombination Clearfil Majesty Esthetic als Substratmaterial repariert mit Clearfil Majesty Posterior ohne Schallaktivierung erreicht wurde (28,1 MPa). Den zweithöchsten Mittelwert zeigte die Reparatur von Clearfil Majesty Posterior mit sich selbst ohne Einsatz von Schall (27,7 MPa), gefolgt von der schallaktivierten Reparatur von SonicFill durch Clearfil Majesty Posterior und der konventionellen Reparatur von Grandioso Flow mit Clearfil Majesty Posterior (beide 26,7 MPa). Die niedrigsten Haftfestigkeits-Mittelwerte ergaben sich bei der Reparatur von Estelite Sigma Quick mit Clearfil Majesty Esthetic auf herkömmliche Art (10,3 MPa) und unter Schallaktivierung (11,7 MPa) sowie bei der Reparatur von Estelite Sigma Quick mit sich selbst sowohl schallaktiviert (12,1 MPa) als auch konventionell (12,3 MPa).

Insgesamt erwies sich Clearfil Majesty Posterior als das Reparaturmaterial, das die höchsten Mittelwerte für die Scherhaftfestigkeit erzielte. Die schallaktivierte Reparatur mit Clearfil Majesty Posterior zeigte im Mittel eine Haftfestigkeit von 23,9 MPa, die ohne Schall auf herkömmliche Weise durchgeführte Reparatur sogar 24,9 MPa. Die niedrigsten Mittelwerte ergaben sich bei Reparaturen mit Estelite Sigma Quick. Hier erzielte die schallaktivierte Reparatur einen Mittelwert von 15,7 MPa, die konventionelle Durchführung nur 15,4 MPa. Das beste Substratmaterial nach Haftfestigkeitsmittelwerten war SonicFill mit 21,3 MPa, gefolgt von Clearfil Majesty Esthetic (21,1 MPa), Grandioso Flow (19,7 MPa) und Clearfil Majesty Posterior (17,6 MPa). Auch in der Gruppe der Substratmaterialien schnitt Estelite Sigma Quick mit einem Mittelwert von 15,4 MPa am schlechtesten ab. Aufgeschlüsselt nach schallaktivierter und konventioneller Reparatur zeigte sich Clearfil Majesty Esthetic als bestes Substratmaterial, wenn es auf herkömmliche Weise repariert wurde (23,0 MPa). Darauf folgt SonicFill als Substratmaterial konventionell (21,3 MPa) und schallaktiviert repariert (21,2 MPa). Den niedrigsten Mittelwert ergab die konventionelle Reparatur von Estelite Sigma

Quick (15,3 MPa). Neben der Auswertung der absoluten Festigkeitsmittelwerte ist allerdings auch deren Verhältnis zu den Mittelwerten der Inkrementellen Verbundfestigkeit des jeweiligen Materials zu beachten. So zeigt sich zum Beispiel, dass Estelite Sigma Quick zwar in absoluten Zahlen die niedrigsten Mittelwerte aufweist, allerdings als Reparaturmaterial 52,9% (konventionell) und 54,1% (schallaktiviert) des Kontrollgruppen-Mittelwerts erreichte. Bei der konventionellen Reparatur lag Estelite Sigma Quick also in relativen Zahlen über dem Ergebnis von SonicFill (45,8% des kohäsiven Werts) und bei der schallaktivierten Reparatur belegte es hinter Clearfil Majesty Posterior (62,6% des kohäsiven Werts) sogar den zweiten Platz. Als Substratmaterial erwies sich Estelite Sigma Quick in Relation zur Kontrollgruppe als am drittbesten. Clearfil Majesty Posterior zeigte sich auch im Vergleich zu den inkrementellen Werten der Kontrollgruppe als erfolgreichstes Reparaturmaterial. Das beste Substratmaterial in relativen Zahlen war jedoch Clearfil Majesty Esthetic mit 68,4% des Mittelwerts der Kontrollgruppe. SonicFill als Substratmaterial, welches in absoluten Zahlen den höchsten Mittelwert ergab, erreichte mit 46,9% relativ nur den vorletzten Platz, knapp gefolgt von Clearfil Majesty Posterior, das mit 46,0% das schlechteste Substratmaterial im Vergleich zu den inkrementellen Werten war.

Nur Estelite Sigma Quick als Reparaturmaterial zeigte höhere Haftfestigkeitsmittelwerte bei der Reparatur unter Einsatz von Schall (15,7 MPa versus 15,4 MPa) im Vergleich zum konventionellen Vorgehen.

Die höchsten einzeln gemessenen maximalen Festigkeitswerte unter allen 50 Kombinationsgruppen ergaben sich bei der konventionellen Reparatur von SonicFill mit Clearfil Majesty Posterior (43,8 MPa), der konventionellen Reparatur von Grandioso Flow mit sich selbst (42,4 MPa) und der schallaktivierten Reparatur von SonicFill mit Grandioso Flow (42,0 MPa).

Tabelle 7: Haftfestigkeitsmittelwerte der Kontrollgruppen im Vergleich zu den Festigkeitsmittelwerten der homotypen Reparaturen (konventionell und schallaktiviert) in MPa

Material	Kontrollgruppe	Konventionelle Reparatur		Schallaktivierte Reparatur	
	Inkrementeller Mittelwert	Mittelwert	Anteil am inkrem. Wert	Mittelwert	Anteil am inkrem. Wert
GF	35,8	22,0	61,6 %	15,4	42,9 %
CMP	38,2	27,7	72,5 %	23,7	62,1 %
CME	30,9	21,6	70,0 %	17,8	57,7 %
ESQ	29,1	12,3	42,1 %	12,1	41,6 %
SF	45,3	20,9	46,1 %	21,0	46,4 %

inkrem. Wert = inkrementellen Mittelwert (Mittelwert der Inkrementellen Verbundfestigkeit); GF = Grandioso Flow; CMP = Clearfil Majesty Posterior; CME = Clearfil Majesty Esthetic; ESQ = Estelite Sigma Quick; SF = SonicFill

Beim Vergleich der Haftfestigkeitsmittelwerte der homotypen Reparaturen mit denen der positiven Kontrollgruppen wurde deutlich, dass die Reparatur von Clearfil Majesty Posterior mit sich selbst unter Einsatz von Handinstrumenten mit durchschnittlich 72,5% des Mittelwerts der Inkrementellen Verbundfestigkeit am besten abschnitt. Am zweitnächsten an den Mittelwert der Kontrollgruppe kam die konventionelle Reparatur von Clearfil Majesty Esthetic mit sich selbst heran (70,0%). Die schallaktivierte Reparatur von Clearfil Majesty Posterior mit sich selbst erreichte im Mittel 62,1% des inkrementellen Mittelwerts und schnitt damit am drittbesten ab. Estelite Sigma Quick erwies sich sowohl bei herkömmlicher (42,1%) als auch bei schallaktivierter (41,6%) homotyper Reparatur als Werkstoff mit den niedrigsten Mittelwerten im Vergleich zu den Ergebnissen der Messung der Inkrementellen Verbundfestigkeit.

Die folgenden Grafiken geben einen Überblick über die Verteilung der kohäsiven Werte der Kontrollgruppen und der gemessenen Festigkeitswerte aller Kombinationen bezogen auf die Substratmaterialien. Es wird ersichtlich, dass Clearfil Majesty Posterior bei allen Substratmaterialien als Reparaturmaterial die höchsten Haftfestigkeitswerte erreichte. Es zeigte sich bei diesem Material allerdings eine sehr hohe Spannbreite an Messwerten. Estelite

Sigma Quick erzielte als Reparaturmaterial bei allen Substraten die kleinsten Messwerte, außer wenn es selbst als Füllungsmaterial diente. In letzterem Fall schnitt die schallaktivierte Reparatur mit Clearfil Majesty Esthetic am schlechtesten ab.

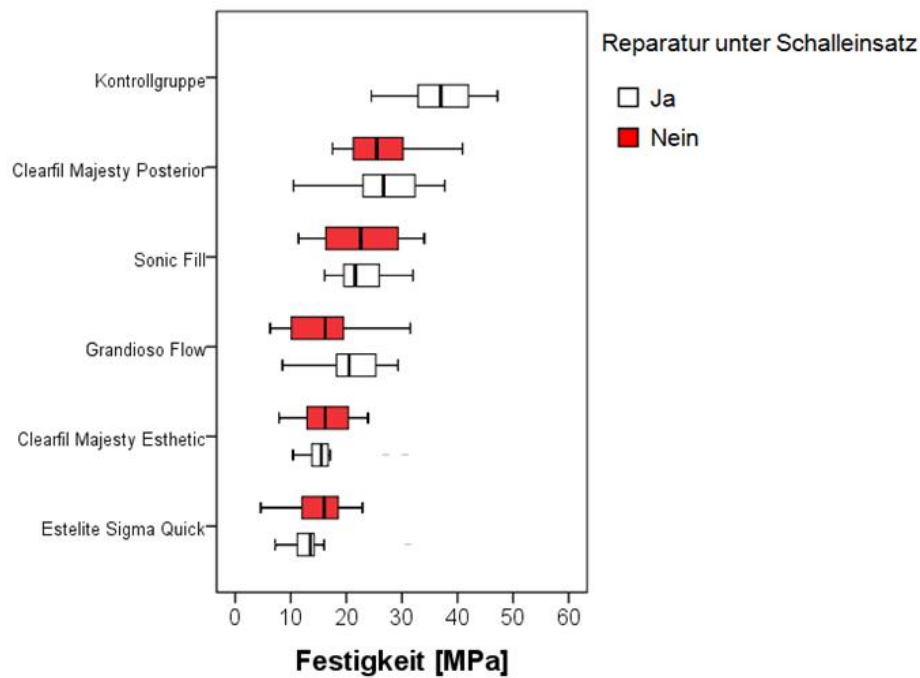


Abbildung 6: Grandioso Flow als Substratmaterial: Verteilung der gemessenen Haftfestigkeitswerte bei verschiedenen Reparaturmaterialien und –methoden

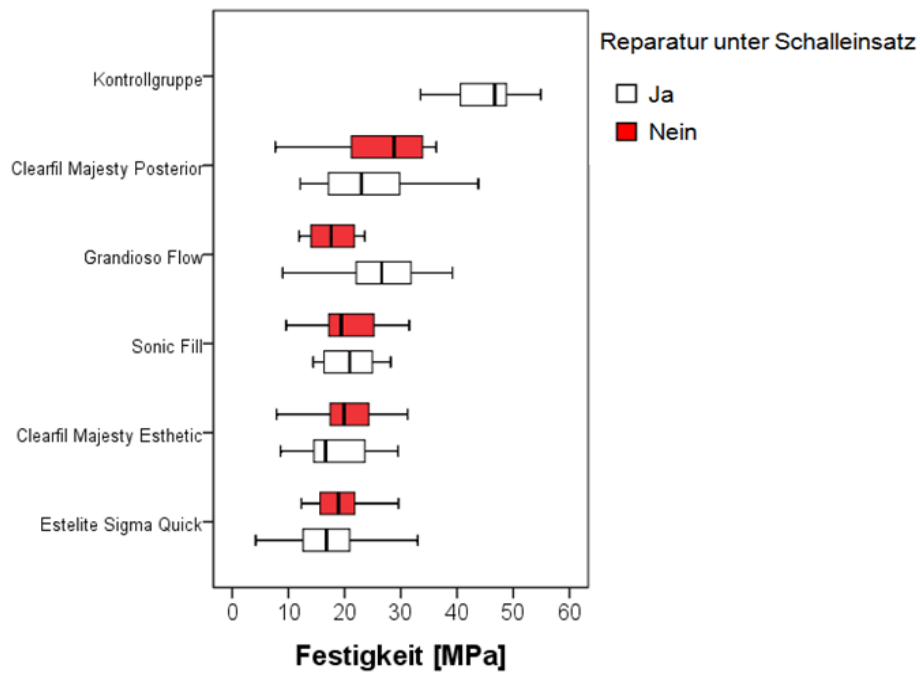


Abbildung 7: SonicFill als Substratmaterial: Verteilung der gemessenen Haftfestigkeitswerte bei verschiedenen Reparaturmaterialien und –methoden

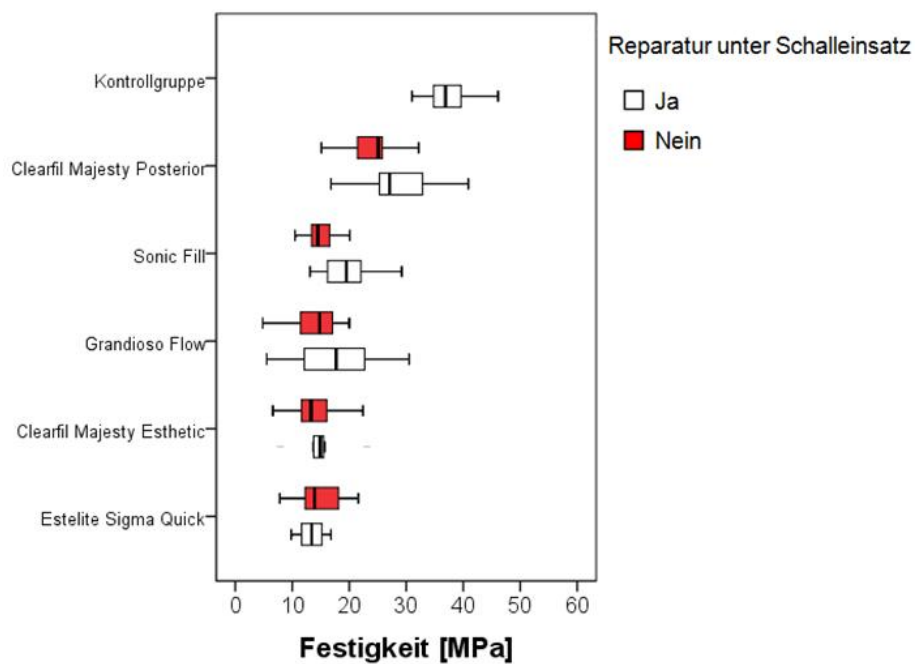


Abbildung 8: Clearfil Majesty Posterior als Substratmaterial: Verteilung der gemessenen Haftfestigkeitswerte bei verschiedenen Reparaturmaterialien und –methoden

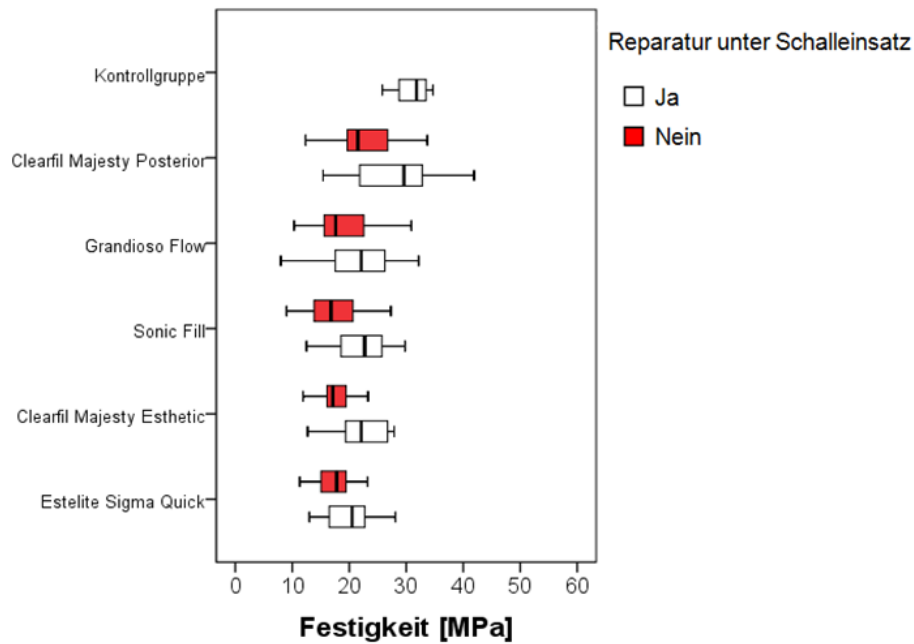


Abbildung 9: Clearfil Majesty Esthetic als Substratmaterial: Verteilung der gemessenen Haftfestigkeitswerte bei verschiedenen Reparaturmaterialien und –methoden

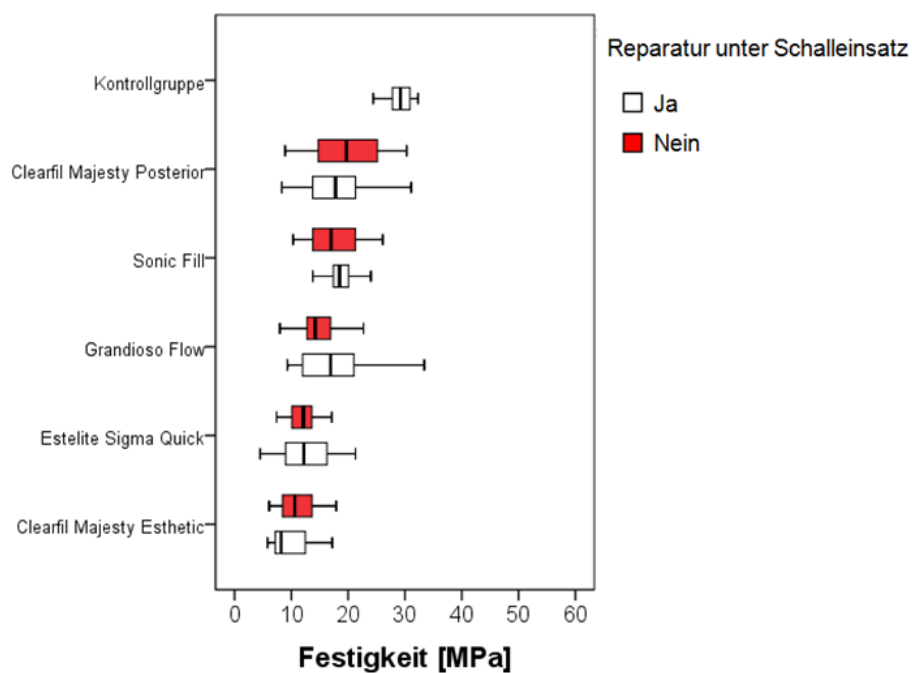


Abbildung 10: Estelite Sigma Quick als Substratmaterial: Verteilung der gemessenen Haftfestigkeitswerte bei verschiedenen Reparaturmaterialien und –methoden

Bei der Auswertung der Verbundfestigkeit konnten je nach Faktorstufe und Zielvariable drei bis fünf homogene Subgruppen identifiziert werden. Faktorstufen derselben Subgruppe unterscheiden sich hinsichtlich ihrer mittleren Festigkeit nicht signifikant voneinander.

Die Kontrollgruppe beinhaltet die unmittelbar nach Anfertigung der Substratfüllung mit demselben Material „reparierten“ Proben und repräsentiert die inkrementellen Vergleichswerte.

Alle homogenen Subgruppen können den unten stehenden Tabellen entnommen werden.

Da, wie später im Text demonstriert, sowohl das Substrat- als auch das Reparaturmaterial einen signifikanten Einfluss auf die Haftfestigkeit ausüben, werden diese für die Darstellung der homogenen Subgruppen in getrennten Tabellen dargestellt.

Es wird unter anderem deutlich, dass sich hinsichtlich des Substrat- als auch des Reparaturmaterials die meisten Kontrollgruppen signifikant von den „reparierten“ Gruppen unterscheiden. Einzige Ausnahme bildet das Substrat Clearfil Majesty Esthetic bei der konventionellen Reparatur mit Clearfil Majesty Posterior. Diese Kombination befindet sich bezüglich des Substratmaterials in einer homogenen Subgruppe mit dem Scherhaftfestigkeits-Mittelwert der Clearfil Majesty Esthetic – Kontrollgruppe.

Tabelle 8: Haftfestigkeitsmittelwerte und Standardabweichungen in MPa und homogene Subgruppen, bezogen auf das Substratmaterial (ANOVA)

Die Scherhaftfestigkeitswerte werden als Funktion des Substratmaterials dargestellt. Homogene Untergruppen können spaltenweise abgelesen werden.

Reparaturmaterial	Substratmaterial				
	GF	CMP	CME	ESQ	SF
GF (Rep. konv.)	22,0 ^{abc} (7,6)	17,9 ^{AB} (7,5)	22,0 ^{ab} (6,7)	17,9 ^{CD} (7,5)	26,4 ^a (8,1)
GF (Rep. Schall)	15,4 ^{ab} (6,9)	14,6 ^A (5,2)	19,4 ^a (6,4)	15,1 ^{ABC} (4,2)	19,3 ^{ab} (7,4)
CMP (Rep. konv.)	26,7 ^c (7,5)	27,7 ^C (6,9)	28,1 ^{bc} (8,0)	17,8 ^{BCD} (6,2)	24,3 ^{ab} (9,7)
CMP (Rep. Schall)	26,3 ^c (7,4)	23,7 ^{BC} (5,1)	23,1 ^{ab} (5,4)	19,7 ^D (6,7)	26,7 ^b (8,2)
CME (Rep. konv.)	16,8 ^{ab} (5,8)	14,8 ^A (4,0)	21,6 ^{ab} (5,4)	10,3 ^A (4,8)	18,4 ^{ab} (6,2)
CME (Rep. Schall)	16,1 ^{ab} (4,9)	14,4 ^A (5,4)	17,8 ^a (4,4)	11,7 ^{AB} (4,6)	20,0 ^{ab} (7,1)
ESQ (Rep. konv.)	14,1 ^a (6,0)	13,8 ^A (3,2)	20,2 ^a (5,1)	12,3 ^{ABC} (4,9)	16,7 ^a (7,2)
ESQ (Rep. Schall)	15,0 ^{ab} (5,2)	14,7 ^A (4,0)	17,8 ^a (5,5)	12,1 ^{ABC} (2,9)	19,1 ^{ab} (4,8)
SF (Rep. konv.)	21,9 ^{abc} (6,1)	19,4 ^{AB} (4,6)	23,1 ^{ab} (6,9)	18,4 ^D (3,4)	20,9 ^{ab} (4,7)
SF (Rep. Schall)	22,9 ^{bc} (7,5)	14,7 ^A (2,9)	18,3 ^a (7,6)	18,4 ^D (6,2)	21,0 ^{ab} (7,9)
Kontrollgruppe	35,8 ^d (9,4)	38,2 ^D (6,6)	30,9 ^c (5,9)	29,1 ^E (2,3)	45,3 ^c (6,0)

Subgruppen, die sich nicht signifikant unterscheiden, sind mit denselben hochgestellten Ziffern ausgewiesen.

GF = Grandioso Flow; CMP = Clearfil Majesty Posterior; CME = Clearfil Majesty Esthetic; ESQ = Estelite Sigma Quick; SF = SonicFill; Rep. konv. = Reparatur konventionell mit Handinstrumenten durchgeführt; Rep. Schall = Reparatur mit SonicFill-Handstück auf Stufe 1 durchgeführt

Tabelle 9: Haftfestigkeitsmittelwerte und Standardabweichungen in MPa und homogene Subgruppen, bezogen auf das Reparaturmaterial (ANOVA)

Die Scherhaftfestigkeitswerte werden als Funktion des Reparaturmaterials dargestellt. Homogene Untergruppen können zeilenweise abgelesen werden.

Reparatur- material	Substratmaterial					KG
	GF	CMP	CME	ESQ	SF	
GF (konv.)	22,0 _{ab} (7,6)	17,9 _a (7,5)	22,0 _{ab} (6,7)	17,9 _{ab} (7,5)	26,4 _b (8,1)	35,8 _c (9,4)
GF (Schall)	15,4 _a (6,9)	14,6 _a (5,2)	19,4 _{ab} (6,4)	15,1 _a (4,2)	19,3 _{ab} (7,4)	
CMP (konv.)	26,7 _B (7,5)	27,7 _B (6,9)	28,1 _B (8,0)	17,8 _A (6,2)	24,3 _{AB} (9,7)	38,2 _C (6,6)
CMP (Schall)	26,3 _{AB} (7,4)	23,7 _{AB} (5,1)	23,1 _{AB} (5,4)	19,7 _{AB} (6,7)	26,7 _B (8,2)	
CME (konv.)	16,8 _{bcd} (5,8)	14,8 _{abc} (4,0)	21,6 _d (5,4)	10,3 _a (4,8)	18,4 _{cd} (6,2)	30,9 _e (5,9)
CME (Schall)	16,1 _{abcd} (4,9)	14,4 _{abc} (5,4)	17,8 _{bcd} (4,4)	11,7 _{ab} (4,6)	20,0 _{cd} (7,1)	
ESQ (konv.)	14,1 _{AB} (6,0)	13,8 _{AB} (3,2)	20,2 _C (5,1)	12,3 _A (4,9)	16,7 _{ABC} (7,2)	29,1 _D (2,3)
ESQ (Schall)	15,0 _{ABC} (5,2)	14,7 _{ABC} (4,0)	17,8 _{ABC} (5,5)	12,1 _A (2,9)	19,1 _{BC} (4,8)	
SF (konv.)	21,9 _{ab} (6,1)	19,4 _{ab} (4,6)	23,1 _b (6,9)	18,4 _{ab} (3,4)	20,9 _{ab} (4,7)	45,3 _c (6,0)
SF (Schall)	22,9 _b (7,5)	14,7 _a (2,9)	18,3 _{ab} (7,6)	18,4 _{ab} (6,2)	21,0 _{ab} (7,9)	

Subgruppen, die sich nicht signifikant unterscheiden, sind mit denselben tiefgestellten Ziffern ausgewiesen.

KG = Kontrollgruppe; GF = Grandioso Flow; CMP = Clearfil Majesty Posterior; CME = Clearfil Majesty Esthetic; ESQ = Estelite Sigma Quick; SF = SonicFill; konv. = Reparatur konventionell mit Handinstrumenten durchgeführt; Schall = Reparatur mit SonicFill-Handstück auf Stufe 1 durchgeführt

Beim Vergleich der homogenen Subgruppen innerhalb der Kontrollgruppen wird außerdem ersichtlich, dass sich SonicFill mit im Mittel 45,3 MPa bezüglich der erreichten kohäsiven Festigkeitswerte signifikant von den anderen vier Materialien unterscheidet. Grandioso Flow (35,8 MPa) unterscheidet sich hinsichtlich der mittleren Haftfestigkeit signifikant von SonicFill und Estelite Sigma Quick, während Estelite Sigma Quick (29,1 MPa) sich außer von SonicFill und Grandioso Flow auch signifikant von Clearfil Majesty Posterior unterscheidet. Clearfil Majesty Posterior (38,2 MPa) befindet sich mit Grandioso Flow in einer homogenen Subgruppe, unterscheidet sich aber signifikant von den restlichen drei Kontrollgruppen. Clearfil Majesty Esthetic (30,9 MPa) zeigt einen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Festigkeitsmittelwerte von SonicFill und Clearfil Majesty Posterior. Das Signifikanzniveau lag auch hier bei 0,05.

Tabelle 10 zeigt die Zuverlässigkeit der gemessenen Werte. Je größer der Weibull-Parameter m, desto zuverlässiger sind die Materialien.

Tabelle 10: Überblick der durch Weibull-Statistik ermittelten m-Werte

Reparatur- material	Substratmaterial				
	GF	CMP	CME	ESQ	SF
GF (konv.)	1,02	0,76	1,07	0,76	1,03
GF (Schall)	0,69	0,95	1,04	1,23	0,88
CMP (konv.)	1,16	1,27	1,15	0,95	0,78
CMP (Schall)	1,11	1,56	1,47	0,94	0,97
CME (konv.)	0,92	1,26	1,23	0,65	0,99
CME (Schall)	1,06	0,93	1,39	0,82	0,84
ESQ (konv.)	0,85	1,41	1,25	0,84	0,73
ESQ (Schall)	0,84	1,25	1,14	1,41	1,32
SF (konv.)	1,08	1,34	1,17	1,90	1,39
SF (Schall)	0,99	1,77	0,81	1,00	0,90
Kontrollgruppe	1,13	1,95	1,73	4,39	2,63

GF = Grandioso Flow; CMP = Clearfil Majesty Posterior; CME = Clearfil Majesty Esthetic; ESQ = Estelite Sigma Quick; SF = SonicFill; konv. = Reparatur konventionell mit Handinstrumenten durchgeführt; Schall = Reparatur mit SonicFill-Handstück auf Stufe 1 durchgeführt

Die zuverlässigsten Haftfestigkeitswerte konnten mit den inkrementellen Proben der Kontrollgruppen erreicht werden. Als am zuverlässigsten erwies sich dabei das Material Estelite Sigma Quick, an letzter Stelle innerhalb der Kontrollgruppen rangierte Grandioso Flow (siehe Abbildung 11). Unter den „reparierten“ Gruppen präsentierte sich Estelite Sigma Quick als Substratfüllung, repariert mit SonicFill ohne Verwendung von Schall, als zuverlässigste Kombination. Die unzuverlässigste Kombination beinhaltete ebenfalls Estelite Sigma Quick als Substratmaterial, wenn es mit Clearfil Majesty Esthetic auf herkömmliche Weise repariert wurde. Wie aus Abbildung 12 ersichtlich wird, weist diese Kombination auch eine sehr hohe Streuung der Werte auf. Bei Betrachtung der einzelnen Komposite getrennt nach deren Einsatz als Substrat- oder Reparaturmaterial lässt sich erkennen, dass Clearfil Majesty Posterior das zuverlässigste Substratmaterial war, während sich SonicFill unter konventioneller Verarbeitung als zuverlässigstes Reparaturmaterial erwies. Als am unzuverlässigsten zeigten sich Grandioso Flow, knapp gefolgt von SonicFill, als

Substratmaterialien und Grandioso Flow als Reparaturmaterial. Letzteres erwies sich bei der Verarbeitung unter Schallaktivierung als etwas zuverlässiger als unter konventioneller Verarbeitung.

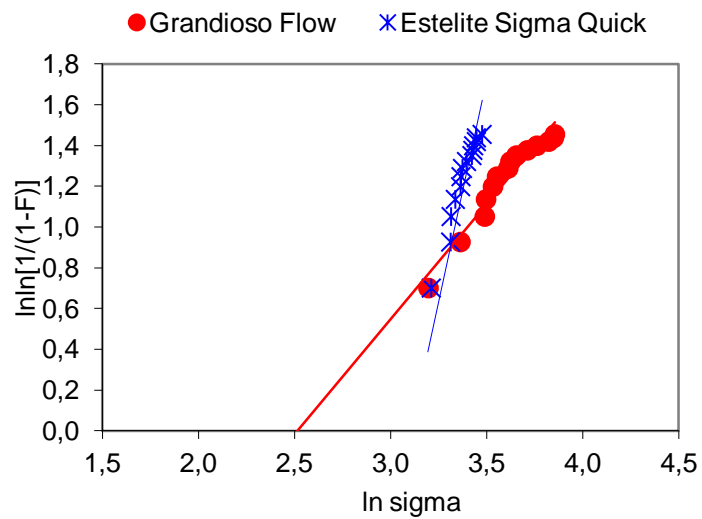


Abbildung 11: Weibull-Verteilung der positiven Kontrollgruppen von Grandioso Flow und Estelite Sigma Quick

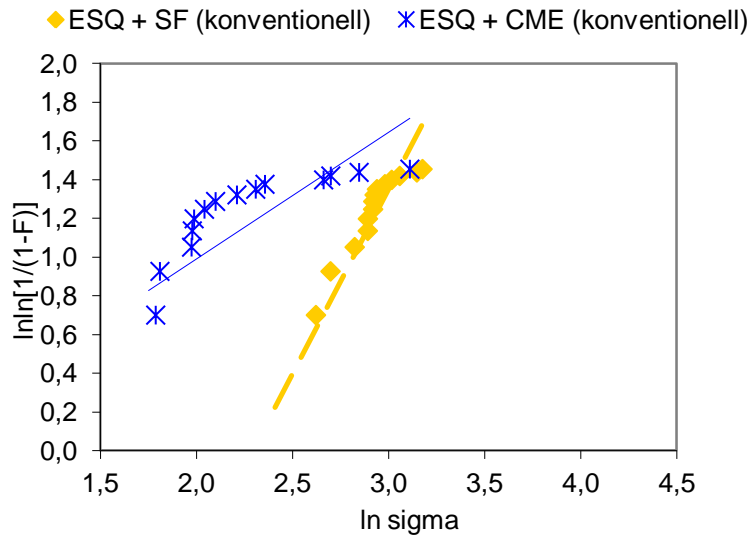
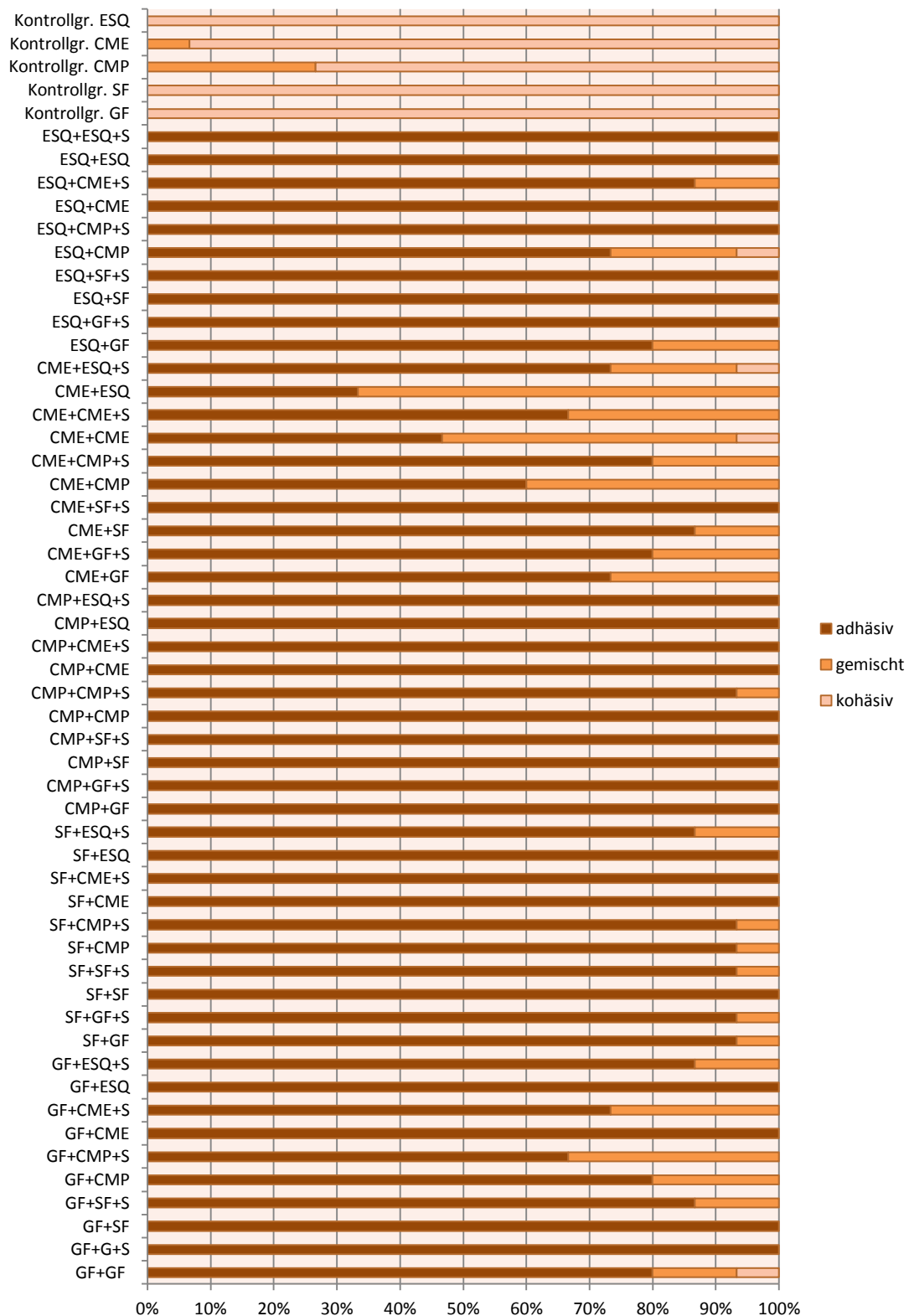


Abbildung 12: Weibull-Verteilung der Kombinationen von Estelite Sigma Quick (ESQ), konventionell repariert mit SonicFill (SF) (hohe Zuverlässigkeit) und Estelite Sigma Quick, konventionell repariert mit Clearfil Majesty Esthetic (CME) (geringe Zuverlässigkeit)

Die folgende Grafik (Abbildung 13) zeigt die Verteilung der verschiedenen Bruchmodi innerhalb der Gruppen.



Kontrollgr. = Kontrollgruppe; GF = Grandioso Flow; CMP = Clearfil Majesty Posterior; CME = Clearfil Majesty Esthetic; ESQ = Estelite Sigma Quick; SF = SonicFill; S = Reparatur mit SonicFill-Handstück auf Stufe 1 durchgeführt

Abbildung 13: Übersicht über die Häufigkeit der Bruchmodi innerhalb der Materialkombinationen

Insgesamt zeigten sich kohäsive oder gemischte Bruchmuster vor allem in Zusammenhang mit hohen Haftfestigkeitswerten. Die Kontrollgruppen, welche die höchsten Scherhaftfestigkeitswerte ergaben, wiesen mehrheitlich oder ausschließlich kohäsive Bruchmuster auf. Es kamen keine adhäsiven Frakturen innerhalb der Kontrollgruppen vor.

Bei sehr vielen der reparierten Proben ließen sich dagegen nur rein adhäsive Brüche beobachten. Kombinationen, die teilweise zu kohäsiven Frakturverläufen führten, sind Estelite Sigma Quick, konventionell repariert mit Clearfil Majesty Posterior (ESQ+CMF), also die Kombination mit dem höchsten Haftfestigkeitsmittelwert, Clearfil Majesty Esthetic, schallaktiviert repariert mit Estelite Sigma Quick (CME+ESQ+S) oder konventionell repariert mit sich selbst (CME+CME) und die konventionelle Reparatur von Grandioso Flow mit sich selbst (GF+GF). Gemischt adhäsiv-kohäsive Brüche erfolgten gehäuft bei den Kombinationen Clearfil Majesty Esthetic, konventionell repariert mit Estelite Sigma Quick (CME+ESQ), konventionell und unter Schallaktivierung repariert mit sich selbst (CME+CME, CME+CME+S) und konventionell repariert mit Clearfil Majesty Posterior (CME+CMF), sowie bei der schallaktivierten Reparatur von Grandioso Flow mit Clearfil Majesty Posterior (GF+CMF+S). Es fällt auf, dass bei Materialkombinationen mit Clearfil Majesty Esthetic als Substratmaterial verhältnismäßig viele gemischte Brüche auftraten. Dies wird auch aus Abbildung 14 ersichtlich. Der Grafik lässt sich zudem entnehmen, dass bei der konventionellen Reparatur von Clearfil Majesty Esthetic ungefähr doppelt so viele gemischte (29 von 75 versus 14 von 75 Proben), aber genauso viele kohäsive Brüche (jeweils eine von 75 Proben) resultierten wie bei der schallaktivierten Reparatur. Wurde Clearfil Majesty Posterior konventionell repariert, ergaben sich ausschließlich adhäsive Frakturverläufe.

Bei allen Reparaturmaterialien, sowohl bei der herkömmlichen Reparaturmethode als auch bei Schalleinsatz, kam es zum Auftreten gemischter Brüche (siehe Abbildung 15). Die meisten gemischten Frakturen ergaben sich bei der konventionellen Reparatur mit Clearfil Majesty

Posterior (13 von 75 Proben) und der schallaktivierten Reparatur mit Clearfil Majesty Esthetic (11 von 75 Proben). Bei der schallaktivierten Reparatur (339 von 375 Proben) kam es insgesamt öfter zu adhäsiven Brüchen als bei der konventionell durchgeführten (330 von 375 Proben), wie auch Abbildung 16 wiedergibt. Weniger adhäsive Brüche bei Schalleinsatz im Vergleich zur herkömmlichen Reparaturweise zeigten sich bei Reparaturen mit SonicFill und Clearfil Majesty Esthetic.

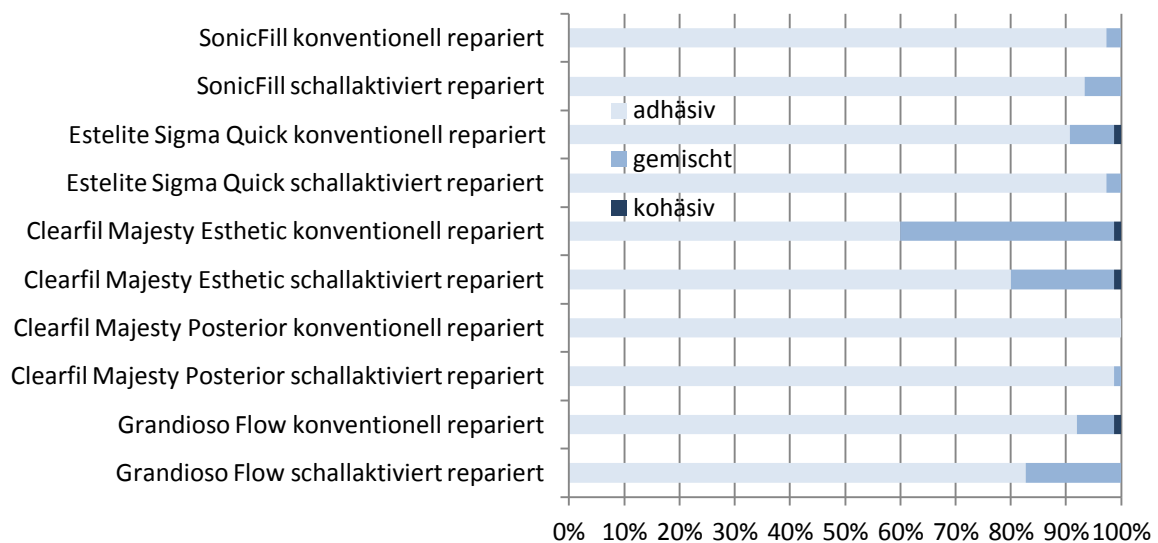


Abbildung 14: Prozentualer Anteil der Bruchmodi an den Substratmaterialien

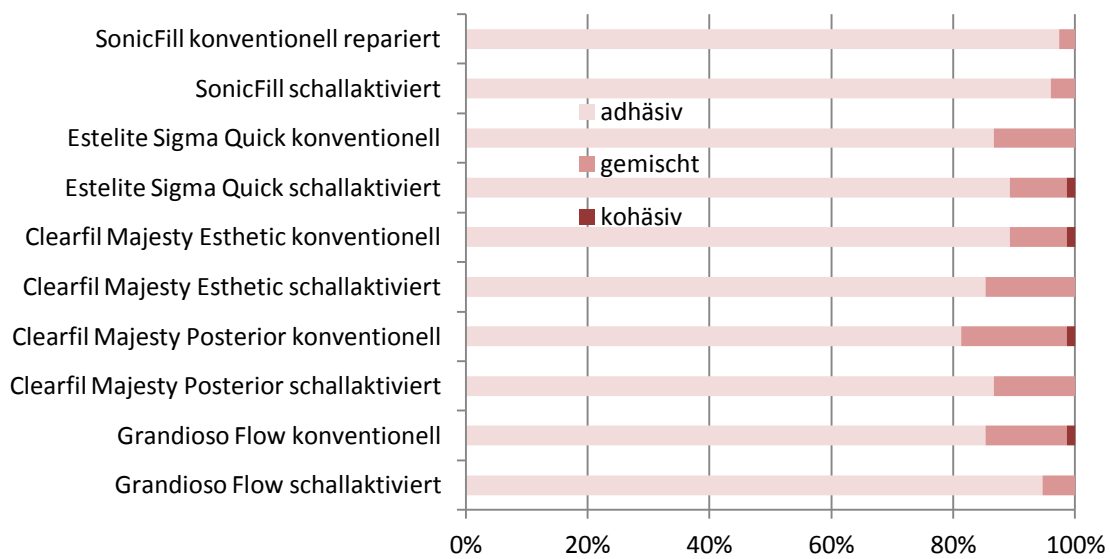


Abbildung 15: Prozentualer Anteil der Bruchmodi an den Reparaturmaterialien

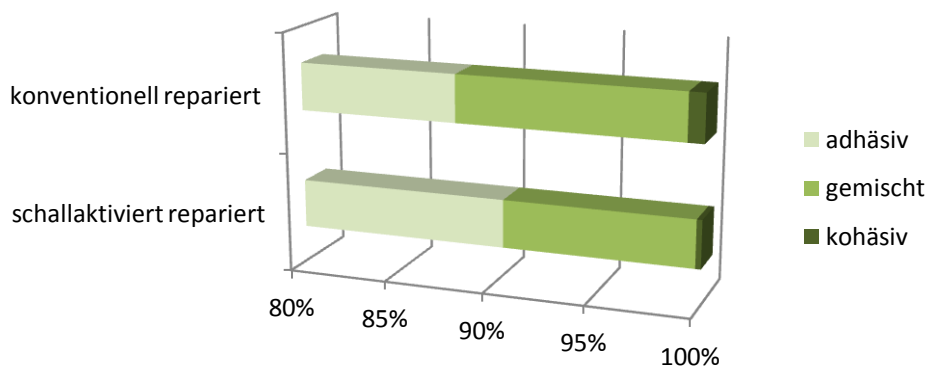


Abbildung 16: Prozentualer Anteil der Bruchmodi insgesamt (ohne Kontrollgruppen)

Zur Veranschaulichung wurde stellvertretend für die drei Bruchmodi jeweils ein Bild ausgewählt, welches unter dem Rasterelektronenmikroskop aufgenommen wurde. Abbildung 19, auf der eine adhäsive Fraktur zu sehen ist, lässt deutlich Luftblasen erkennen.

Die Zugzone befindet sich jeweils oben, die Druckzone unten.

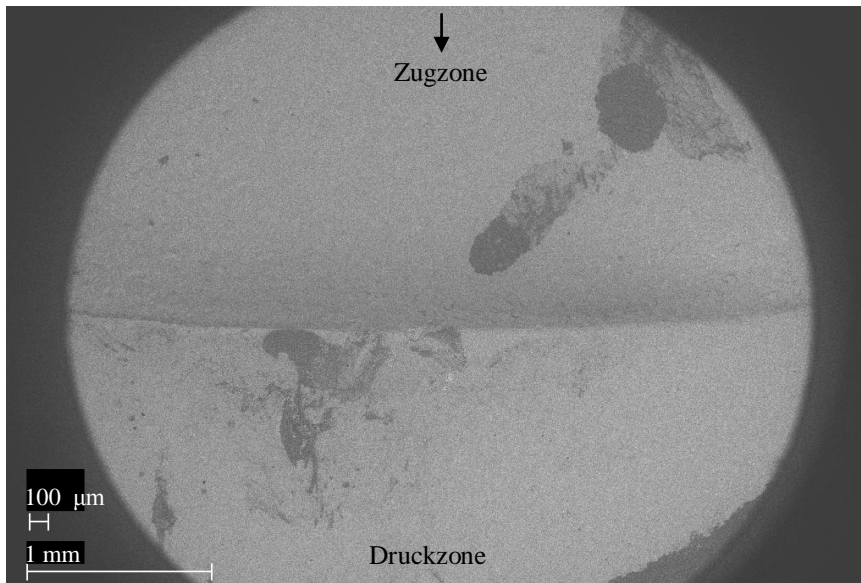


Abbildung 17: kohäsiver Bruch

Substratmaterial = Estelite Sigma Quick,

Reparaturmaterial = Clearfil Majesty Posterior, konventionell verarbeitet

Scherhaftfestigkeit dieser Probe = 13,3 MPa

Dargestellt ist die Bruchfläche auf der Seite des Substratzylinders.

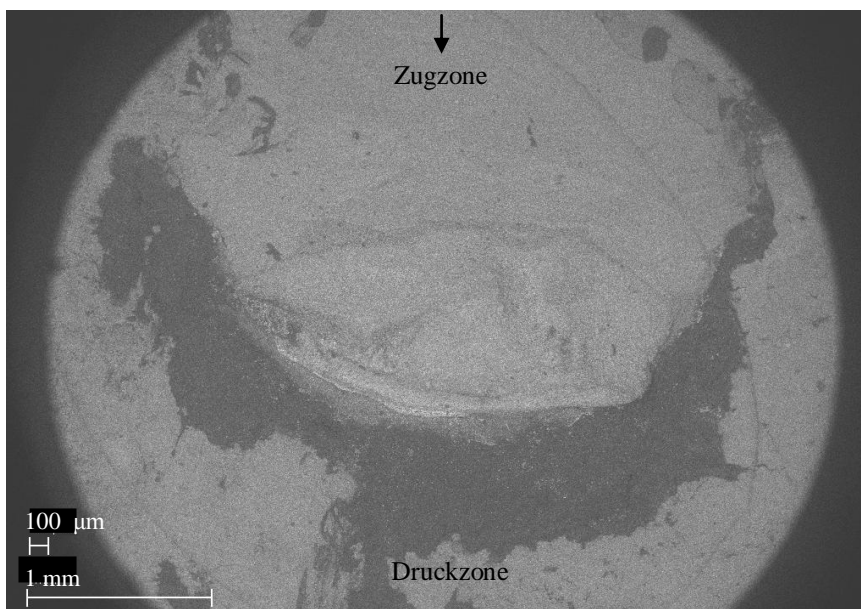


Abbildung 18: gemischt adhäsiv-kohäsiver Bruch

Substratmaterial = Grandioso Flow,

Reparaturmaterial = SonicFill, unter Schalleinsatz verarbeitet

Scherhaftfestigkeit dieser Probe = 29,6 MPa

Dargestellt ist die Bruchfläche auf der Seite des Substratzylinders.

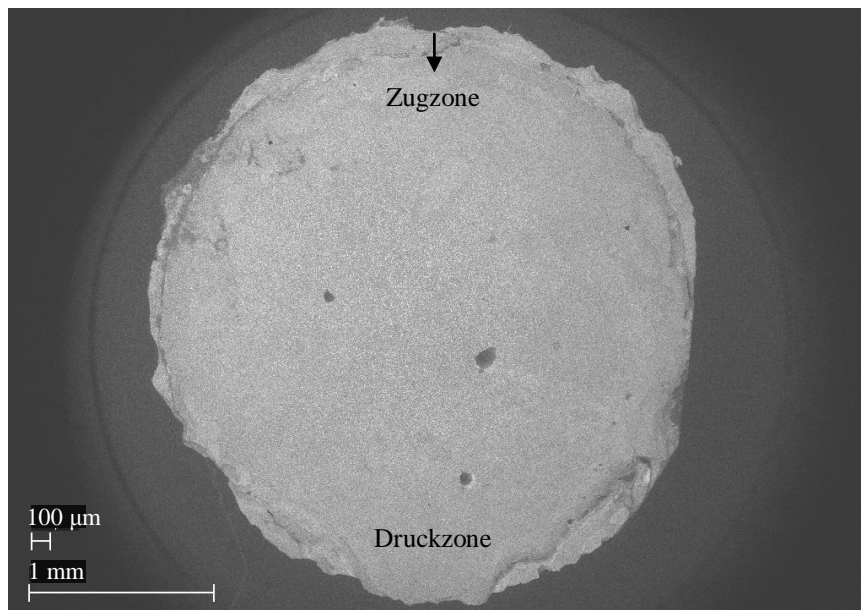


Abbildung 19: adhäsiver Bruch

Substratmaterial = SonicFill,

Reparaturmaterial = Estelite Sigma Quick, konventionell verarbeitet

Scherhaftfestigkeit dieser Probe = 14,5 MPa

Dargestellt ist die Bruchfläche auf der Seite des Reparaturzylinders.

Die folgenden Tabellen (11-13) zeigen die Effektstärke der unterschiedlichen Einflussfaktoren. Je größer der partielle Eta-Quadrat-Wert, desto größer ist der Einfluss der getesteten Parameter auf die Scherhaftfestigkeit oder den Weibull-Parameter. In den Tabellen angegeben ist das partielle Eta-Quadrat, wenn der Einfluss der Quelle signifikant ist.

Tabelle 11: Übersicht der Einflussfaktoren auf Scherhaftfestigkeit und Weibull-Parameter: gesamt, ohne Kontrollgruppen

Quelle	Scherhaftfestigkeit	Weibull-Parameter m
Reparaturmaterial	0,219	n. s.
Substratmaterial	0,126	n. s.
Schalleinsatz	0,015	n. s.
Reparaturmaterial + Substratmaterial	0,049	n. s.
Reparaturmaterial + Schalleinsatz	0,019	n. s.
Reparaturmaterial + Substratmaterial + Schalleinsatz	n. s.	n. s.

n. s. = nicht signifikant

Signifikanzniveau = 0,05

Wie in Tabelle 11 zu erkennen, wurde der Weibull-Parameter, welcher die Zuverlässigkeit eines Materials wiedergibt, durch keine der angegebenen Faktoren signifikant beeinflusst.

In Bezug auf alle Gruppen außerhalb der Kontrollgruppen wurde ersichtlich, dass die Wahl des Reparaturmaterials sowie des Substratmaterials, die Kombination der zuletzt genannten, die Kombination von Reparaturmaterial und Schalleinsatz und der Einsatz von Schallaktivierung zur Verflüssigung des Reparaturmaterials einen signifikanten Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit ausübten. Den größten Einfluss auf die Haftfestigkeit hatte die Art des Reparaturmaterials (partielltes Eta-Quadrat = 0,219), gefolgt vom Substratmaterial (partielltes Eta-Quadrat = 0,126). Der Einfluss der restlichen untersuchten Größen sowie der Kombination verschiedener Parameter fiel niedrig aus. Der Schalleinsatz übte einen sehr

geringen signifikanten Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit insgesamt aus (partielles Eta-Quadrat = 0,015).

Tabelle 12: Einfluss des Reparaturmaterials auf die Scherhaftfestigkeit: bezogen auf das Substratmaterial, ohne Kontrollgruppen

Quelle = Reparaturmaterial	Substratmaterial	Einfluss auf Scherhaftfestigkeit (partielles Eta-Quadrat)
	Grandioso Flow	0,451
	Clearfil Majesty Posterior	0,647
	Clearfil Majesty Esthetic	0,243
	Estelite Sigma Quick	0,497
	SonicFill	0,516

Signifikanzniveau = 0,05

Betrachtet man die Ergebnisse bezogen auf das Material der Substratfüllung, so zeigt sich, dass die Wahl des Reparaturmaterials bei allen Substraten einen signifikanten Einfluss auf die Reparaturhaftfestigkeit ausübte. Am meisten wurde die Scherhaftfestigkeit durch das Reparaturmaterial beeinflusst, wenn für die Ausgangsfüllung Clearfil Majesty Posterior verwendet wurde (partielles Eta-Quadrat = 0,647), gefolgt von SonicFill (partielles Eta-Quadrat = 0,516).

Tabelle 13: Einfluss des Substratmaterials auf die Scherhaftfestigkeit: bezogen auf das Reparaturmaterial, ohne Kontrollgruppen

Quelle = Substratmaterial	Reparaturmaterial	Einfluss auf Scherhaftfestigkeit (partielles Eta-Quadrat)
	Grandioso Flow	0,113
	Clearfil Majesty Posterior	0,137
	Clearfil Majesty Esthetic	0,271
	Estelite Sigma Quick	0,206
	SonicFill	0,091

Signifikanzniveau = 0,05

Aus Tabelle 13 wird ersichtlich, dass das Substratmaterial bei allen Reparaturkompositen einen signifikanten Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit ausübte. Den größten Einfluss auf die Haftfestigkeit hatte das Substratmaterial, wenn die Reparatur mit Clearfil Majesty Esthetic durchgeführt wurde (partielles Eta-Quadrat = 0,271).

Der zur Untersuchung des Einflusses der Schallaktivierung auf die Scherhaftfestigkeitsmittelwerte durchgeführte t-Test ergab für die Reparaturmaterialien Grandioso Flow, Clearfil Majesty Posterior und SonicFill signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten bei herkömmlicher und schallaktivierter Reparatur, wobei die konventionell durchgeführte Reparatur jeweils höhere Scherhaftfestigkeitsmittelwerte lieferte. Estelite Sigma Quick, welches das einzige Material darstellte, dessen Haftfestigkeitsmittelwert bei der Verarbeitung unter Schalleinsatz höher war als bei konventionell durchgeführter Reparatur, zeigte zwischen diesen beiden Mittelwerten allerdings keinen signifikanten Unterschied, ebenso Clearfil Majesty Esthetic.

Zusätzlich wurde nach Korrelationen zwischen verschiedenen Faktoren gesucht, wobei der Pearson-Korrelationskoeffizient verwendet wurde. Dieser gibt an, ob und in welchem Ausmaß ein linearer Zusammenhang zwischen zwei Merkmalen besteht. Nimmt er den Wert

0 an, so hängen die Merkmale überhaupt nicht voneinander ab. Bei den maximalen Werten +1 oder -1 kann man von einem vollständigen direkten beziehungsweise inversen linearen Zusammenhang ausgehen. Es wurde untersucht, ob und inwieweit die Parameter Scherhaftfestigkeit, Elastizitätsmodul (nach Universalhärteversuch und Drei-Punkt-Biegeversuch) der Substrat- und Reparaturmaterialien, Bruchmodus und Weibullparameter miteinander korrelieren. Das Signifikanzniveau betrug 0,01 beziehungsweise 0,05.

Es zeigte sich, bezogen auf sämtliche Proben, dass die Scherhaftfestigkeit nur mäßig mit dem E-Modul des Reparaturmaterials korrelierte (Pearson-Korrelationskoeffizient = 0,333 für E-Modul nach Universalhärteversuch und 0,342 für E-Modul nach Drei-Punkt-Biegeversuch). Es bestand keine Korrelation zwischen der Scherhaftfestigkeit und dem E-Modul des Substratmaterials. Die E-Modulwerte nach Drei-Punkt-Biege- und Universalhärteversuch korrelierten sehr stark (Pearson-Korrelationskoeffizient = 0,979).

Bezogen auf die Inkrementelle Verbundfestigkeit, also die Werte der Kontrollgruppen, korrelierten Weibull-Parameter und Bruchmodus nicht mit dem E-Modul oder der Festigkeit. Allerdings existierte ein schwacher direkter Zusammenhang zwischen der Scherhaftfestigkeit und den E-Modulen von Reparatur- und Substratmaterial (Pearson-Korrelationskoeffizient jeweils = 0,298 für E-Modul nach Universalhärteversuch und 0,392 für E-Modul nach Drei-Punkt-Biegeversuch).

In Hinsicht auf alle reparierten Proben unter Ausschluss der Kontrollgruppen konnte ebenfalls eine mäßige Korrelation zwischen der Scherhaftfestigkeit und dem E-Modul des Reparaturmaterials festgestellt werden (Pearson-Korrelationskoeffizient = 0,408 für E-Modul nach Universalhärteversuch und 0,410 für E-Modul nach Drei-Punkt-Biegeversuch). Außerdem bestand ein geringfügiger positiver Zusammenhang zwischen Festigkeit und Bruchmodus (Pearson-Korrelationskoeffizient = 0,244). Bei der Betrachtung des Zusammenhangs zwischen E-Moduli und Bruchart zeigte sich jeweils ein leichter inverser

linearer Zusammenhang zwischen dem Frakturverlauf und dem E-Modul nach Universalhärteversuch (Pearson-Korrelationskoeffizient = - 0,185) und dem E-Modul nach Drei-Punkt-Biegeversuch (Pearson-Korrelationskoeffizient = - 0,218) des Substratmaterials. Eine sehr geringfügige negative Korrelation mit einem Koeffizienten von - 0,073 fand sich zwischen der Haftfestigkeit und dem E-Modul (Universalhärteversuch) des Substratmaterials. Die Korrelationskoeffizienten nach Pearson für Scherhaftfestigkeit und E-Moduli für die mit Schalleinsatz reparierten Proben (0,422 und 0,421) erwies sich als etwas höher als für die ohne Schalleinsatz reparierten Proben (0,401 und 0,404). Allerdings korrelierten Bruchmodus und Festigkeit ein wenig stärker, wenn ohne Schalleinsatz repariert wurde (Korrelationskoeffizient = 0,279 versus 0,195). Der negative lineare Zusammenhang zwischen Bruchmodus und E-Modul (nach Universalhärteversuch und nach Drei-Punkt-Biegeversuch) des Substratmaterials war stärker, wenn keine Schallaktivierung eingesetzt wurde (Korrelationskoeffizienten = - 0,239 und - 0,286 versus - 0,124 und - 0,138).

Außerdem wurden mithilfe des Back-Scatter-Modus unter dem Rasterelektronenmikroskop (REM) repräsentative Bilder der Füllkörperverteilung sowie deren Form und Größe für jedes verwendete Komposit aufgenommen.

Die Materialien Grandioso Flow, Clearfil Majesty Posterior und SonicFill weisen eine ähnlich enge Verteilung der Füllkörper auf, welche asymmetrische, eckige Formen und variierende Durchmesser bis zu circa 8 μm aufweisen. Das Bild von Clearfil Majesty Esthetic lässt neben unterschiedlich großen Präpolymeren (bis über 30 μm) kleine, ungefähr 1 μm große Füllkörper erkennen. Estelite Sigma Quick zeigt fast gleich große, runde Füllkörper mit sehr kleinem Durchmesser von ungefähr 0,1-0,3 μm .

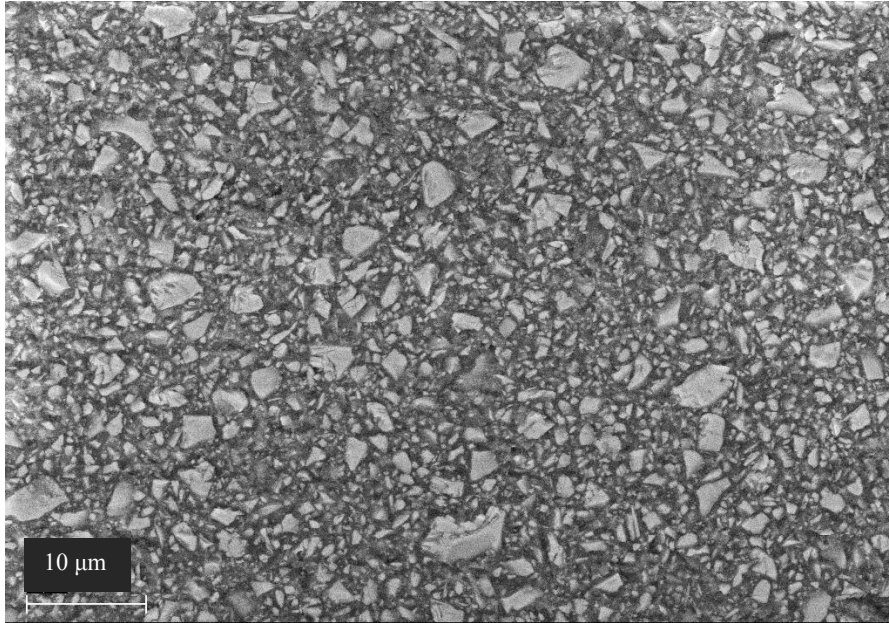


Abbildung 20: REM-Bild von Grandioso Flow

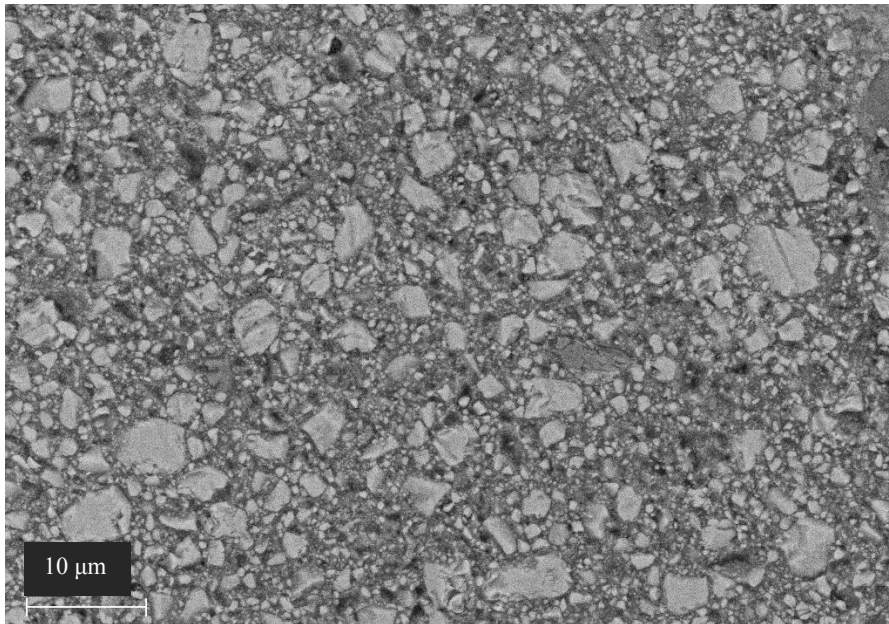


Abbildung 21: REM-Bild von Clearfil Majesty Posterior

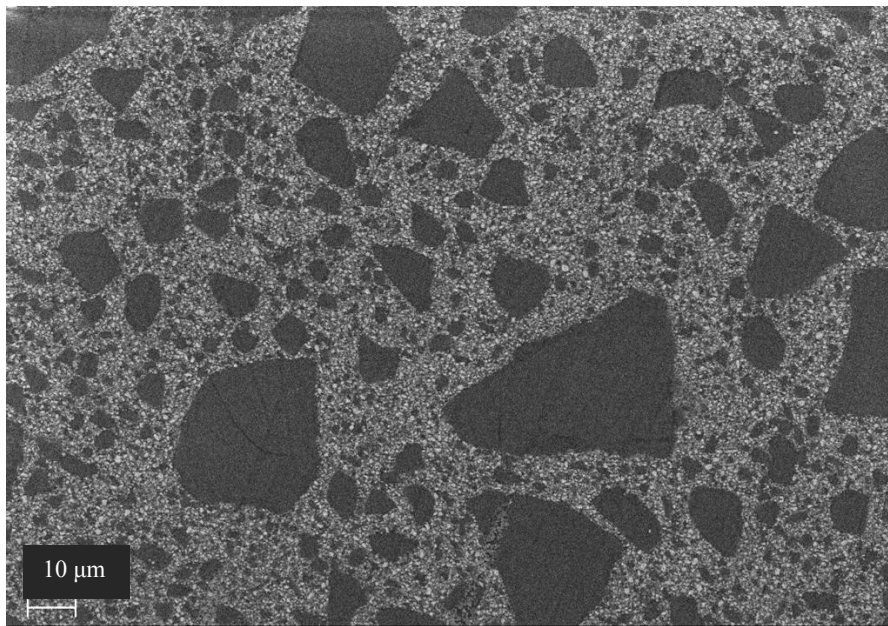


Abbildung 22: REM-Bild von Clearfil Majesty Esthetic

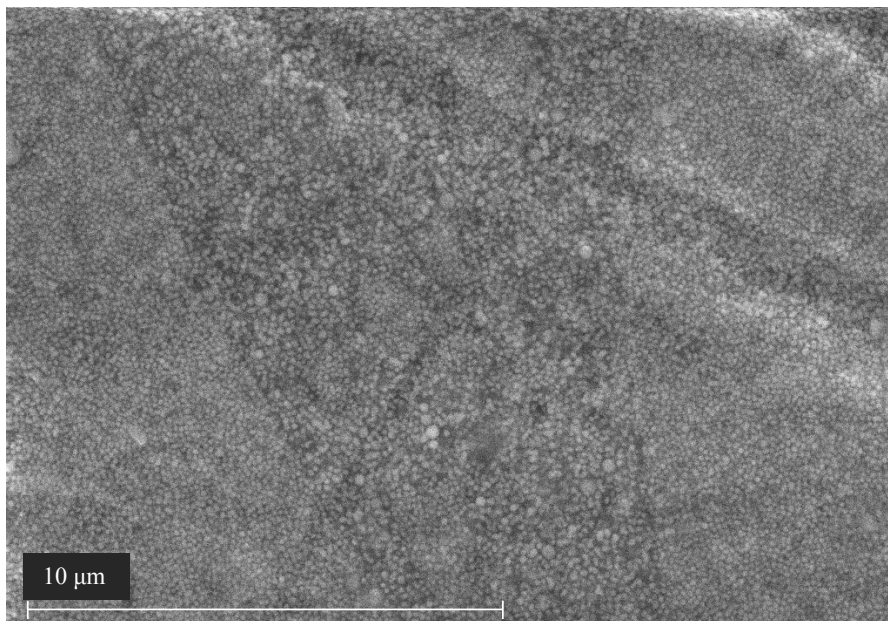


Abbildung 23: REM-Bild von Estelite Sigma Quick

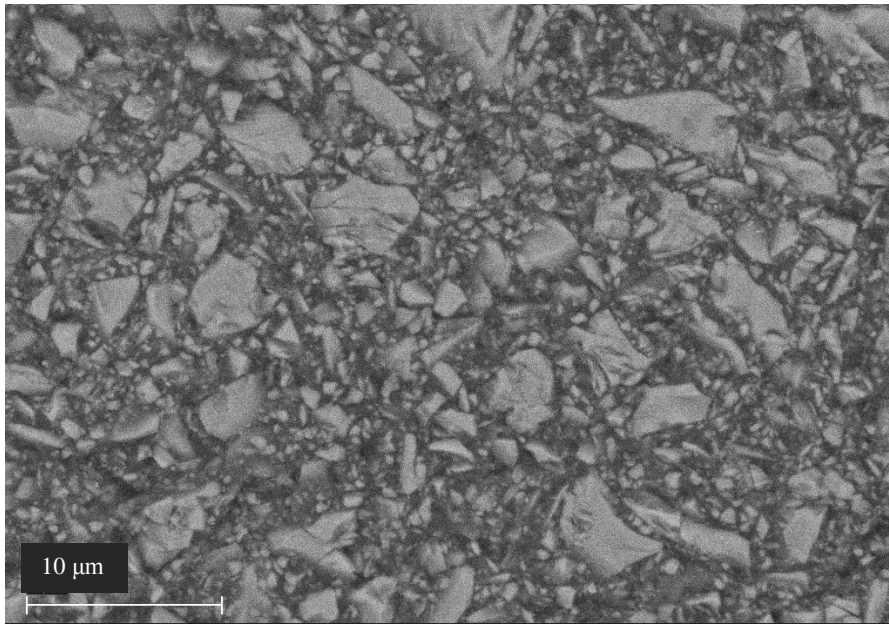


Abbildung 24: REM-Bild von SonicFill

6. Diskussion

Warum ist es sinnvoll, den Einfluss von Schallaktivierung auf die Viskosität von Dentalkompositen und deren Eignung als Reparaturwerkstoff zu untersuchen?

Herkömmliche fließfähige Komposite zeichnen sich im Vergleich zu visköseren Kompositen durch bessere Randadaptation und Benetzung der Kavitätenoberfläche aus (Steet et al. 2000; Lee et al. 2010), weshalb sie sich auch für die Reparatur partiell insuffizienter Restaurationen eignen (Lee et al. 2010). Außerdem lassen sie sich in schwer zugänglichen Kavitäten leichter applizieren, da man sie mit Hilfe einer Applikationsspritze einbringen kann (Bayne et al. 1998; Leinfelder et al. 1999). Allerdings wird von einem Gebrauch der Flowables in kaukrafttragenden Bereichen des Zahnbogens aufgrund ihrer minderen mechanischen Eigenschaften abgeraten (Leinfelder et al. 1999). Um den in der Mundhöhle auftretenden okklusalen Kräften standhalten zu können, benötigt ein Restaurationswerkstoff einen ausreichend hohen Elastizitätsmodul (Lambrechts et al. 1987; Unterbrink & Liebenberg 1999). Für den Seitenzahnbereich wird in der Literatur ein Richtwert von mindestens 18 GPa angegeben, was ungefähr dem Elastizitätsmodul von Dentin entsprechen soll (Willems et al. 1992). Aufgrund der exponentiellen Abhängigkeit zwischen dem Füllergehalt eines Komposits und dessen Elastizitätsmodul (Abe et al. 2001) weisen stopfbare, höher visköse Materialien eine bessere Eignung für die Verwendung im Seitenzahngebiet auf (Helvatjoglu-Antoniades et al. 2006). Außerdem lassen sie sich wegen ihrer erhöhten Standfestigkeit im Mund leichter bearbeiten (Papadogiannis et al. 2008; Lee et al. 2010).

Um die Verarbeitung zu erleichtern, sollte ein ideales Material um und in jeden Winkel einer präparierten Kavität fließen und nach Beendigung des Füllvorgangs dort verbleiben (Al-Sharaa & Watts 2003). Je nach Indikation kann es notwendig erscheinen, die modellierte Form des Komposits bis zur Fertigstellung der Füllung beizubehalten. Andererseits wird eine

ausreichende Benetzung des Kavitätenbodens und der -Wände benötigt, was ein Material mit reduzierter Viskosität erforderlich macht (Jacobsen et al. 1977).

Ein Material, das mit einer Applikationsspritze eingebracht werden kann und während der Extrusion eine niedrige Viskosität aufweist, welches jedoch nach Beendigung der Applikation eine höhere Viskosität besitzt, könnte einfach und mit wenig Kraftaufwand in die Kavität eingebracht werden und dennoch eine hohe Standfestigkeit aufweisen. Die Adaptionsfähigkeit an die Kavitätenwände könnte so ebenfalls erhöht werden. Während sich das Material bei der Extrusion unter einer hohen Scherrate durch die Nadel der Applikationsspritze bewegt, sinkt seine Viskosität durch die Veränderung der internen Struktur. Wird keine externe Kraft mehr auf den Werkstoff ausgeübt, steigt die Viskosität wieder an (Beun et al. 2008; Lee et al. 2010).

Die Senkung der Viskosität eines Komposits lässt sich außer durch Erhöhung der Materialtemperatur (Papacchini et al. 2007a) durch den Einsatz von Schallaktivierung erzeugen, wie es bei der Insertion von Keramikinlays bereits praktiziert wird. Dabei wird die Viskosität des Befestigungskomposits soweit reduziert, dass die Restauration ohne größeren Kraftaufwand richtig positioniert werden kann (Ferracane et al. 1981; van Meerbeek et al. 1994).

Durch die Markteinführung des SonicFill-Systems wurde es möglich, mithilfe eines schallbetriebenen Handstücks, an dessen Ende eine Applikationskartusche befestigt wird, die Viskosität eines Komposits während der Befüllung einer Kavität zu reduzieren. Anschließend steigt die Viskosität wieder an (Kerr SonicFill 2013).

Kompositrestaurationen sind intraoral verschiedenen Einflüssen ausgesetzt und müssen hohen Anforderungen hinsichtlich der mechanischen, chemischen und farblichen Beständigkeit gerecht werden. Daher werden sie vor dem Einsatz am Patienten hinsichtlich ihrer klinischen Eignung geprüft. Laborprüfungen sind wesentlich schneller und mit weniger Aufwand

verbunden als die Erhebung klinischer Daten. Die Ergebnisse, welche wichtige Erkenntnisse über die physikalischen Eigenschaften und die Eignung eines Materials liefern können, liegen bei in-vitro-Untersuchungen nicht erst nach Jahren vor (Heintze & Zimmerli 2011a).

Laborprüfungen ersetzen keineswegs die Prüfung in vivo und können klinischen Erfolg nicht garantieren. Allerdings sind sie sinnvoll und notwendig, um Risiken von Restaurationsmaterialien hinsichtlich Funktion, Ästhetik und Langlebigkeit abzuschätzen. So können sie dazu beitragen, die Sicherheit der Patienten mithilfe der Durchführung einer kontrollierten Studie zu erhöhen (Heintze & Zimmerli 2011a, 2011b).

Die vorliegende Untersuchung wurde in Anlehnung an die ISO Norm CD TR 11405 durchgeführt, welche in Ermangelung eines international anerkannten, standardisierten Prüfprotokolls zur Testung von Haftfestigkeiten von Reparaturen herangezogen werden kann (Ahlers 2006). Zudem beruht sie auf Erkenntnissen aktueller Untersuchungen zur Reparatur von Kompositrestaurationen (Ivanovas et al. 2011; Loomans et al. 2011; Maneenut et al. 2011; Baur & Ilie 2012). Die verwendeten Materialien unterscheiden sich unter anderem in der Zusammensetzung der Matrix und ihrem Füllkörpergehalt sowie der Größe, Form, Art und Verteilung der Füllkörper. Zudem besitzen sie unterschiedliche Elastizitätsmoduli und Verarbeitungseigenschaften. Neben normal-viskösen wurden auch ein fließfähiges Komposit (Grandioso Flow, Voco) und ein Bulk-Fill-Komposit (SonicFill, Kerr) verwendet. Zum Teil weisen sie unterschiedliche Indikationsbereiche auf.

Komposite sind ein fester und wichtiger Bestandteil der modernen, minimalinvasiven Füllungstherapie (Tyas et al. 2000). Auch als Material zur Reparatur defekter dentaler Restaurationen aus verschiedenen Werkstoffen haben sich Komposite als erfolgreich erwiesen (Foitzik & Attin 2004). Zahlreiche Studien beschäftigen sich mit der Reparatur methacrylatbasierter Komposite. Die Autoren konzentrierten sich dabei bisher hauptsächlich auf die effektivsten Methoden der Oberflächenbearbeitung der Substratfüllung, mögliche

Haftvermittler und die Art des Reparaturkomposits (Hisamatsu et al. 2002; Cavalcanti et al. 2007; Yesilyurt et al. 2009; Rinastiti et al. 2010a; Akimoto et al. 2011; Hamano et al. 2011; Rinastiti et al. 2011; Staxrud & Dahl 2011).

Um die Benetzbarkeit der Substratoberfläche zu erhöhen, ist es wichtig, ein entsprechendes Verfahren zur Anhebung der Oberflächenrauigkeit anzuwenden (Chiba et al. 1989; Bouschlicher et al. 1997; Shahdad & Kennedy 1998; Rosales-Leal et al. 2001; Özcan et al. 2007; Papacchini et al. 2007b). In der vorliegenden Arbeit wurde dafür Siliziumkarbidpapier verwendet.

Sandstrahlgeräte werden zwar von vielen Autoren empfohlen, gefährden jedoch die Atemwege von Patienten und Zahnärzten, da ein großes Areal des Behandlungsraums mit einem feine, abrasive Partikel enthaltenden Aerosol kontaminiert wird (Loomans et al. 2011). Zudem gestaltet sich ihre Anwendung als sehr aufwändig (Rathke et al. 2009).

Die Anätzung der Substratoberfläche mit Flusssäure erbrachte zwar in einigen Untersuchungen gute Haftfestigkeitswerte, kann aber aufgrund der starken Toxizität zu schweren Haut- und Schleimhautverletzungen führen. Da die Verbrennungen sich nicht immer durch Schmerz äußern, ist auch die unbemerkte Penetration in tiefere Gewebeschichten möglich und kann so systemisch wirksam werden (Bertolini 1992). Phosphorsäure kann, wie in der vorliegenden Arbeit, zur Säuberung der Oberfläche nach der mechanischen Oberflächenbearbeitung herangezogen werden (Gregory et al. 1990; Ahlers 2006; Papacchini et al. 2007a; Ivanovas et al. 2011). Durch die Reinigungsleistung werden Debris und Schleifpartikel von der Oberfläche des Substrats entfernt. Möglicherweise regt Phosphorsäure auch die Reaktivität zwischen Siliziumdioxidkörpern im Substrat und dem aufgetragenen Silan an und erhöht somit die Anzahl der Si-OH-Verbindungen (Loomans et al. 2011).

Die Methode, die Füllungsoberfläche mit einem diamantierten Bohrer aufzufrischen, ist nicht nur einfach, da die dafür notwendige Ausrüstung an jedem Behandlungsstuhl gegeben ist, sondern ermöglicht auch gleichzeitig die gezielte Bearbeitung der angrenzenden Zahnhartsubstanzareale. Von vielen Autoren wird diese Vorgehensweise am Patienten empfohlen (Foitzik & Attin 2004; Bonstein et al. 2005; Yesilyurt et al. 2009). In einer Untersuchung von *Bonstein et al.* resultierte das Anrauen mit einem Diamanten in Kombination mit der Applikation eines Silans in den besten Ergebnissen (Bonstein et al. 2005). Unter Laborverhältnissen lässt sich analog Siliziumkarbidpapier verwenden (Crumpler et al. 1989; Tezvergil et al. 2003), um die gealterten Substratoberflächen anzurauen, weshalb auch in dieser Studie darauf zurückgegriffen wurde.

Da die hier verwendeten Restaurationsmaterialien anorganische Füllkörper enthalten, wurde auch die Applikation eines Silans für sinnvoll erachtet. Dieses kann eine kovalente Bindung zwischen den anorganischen Füllerpartikeln des Substratmaterials und den Monomeren des anschließend aufgetragenen Adhäsivs eingehen (Tezvergil et al. 2003; Özcan et al. 2007) und erhöht zudem die Benetzungsmöglichkeit der unregelmäßigen Füllungsoberfläche durch das Adhäsivsystem (Bouschlicher et al. 1997). *Hisamatsu et al.* und *Fawzy et al.* empfehlen die Benutzung eines Silane Primers (Hisamatsu et al. 2002; Fawzy et al. 2008). Die Entscheidung für das in dieser Studie verwendete Silan (Silane Primer, Kerr, Orange, USA) wurde in Anlehnung an eine Untersuchung von *Loomans et al.* zur optimalen Reparaturtechnik von Kompositfüllungen gefällt (Loomans et al. 2011).

Methacrylatbasierte Haftvermittler verbessern die Benetzung durch Penetration der Reparaturschicht in die raue Substratoberfläche und gehen eine chemische Bindung mit dem applizierten Silan und dem Reparaturkomposit ein (Brosh et al. 1997; Papacchini et al. 2007a; Yesilyurt et al. 2009). Viele Autoren empfehlen den gemeinsamen Einsatz eines Silans und eines Adhäsivs als Haftvermittler (Hisamatsu et al. 2002; Fawzy et al. 2008; Rinastiti et al.

2010a; Akimoto et al. 2011). Aufbauend auf den Studien von *Rathke et al.* und *Loomans et al.* wurde für diese Studie das gefüllte Adhäsiv Optibond FL (Kerr, Orange, USA) gewählt (Rathke et al. 2009; Loomans et al. 2011).

Papacchini et al. stellten fest, dass das Erwärmen des Reparaturmaterials auf 37°C zu einer signifikanten Erhöhung der Haftfestigkeit führte, wenn kein Haftvermittler verwendet wurde. Sie führten dies auf die Reduzierung der Viskosität des Materials durch Steigerung der Temperatur zurück (Papacchini et al. 2007a). Darauf aufbauend lässt sich vermuten, dass ein ähnlicher Effekt bei der Verflüssigung des Reparaturmaterials durch Schallaktivierung zustande kommen könnte. Ohne Einsatz eines Haftvermittlers wäre es möglich, dass das Reparaturmaterial direkt in Mikroretentionen der angerauten Substratoberfläche eindringt. Allerdings empfehlen *Papacchini et al.* selbst auch die Verwendung eines Haftvermittlers (Papacchini et al. 2007a). Nicht zuletzt zugunsten der Haftung einer Reparaturfüllung an angrenzenden Zahnhartsubstanzen sollte auf ein Adhäsiv oder Bonding nicht verzichtet werden (Thiele 2002). Bei der Verblasung des Haftvermittlers mittels ölfreier Druckluft wurde darauf geachtet, dass bei allen Proben möglichst homogene und vergleichbar dicke Schichten des Haftvermittlers entstanden. Eine immer gleich gestaltete Adhäsivschicht bei allen Prüfkörpern ließ sich jedoch nicht garantieren, wie auch *Bowen* schon feststellte (Bowen 1965). Die mehr oder weniger geringfügigen Unterschiede können möglicherweise einen Einfluss auf Bruchart und Scherhaftfestigkeit ausgeübt haben.

Da die Haftfestigkeit in direkter Relation zur Größe der Haftfläche steht, mussten alle Reparaturfüllungen den gleichen Durchmesser besitzen und auch die Adhäsivfläche musste für alle Proben gleich groß sein. Für letzteres kam Klebeband zum Einsatz, in welches mit einer scharfen Lochzange Löcher mit einem Durchmesser von 3 mm gestanzt wurden. Somit war es möglich, gezielt auf der erwünschten späteren Verbundfläche Silan und Adhäsiv aufzutragen. Für die dazu passend hergestellten Matrizen musste ein Material gewählt

werden, das Passgenauigkeit aufwies, keine chemischen oder mechanischen Wechselwirkungen mit dem Restaurationsmaterial einging, eine ausreichende Fotopolymerisierung der Restaurationsmaterialien gewährleistete und ohne Kraftübertragung auf den Werkstoff entfernt werden konnte. *Reinhardt und Vahl* zufolge werden lichtpolymerisierende Komposite weniger durch das Formmaterial beeinflusst als Autopolymerisate (Reinhardt & Vahl 1981). In der vorliegenden Studie wurde ein additionsvernetzendes Bissregistriersilikon (Futar D Fast, Kettenbach, Eschenburg, Deutschland) verwendet, welches Detailgenauigkeit und Formstabilität aufweist. Außerdem besitzt es ausreichend Elastizität, um es nach Legen der Reparaturfüllung, ohne Kraft auf die Restauration auszuüben, entfernen zu können. Um Dimensionsänderungen durch Verschleiß vorzubeugen, wurden mehrere identische Matrizen angefertigt.

Es wird davon ausgegangen, dass der Verbund von neuem zu gealtertem Komposit hauptsächlich auf einer mikromechanischen Verankerung beruht, wobei eine zusätzliche chemische Verbindung der Werkstoffe nicht ausgeschlossen werden kann (Frankenberger et al. 2003a; Rathke et al. 2009; Yesilyurt et al. 2009).

Auf der polymerisierten Oberfläche Bis-GMA-basierter Komposite lassen sich noch unreaktierte Kohlenstoff-Doppelbindungen nachweisen, die laut *Gregory et al.* einen chemischen Verbund zwischen gealtertem Komposit und einer Reparaturschicht ermöglichen (Gregory et al. 1990). *Sideridou et al.* fanden beim Vergleich der Konversionsraten von reinen Bis-GMA-, Bis-EMA, TEGDMA- und UDMA-haltigen Proben heraus, dass der maximale Konversionsgrad von Bis-GMA der niedrigste war, während TEGDMA den höchsten maximalen Konversionsgrad aufwies (Sideridou et al. 2002). Auch in der vorliegenden Studie wurden Bis-GMA-basierte Komposite verwendet. *Vankerckhoven et al.* zufolge reduzieren jedoch Politur und Oberflächenbearbeitung die Zahl noch vorhandener

Doppelbindungen (Vankerckhoven et al. 1982), was auch in der vorliegenden Arbeit den chemischen Verbund zwischen Substrat- und Reparaturfüllung erschwert haben kann.

Für die mikromechanische Verankerung genügt eine angeraute Substratoberfläche allein nicht, um eine hohe Haftfestigkeit zu erzielen. Um eine ausreichende Penetration in die Substratoberfläche zu gewährleisten, werden daher in der Regel niedrigvisköse Komposite oder Adhäsive als Haftvermittler eingesetzt (Papacchini et al. 2007a; Yesilyurt et al. 2009).

Wurden in der Kontrollgruppe eines Materials hohe Scherhaftfestigkeitswerte erreicht, zeigten diese Materialien in der Regel auch bei den Reparaturen höhere Werte. Es ist aber auffällig, dass SonicFill als Reparatur- und Substratmaterial und bei Betrachtung der homotypen Reparaturen mit weniger als 50% des kohäsiven Mittelwerts eher schlecht abschneidet, während Clearfil Majesty Posterior als Reparaturmaterial und bei der homotypen Reparatur über 60% der kohäsiven Werte erreicht. Dies könnte darauf hinweisen, dass der verwendete Haftvermittler Optibond FL mit Clearfil Majesty Posterior kompatibler ist als mit SonicFill und es bei letzterem zu einem geringeren chemischen Verbund mit dem Haftvermittler kam. Möglicherweise spielt der chemische Aufbau des Haftvermittlers eine größere Rolle als die Matrixzusammensetzung des Reparaturkomposits selbst (Shahdad & Kennedy 1998; Yesilyurt et al. 2009). Darauf weisen auch die Frakturverläufe nach überkritischer Belastung im Schertest hin. SonicFill als Substrat- und Reparaturmaterial führte fast ausschließlich zu adhäsiven Brüchen. Ebenso ist es möglich, dass SonicFill einen höheren Volumenanteil an Füllern besitzt als Clearfil Majesty Posterior und daher weniger Matrix für einen chemischen Verbund mit dem Haftvermittler zur Verfügung steht.

Die Auswertung des Bruchmodus gibt laut *Gregory et al.* Antworten auf die eigentliche Fragestellung, nämlich ob die nach Reparatur und Lagerung an der Grenzfläche des Komposits erreichte Verbundhaftung groß genug ist, um der überkritischen Scherbelastung zu

widerstehen, sodass die Fraktur nicht adhäsiv in der reparierten Grenzfläche, sondern kohäsiv in der Reparaturfüllung erfolgt (Gregory et al. 1992). Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass der Bruchmodus zum Teil durch die Versuchsanordnung beeinflusst wird. Dabei spielt zum Beispiel die Form der Prüfkörper und das Auftreten von Zugspannungen eine Rolle. In vielen Studien zeigten sich gehäuft kohäsive Brüche bei wesentlich geringeren Haftfestigkeitswerten als denen der positiven Kontrollproben. Viele Autoren scheinen trotzdem mehr Wert auf einen kohäsiven Frakturverlauf zu legen als auf hohe Messwerte (Ahlers 2006), obwohl ein kohäsiver Frakturverlauf keine Aussage über die Qualität des Verbundes liefert.

Nach der vereinfachten Klassifikation der Arbeitsgruppe von *Gregory et al.* wird zwischen adhäsiven, kohäsiven und gemischt adhäsiv-kohäsiven Brüchen unterschieden (Gregory & Moss 1990). Es ist möglich, die kohäsiven und gemischten Brüche weiter danach zu unterteilen, ob der kohäsive Bruch (-Anteil) sich im Substrat- oder Reparaturmaterial befindet oder durch beide Materialsichten verläuft. Aufgrund der geringen Anzahl an kohäsiven Brüchen innerhalb der Reparaturgruppen wurde hier zugunsten der Übersichtlichkeit auf eine solche Differenzierung verzichtet.

Bei adhäsiven Frakturen stellt die Verbundzone zwischen Substrat und Reparaturmaterial die Schwachstelle im Verbund dar. Die Verbundzone wird definiert als die Region, in der der Haftvermittler (in diesem Fall Silan und Adhäsiv) mit den Füllungsmaterialien interagiert. Das bedeutet, sie umfasst die Grenzfläche zwischen Haftvermittler und Oberfläche des gealterten Substratmaterials, die Schicht des Haftvermittlers selbst und die Grenzfläche zwischen Haftvermittler und neuerem Reparaturkomposit. Da für die Herstellung der Kontrollgruppen kein Haftvermittler zum Einsatz kam, bezeichnet der Ausdruck „adhäsiver Bruchmodus“ hier Frakturen an der Grenzfläche zwischen der der Substratfüllung entsprechenden Kompositschicht und der mithilfe der Silikonmatrize darauf applizierten Schicht.

Der adhäsive Frakturmodus tritt typischerweise bei Proben mit den niedrigsten Scherhaftfestigkeitswerten auf. Faktoren, die das Auftreten adhäsiver Frakturen begünstigen, sind eine schlechte Benetzung der Substratoberfläche, eine ungünstige chemische Zusammensetzung des Haftvermittlers und das Auftreten technischer Fehler wie Poren und Hohlräume (Baur & Ilie 2012). Letztere können durch die Manipulation des Füllungsmaterials bei der Verarbeitung entstehen und sind schwer zu kontrollieren (Ferrari et al. 2002).

Bei einer kohäsiven Fraktur repräsentiert das Füllungsmaterial mit seinen physikalischen Eigenschaften den schwachen Punkt, während der Verbund zwischen Substrat und Reparaturfüllung zuverlässig erscheint (Oilo 1993). Kohäsive oder gemischte Brüche erfolgen meistens in Zusammenhang mit hohen Haftfestigkeitswerten. Sie erscheinen oft bei homotypen Reparaturen oder Reparaturen von Kompositen mit gleicher Matrixzusammensetzung (Rodrigues, Junior et al. 2009; Baur & Ilie 2012). Es ließ sich auch in der vorliegenden Arbeit erkennen, dass kohäsive Brüche dann vermehrt auftraten, wenn auch hohe Scherhaftfestigkeitswerte erreicht wurden, während adhäsive Frakturen eher bei niedrigen Haftfestigkeiten zu sehen waren. Allerdings führten gleich hohe Haftfestigkeitswerte nicht immer auch zu identischen Bruchmodi, wie auch *Maneenut et al.* schon beobachtet hatten (Maneenut et al. 2011). Es wurde außerdem herausgefunden, dass sowohl die Rissausbreitung als auch das Erscheinungsbild der Frakturoberfläche durch die Stärke der Verbundfläche zwischen Füllerpartikeln und Matrix eines Komposits beeinflusst werden (Spanoudakis & Young 1984).

Viele Autoren evaluieren den Bruchmodus lichtmikroskopisch (Cavalcanti et al. 2007; Papacchini et al. 2007a; Rodrigues, Junior et al. 2009; Akimoto et al. 2011; Loomans et al. 2011; Maneenut et al. 2011; Rinastiti et al. 2011), einige setzen für eine geringe Anzahl an

Proben zusätzlich ein Rasterelektronenmikroskop ein (Lucena-Martín et al. 2001). In der vorliegenden Studie wurden für besonders repräsentative Proben beide Verfahren angewandt.

Die für die vorliegende Untersuchung verwendeten Materialien führten je nach Materialkombination und Verarbeitungsmodus zu unterschiedlichen Haftfestigkeiten. Die Art von Reparatur- und Substratmaterial übte einen signifikanten Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit aus, wobei der Einfluss des Reparaturmaterials (partiell $\eta^2 = 0,219$) höher war als der des Substratmaterials (partiell $\eta^2 = 0,126$). Diese Beobachtung steht in Widerspruch zu einer Studie von *Baur und Ilie*, in der das Substratmaterial den stärkeren Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit ausübte (Baur & Ilie 2012). Im vorliegenden Fall stellt sich die Situation für den behandelnden Zahnarzt allerdings angenehmer dar, da er nicht das Material der Substratfüllung, wohl aber die Art des Reparaturwerkstoffes selbst zu wählen vermag. Dadurch kann er mehr Einfluss auf den Erfolg der Reparatur nehmen als in dem von *Baur und Ilie* beobachteten Fall, in dem das Substratmaterial, da nicht veränderbar, die maximal erreichbare Scherhaftfestigkeit von vornherein reduzieren kann. Der Schalleinsatz bei der Verarbeitung des Reparaturmaterials übte in der vorliegenden Studie ebenfalls einen signifikanten, vorwiegend negativen Einfluss auf die Haftfestigkeit der Reparatur aus. Dieser fiel jedoch sehr gering aus (partiell $\eta^2 = 0,015$). Auch die Kombination von Schalleinsatz und Reparaturmaterial hatte nur einen geringen signifikanten Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit (partiell $\eta^2 = 0,049$). Man kann also davon ausgehen, dass die Art des Reparaturmaterials eine wichtigere Rolle spielt als die Verwendung von Schall bei der Reparatur.

Der Erfolg eines Werkstoffes bei der Reparatur hing unter anderem davon ab, ob dieses als Substrat- oder Reparaturmaterial zum Einsatz kam. Zudem wiesen die Materialien unterschiedliche Zuverlässigkeiten auf, je nachdem, ob sie als Substrat- oder

Reparaturmaterial verwendet wurden. SonicFill erwies sich zum Beispiel (bei konventioneller Applikation) als zuverlässigstes Reparaturmaterial, jedoch als eines der beiden unzuverlässigsten Substratmaterialien.

Baur und Ilie stellten fest, dass die meisten der von ihnen untersuchten Komposite mit sich selbst repariert die höchsten oder zumindest sehr hohe Haftfestigkeitswerte lieferten, wobei sie allerdings Komposite unterschiedlicher Materialkategorien (methacrylatbasierte Komposite, Ormocere, Silorane) miteinander kombinierten (Baur & Ilie 2012). Diese Beobachtung konnte in der vorliegenden Studie nicht gemacht werden. Allerdings handelte es sich bei den für die vorliegende Untersuchung verwendeten Materialien auch ausschließlich um methacrylatbasierte Komposite. Während die homotypen Reparaturen der anderen Komposite unter allen Kombinationen weder besonders hohe noch auffallend niedrige Haftfestigkeitswerte erreichten, schnitt die Reparatur von Estelite Sigma Quick mit sich selbst sehr schlecht ab. Allerdings muss beachtet werden, dass sich die mittlere Scherhaftfestigkeit der positiven Kontrollgruppe von Estelite Sigma Quick auch als die niedrigste aller fünf getesteten Materialien erwies. Zusätzlich war es auch das am wenigsten erfolgreiche Substratmaterial. Ein Grund dafür könnte sein, dass die spezielle RAP (Radical Amplified Photo-Polymerization)-Technologie und die damit verbundene effizientere Polymerisation (Hara et al. 2006) eine im Vergleich mit den anderen verwendeten Kompositen erhöhte Konversionsrate (Schaub 2010) zur Folge hatte. Dadurch würden weniger Kohlenstoffdoppelbindungen noch für einen Verbund mit der Reparaturschicht zur Verfügung gestanden haben. Zudem muss beachtet werden, dass Estelite Sigma Quick mit 71 Vol.% den zweithöchsten Füllstoffgehalt und außerdem die kleinsten und am dichtesten verteilten Füllkörper der untersuchten Materialien aufweist. Somit vergrößert sich die Oberfläche der Füllkörper und der Anteil der für einen Verbund zum Reparaturkomposit zur Verfügung stehenden Matrix sinkt. Eine besonders ebene und homogene Substratoberfläche,

hervorgerufen durch dichte, sehr kleine runde Füller kann möglicherweise auch weniger oder kleinere Unterschnitte für eine mikromechanische Verankerung des Reparaturwerkstoffes bedeutet haben.

Zudem fanden *Shahdad und Kennedy* heraus, dass bei identischer Matrix-Zusammensetzung des Substrat- und des Reparaturkomposits nicht signifikant höhere Haftfestigkeiten resultierten als bei Reparaturen zwischen zwei chemisch unterschiedlich zusammengesetzten Materialien (Shahdad & Kennedy 1998). Die Reparatur chemisch unterschiedlich aufgebauter Komposite kann ebenso wie homotype Reparaturen zu ausreichenden Verbundfestigkeiten führen (Gregory et al. 1990; Maneenut et al. 2011). Dieses Ergebnis steht in Einklang mit den Beobachtungen der vorliegenden Studie, wenn man sich auf die leicht unterschiedlich aufgebauten, allerdings alle auf Dimethacrylat basierenden Kompositmatrizes bezieht. Clearfil Majesty Posterior zum Beispiel erwies sich in fast allen Kombinationen als bestes Reparaturmaterial.

Um den Aussagewert der erhobenen Daten zu erhöhen, wurde für jedes der fünf Materialien eine positive Kontrollgruppe angefertigt, die die jeweilige Inkrementelle Verbundfestigkeit wiedergibt. Innerhalb dieser wurden die Substratfüllungen sofort und ohne Einsatz eines Haftvermittlers mit Reparaturfüllungen versehen und anschließend für zwei Monate in destilliertem Wasser gelagert. Sie geben die kohäsiven Festigkeitswerte der Komposite wieder, mit denen die Proben der homotypen Reparaturen verglichen und somit besser beurteilt werden können. Die Heranziehung von positiven Kontrollgruppen findet sich in weniger als einem Drittel aller Publikationen, die sich mit der Reparatur von dentalen Restaurationen beschäftigen, wie aus der Übersichtsarbeit von *Hickel et al.* hervorgeht (Hickel et al. 2013). Zu diesen zählen unter anderem die Arbeiten von *Mitsaki-Matsou et al.*, *Rinastiti et al.* und *Fawzy et al.* (Mitsaki-Matsou et al. 1991; Fawzy et al. 2008; Rinastiti et al.

2011). Es existieren aber auch Untersuchungen, die sowohl positive als auch negative Vergleichsgruppen enthalten (Azarbal et al. 1986; Hamano et al. 2011; Loomans et al. 2011).

Allgemein lässt sich sagen, dass eine Reparatur umso verlässlicher ist, je näher die erreichten Reparaturhaftfestigkeitswerte an die kohäsiven Festigkeitswerte intakter Füllungen heranreichen (Cavalcanti et al. 2007). Mit den untersuchten homotypen Reparaturkombinationen wurden 41,6 - 72,5 % der kohäsiven Festigkeiten der jeweiligen Kontrollgruppen erzielt, wobei Clearfil Majesty Posterior die besten Ergebnisse zeigte. Im Mittel ergab dies 54,3 % der Haftfestigkeitswerte der positiven Kontrollgruppen (konventionell repariert 58,5 %, schallaktiviert repariert 50,1 %). In anderen Studien konnten Werte von 19 – 52 % (Mitsaki-Matsou et al. 1991), 25 - 50 % (Söderholm & Roberts 1991), 40 – 60 % (Swift, JR. et al. 1992) und 67 - 82 % (Cavalcanti et al. 2007) der kohäsiven Festigkeiten evaluiert werden. Beim Vergleich dieser Werte ist aber unbedingt zu beachten, dass die Proben verschiedener Studien unter unterschiedlichsten Bedingungen hergestellt, verschiedenen Alterungsprozessen unterworfen und anhand differierender Prüfmethoden ausgewertet wurden.

Der Methode der Haftfestigkeitsmessung kommt bei der Untersuchung von Verbundfestigkeiten reparierter Komposite eine große Bedeutung zu. Um die Haftfestigkeit eines Werkstoffes zu prüfen, stehen verschiedene Methoden zur Verfügung. Dazu zählen Ausstoßprüfung, Messung des Spannungsintensitätsfaktors, der Biege-, Zug- und Scherfestigkeit. Die beiden letzteren lassen sich in Makro- und Mikro- Zug- beziehungsweise Scherversuche unterteilen. Quantitativ vergleichende Aussagen zu den gemessenen Werten sind nur innerhalb einer Untersuchung möglich. Verschiedene Verfahren zur Testung der Verbundfestigkeit lassen sich untereinander nur in Bezug auf die Rangfolge der Messergebnisse, nicht jedoch in Hinblick auf die absoluten Werte vergleichen (Oilo 1993; Ahlers 2006; Heintze & Zimmerli 2011c). Kritische Analysen sehen bezüglich der

Laborprüfmethode häufig nur eine geringe Korrelation zu den klinischen Daten (Heintze & Zimmerli 2011c).

Bei der Scherkraftmessung werden Kompositzylinder auf plan geschliffene Oberflächen aus Zahnhartsubstanz oder Kunststoff aufgeklebt und mit einer Universalprüfmaschine abgeschert. Dabei wird die Kraft (N) gemessen, die nötig ist, um den Kompositzylinder vom Substrat zu lösen. Als Nachteil wird bei dieser Versuchsform die Stressverteilung angesehen, da an der Stelle, an der der Prüfstempel aufliegt, sehr hohe Kräfte auf den Prüfkörper einwirken (Heintze & Zimmerli 2011c).

Bei einer Zugprüfung werden Kompositzylinder auf eine plane Oberfläche geklebt und dann abgezogen. Für den Mikrozugversuch spricht, dass man bei der Testung des Haftverbunds auf Zahnhartsubstanz weniger extrahierte Zähne benötigt, allerdings ist die Methode sehr aufwändig und techniksensitiv. Außerdem kommt es, da die Prüfkörper in sehr schmale Stäbchen gesägt werden, oft zu Spontanfrakturen. Die Haftwerte sind im Vergleich zu anderen Testverfahren höher, da die Klebefläche kleiner ist (Heintze & Zimmerli 2011c).

Eine 2013 veröffentlichte Übersichtsarbeit von *Hickel et al.* macht deutlich, dass die Anzahl der Studien zur Reparatur defekter Restaurationen, die einen Schertest benutzen, die übersteigt, die sich für einen Mikrozugversuch entschieden hatten (Hickel et al. 2013). Ein Grund dafür mag sein, dass der „Technische Bericht“ ISO TR 11405 aus dem Jahr 1994 zur Prüfung der Haftung auf Zahnhartsubstanzen und der Messung der Verbundhaftung eine Scherbelastungsprüfung oder alternativ einen Biegebruchversuch vorsieht. Die im Jahr 2001 aktualisierte ISO-Norm TS 11405 empfiehlt die Prüfung der Haftfestigkeit durch einen Zug- oder Scherversuch (Ahlers 2006). Daraus wird ersichtlich, dass lediglich die Scherbelastungsprüfung seit vielen Jahren als aussagekräftige Messmethode angesehen wird, da sie im neuen Bericht von 2001 nicht durch ein anderes Verfahren ersetzt wurde. Zudem kam *Anusavice* bei der Untersuchung des Verbundes von Metall-Keramik-Systemen mit

zwölf verschiedenen Scher-, Biegebruch- und Zugspannungsprüfverfahren zu dem Ergebnis, dass der Scherversuch mit rechteckiger ebener Prüffläche einem idealen Prüfverfahren am zweitnächsten kommt. Nur die Scherbelastungsprüfung mit schräger Prüffläche schnitt besser ab (Anusavice 1984). Diese steht allerdings nicht im Einklang mit den normativen Vorgaben nach ISO (Ahlers 2006), weshalb in der vorliegenden Arbeit eine ebene Prüffläche zum Einsatz kam.

Bei Schertests treten neben Druckkräften auch Zugkräfte auf (Rasmussen 1996). Das auftretende Biegemoment ist umso größer, je weiter der Ort der Krafteinleitung von der Ebene der Grenzfläche entfernt ist. Um die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Zugspannungsrissen (Anusavice 1984) zu senken, wurde für die vorliegende Studie der Abstand zwischen Substratoberfläche und Prüfstempel so gering wie möglich gewählt. *Tiller et al.* zufolge weist die Scherfestigkeitsprüfung die größte Praxisrelevanz auf, da sie die kaufunktionellen Belastungsformen, die in der Mundhöhle wirken, am besten zu simulieren vermag (Tiller et al. 1988). Es ist also hinsichtlich der klinischen Relevanz nicht als negativ zu bewerten, dass durch die Verwindung des Reparaturzylinders neben der parallel gerichteten reinen Scherkraft auch Biege-, Druck- und Zugkräfte auftreten können (Oilo 1993), da dies auch bei intraoralen Restaurationen vorkommen kann. Derzeit wird an der Etablierung einer neuen ISO-Norm gearbeitet, die die Ultradent-Methode empfiehlt. Diese beinhaltet einen Schertest mit einem an der Spitze nicht planen, sondern halbrund geformten Prüfstempel, welcher den Prüfzylinder halbseitig umfasst und somit die Stressverteilung verbessern soll (Pecora et al. 2002; Heintze 2013).

Bei der Durchführung des Schertests für die vorliegende Studie wurde die Substratfüllung mit dem darauf befindlichen Reparaturzylinder im sie umgebenden Stahlzylinder fest in die Einspannvorrichtung der Universalprüfmaschine eingespannt. Somit wurde kein Bewegungsspielraum für den Prüfkörper zugelassen. Der Prüfstempel bewegte sich mit einer

Geschwindigkeit von 0,5 mm/min parallel zur Substratoberfläche und senkrecht zum Reparaturzylinder nach unten. Der Abstand zur Substratoberfläche wurde so gering wie möglich gewählt, damit die Kraft nah an der Verbundfläche angreifen und unerwünschte Drehmomente minimiert werden konnten.

Dies deckt sich mit der gängigen Praxis bei Scherkraftmessungen. In der Literatur finden sich hauptsächlich Angaben zu einer Vorschubgeschwindigkeit von 0,5 mm/min (Boyer et al. 1984; Brosh et al. 1997; Pecora et al. 2002; Ahlers 2006; Ivanovas et al. 2011; Baur & Ilie 2012). Es existieren jedoch auch Studien, deren Autoren Schertests mit einer Geschwindigkeit von 1 mm/min durchführten (Brendeke & Özcan 2007; Yesilyurt et al. 2009; Rinastiti et al. 2011). Die Vorschubgeschwindigkeit des Prüfstempels beeinflusst die Testergebnisse (Lindemuth & Hagge 2000). *Eliades et al.* fanden heraus, dass eine zunehmende Belastung durch eine höhere Vorschubgeschwindigkeit (200 mm/min im Vergleich zu 1mm/min) zu einer Abnahme der Haftfestigkeit führte. Die Autoren nehmen an, dass dies möglicherweise auf das Auftreten einer Festkörperreaktion und die Elimination der viskoelastischen Eigenschaften des Komposits zurückzuführen ist (Eliades et al. 2004).

In früheren Studien wurde festgestellt, dass höher gefüllte Komposite als Reparaturmaterial zu niedrigeren Haftfestigkeiten führten. Dies wurde auf eine schlechtere Benetzbarkeit aufgrund des hohen Füllkörperanteils zurückgeführt (Baur & Ilie 2012). Es wurden bei der Reparatur von hochgefüllten Kompositen mit sich selbst vorwiegend adhäsive und gemischte Frakturen beobachtet (Loomans et al. 2011). In der vorliegenden Studie jedoch erwies sich das von den untersuchten Materialien am höchsten gefüllte Komposit Clearfil Majesty Posterior in absoluten und relativen Zahlen als erfolgreichstes Reparaturmaterial. Diese Beobachtung steht in Einklang mit einer Untersuchung von *Boyer et al.*, in der hoch gefüllte Komposite die höchsten Haftfestigkeitswerte erreichten (Boyer et al. 1984).

Leloup et al. stellten fest, dass der Haftverbund sich umso stärker gestaltete, je höher der Elastizitätsmodul (E-Modul) der getesteten Materialien war (Leloup et al. 2001). Generell gilt, dass Restaurationsmaterialien einen möglichst ähnlichen Elastizitätsmodul aufweisen sollten wie die zu ersetzenden Zahnhartsubstanzen. Komposite für Seitenzahnfüllungen sollten einen Elastizitätsmodul von mindestens 18 Gigapascal aufweisen, was ungefähr dem Elastizitätsmodul von Dentin entsprechen soll (Willems et al. 1992). Der E-Modul korreliert wiederum positiv mit dem Volumenanteil der Füllstoffe (Masouras et al. 2008).

In der vorliegenden Untersuchung zeigte das erfolgreichste Reparaturmaterial, Clearfil Majesty Posterior, sowohl den höchsten E-Modul (31,35 GPa nach Universalhärteversuch) als auch den höchsten Füllstoffgehalt (82 Vol.%). Unter den homotypen Reparaturen erreichte ebenfalls Clearfil Majesty Posterior den höchsten Haftfestigkeitsmittelwert (27,7 MPa). Bei Betrachtung der Haftfestigkeiten der positiven Kontrollgruppen zeigte allerdings SonicFill den höchsten Mittelwert (45,3 MPa), obwohl es nur den zweithöchsten E-Modul (15,93 GPa nach Universalhärteversuch, Ilie et al. 2013) der untersuchten Materialien besitzt, gefolgt von Clearfil Majesty Posterior (38,2 MPa). Der größte Einfluss des Reparaturmaterials auf die Scherhaftfestigkeit wurde auch ausgeübt, wenn als Substratmaterialien Clearfil Majesty Posterior oder SonicFill verwendet worden waren. Da bisher keine Angaben zum Volumenanteil der Füller bei SonicFill vorliegen, ließe sich in Anlehnung an *Masouras et al.* (Masouras et al. 2008) schließen, dass es nach Clearfil Majesty Posterior auch den zweithöchsten Füllstoffgehalt besitzen muss. Allerdings weist Clearfil Majesty Esthetic, das Material mit dem niedrigsten E-Modul (9,38 GPa nach Universalhärteversuch), nach Herstellerangaben einen höheren Volumenanteil an Füllern (66 Vol.%) auf als Grandioso Flow (65 Vol.%, E-Modul nach Universalhärteversuch = 15,21 GPa). Dies könnte daran liegen, dass Clearfil Majesty Esthetic Füllstoffe aus Vorpolymerisaten enthält, die zum gesamten Füllstoffanteil hinzugezählt werden, effektiv aber nicht wie die anorganischen

Füller zu einem höheren E-Modul beitragen. Der geringe E-Modul von Clearfil Majesty Esthetic könnte auch erklären, warum das Substratmaterial den größten Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit ausübte, wenn die Reparatur mit Clearfil Majesty Ethetic durchgeführt worden war.

Es korrelieren im vorliegenden Fall somit die Reihenfolgen der Materialien und deren Füllstoffanteile und E-Moduli nicht vollständig. Schlüsse zum Füllstoffgehalt von SonicFill lassen sich auf diese Weise also nur unter Vorbehalt ziehen. Außerdem weist SonicFill für ein Bulk-Fill-Komposit zwar einen überdurchschnittlich hohen E-Modul auf, allerdings geht aus einer Arbeit von *Ilie et al.* hervor, dass Bulk-Fill-Materialien im Vergleich zu anderen Mikro- und Nano-Hybrid-Kompositen insgesamt einen niedrigeren Füllstoffgehalt besitzen (Ilie et al. 2013). Man muss jedoch berücksichtigen, dass in der Studie von *Ilie et al.* nicht zwischen hoch- und niedrigviskösen Bulk-Fill-Kompositen unterschieden wurde. Die hohe Viskosität von SonicFill weist eher auf einen höheren Füllstoffanteil hin.

Estelite Sigma Quick, das nach Herstellerangaben im Vergleich der fünf verwendeten Werkstoffe den niedrigsten (8,6 GPa), nach Universalhärteversuch (11,54 GPa) und Drei-Punkt-Biegeversuch (5,18 GPa) (Ilie et al. 2012) jedoch den zweitniedrigsten E-Modul aufweist, erzielte den niedrigsten Haftfestigkeitsmittelwert der Kontrollgruppen (29,1 MPa). Somit lässt sich zumindest die Beobachtung von *Leloup et al.* zum Großteil bestätigen.

Die Unregelmäßigkeiten könnten darauf zurückzuführen sein, dass der Elastizitätsmodul bei einigen Kompositen während der Alterung aufgrund von Wasseraufnahme abnimmt (Özcan et al. 2007). Der Verbund zwischen Füllerpartikeln und Matrix kann zudem durch die Wasseraufnahme reduziert werden. Ungebundene Füller können dann aufgrund erhöhter Spannungskonzentration zu vermehrter Rissbildung führen. Die Absorption von Wasser kann also in einer geringen Abnahme der Deformationsresistenz des Materials resultieren (Braem et al. 1994).

Kompositrestaurationen sind auch anderen Alterungsprozessen unterworfen. Dazu gehört, dass die polierte Oberfläche aufgrund chemisch-mechanischer Degradation rauer werden und ihren Glanz verlieren kann. Außerdem können exogene Farbpigmente ein- oder angelagert werden (Heintze & Zimmerli 2011b), wie es in der vorliegenden Studie bei Clearfil Majesty Posterior der Fall war. Das Austreten von Monomeren aus Kompositmaterialien beeinflusst deren Biokompatibilität (Spahl et al. 1998; Polydorou et al. 2009). Die Zytotoxizität gründet sich zum Einen auf die kurzfristige Freisetzung freier Monomere während der Monomer-Polymer-Konversion. Auf lange Sicht gesehen spielen auch Erosion und Degradation als Auslöser für Monomerfreisetzung sowie das Austreten von Ionen und Additiva, wie Initiatoren, Inhibitoren und Stabilisatoren, eine Rolle (Goldberg 2008; van Landuyt et al. 2011). Neben den hydrolytischen Effekten haben sich dentale Polymere als anfällig für hygroskopische Vorgänge erwiesen, deren Ausmaß ebenfalls von der chemischen Zusammensetzung und Struktur des Komposits abhängt. Diese Faktoren können zu einer reduzierten Lebensdauer einer Restauration beitragen. Es ist wichtig, diese Alterungsprozesse unter Laborbedingungen zu simulieren, da sie Einfluss auf die physikalischen und mechanischen Eigenschaften eines Dentalwerkstoffs haben. Dazu zählen Härte, Festigkeit, Verschleiß, Aussehen und Plastifizierung (Ferracane 2006).

Es existieren zahlreiche Methoden zur Lagerung und Alterung von Prüfkörpern. Dabei sollte bedacht werden, dass die Dauer der Alterung mehr Einfluss auf die Haftfestigkeit ausübt als das Lagerungsmedium an sich (Hahnel et al. 2010). Je früher eine Füllung repariert wird, desto besser ist die Haftung (Ivanovas 2011). Mit dem Alter des Substrats sinkt die Anzahl der reaktionsfähigen Doppelbindungen. Daher weisen in der Regel über einen längeren Zeitraum gealterte Proben geringere Reparaturhaftfestigkeitswerte auf als frischere (Ruyter 1981; Vankerckhoven et al. 1982; Maneenut et al. 2011; Rinastiti et al. 2011).

Oft werden thermozyklische Verfahren zur Alterung von Proben angewendet (Brosh et al. 1997; Staxrud & Dahl 2011; Baur & Ilie 2012). Allerdings beeinflusst diese Lagerungsmethode kaum oder gar nicht die Haftfestigkeitsergebnisse des Schertests (Leloup et al. 2001; de Munck et al. 2012).

Ahlers befürwortet, Probenkörper in vitro mindestens zwei Wochen zu lagern, bevor sie repariert und anschließend einer erneuten Lagerung zugeführt werden, da eine Woche nach der Polymerisation die Verbundhaftung zunächst sinkt und danach wieder ansteigt. Er hält dies für wichtig, um Fehlinterpretationen zu vermeiden, die nicht allein auf die geprüften Faktoren zurückgehen (Ahlers 2006). Auch in einer weiteren Studie wurde herausgefunden, dass die Haftfestigkeit von Reparaturen aus methacrylatbasierten Kompositen im Verlauf eines Monats zunimmt (Ivanovas 2011). Eine Studie zur Relevanz von in-vitro-Untersuchungen aus dem Jahr 2011 empfiehlt eine Wasserlagerung der Prüfkörper von einigen Monaten, da dies den Voraussagewert bezüglich der klinischen Eignung erhöht. Demnach sind nach 24 Stunden gemessene Werte für den langfristigen Erfolg eines Materials nicht aussagekräftig (Heintze & Zimmerli 2011c). Es wurde zudem beobachtet, dass eine verlängerte Wasserlagerung oder die Lagerung in Alkohol den Elastizitätsmodul erniedrigt (Ilie & Hickel 2009b), was wiederum zu einer erhöhten Anzahl an Randfrakturen der Komposite führen kann (Rasmusson & Lundin 1995).

In Anlehnung an eine große Anzahl an Studien wurde für diese Untersuchung die Lagerung in bidestilliertem Wasser bei einer im Mittel der menschlichen Mundhöhle entsprechenden Temperatur von 37°C gewählt.

Während der Erstellung der Prüfkörper fiel auf, dass das Material Clearfil Majesty Posterior sich nach Ablauf der Lagerungsfrist ungewöhnlich stark verfärbt hatte. Die Wände der die Proben enthaltenden Behälter waren analog der restlichen untersuchten Materialproben mit einem roten, wasserfesten Stift mit dem Namen des entsprechenden Materials gekennzeichnet

worden. Trotz gegenteiliger Werbung durch den Hersteller (Kuraray Home 2013a) wiesen alle Proben des Materials eine rosafarbene Farbveränderung auf, was bei keinem der anderen Werkstoffe beobachtet werden konnte. Dies könnte an Mikroporositäten innerhalb des Materials liegen, die die Einlagerung von Farbpigmenten begünstigten. Allerdings scheint dadurch der gute Verbund bei Reparaturen mit Cleafil Majesty Posterior nicht beeinträchtigt worden zu sein.

Geht man von einem in der Literatur genannten Richtwert von 18-20 Megapascal aus (Puckett et al. 1991), die die Verbundfestigkeit einer reparierten Füllung erreichen sollte, um intraoralen Kaukräften standhalten zu können, kommt man zu dem Ergebnis, dass folgende Kombinationen nach ihren Haftfestigkeitsmittelwerten für den klinischen Einsatz erfolgversprechend sein könnten:

Tabelle 14: Materialkombinationen mit Haftfestigkeitsmittelwerten über 18 MPa

Substratmaterial	Reparaturmaterial	Schallaktivierung	Scherhaftfestigkeit in MPa
Grandioso Flow	Clearfil Majesty Posterior	nein	26,7
	Clearfil Majesty Posterior	ja	26,3
	SonicFill	ja	22,9
	Grandioso Flow	nein	22,0
	SonicFill	nein	21,9
Clearfil Majesty Posterior	Clearfil Majesty Posterior	nein	27,7
	Clearfil Majesty Posterior	ja	23,7
	SonicFill	nein	19,4
Clearfil Majesty Esthetic	Clearfil Majesty Posterior	nein	28,1
	SonicFill	nein	23,1
	Clearfil Majesty Posterior	ja	23,1
	Grandioso Flow	nein	22,0
	Clearfil Majesty Esthetic	nein	21,6
	Estelite Sigma Quick	nein	20,2
	Grandioso Flow	ja	19,4
	SonicFill	ja	18,3
Estelite Sigma Quick	Clearfil Majesty Posterior	ja	19,7
	SonicFill	nein	18,4
	SonicFill	ja	18,4
SonicFill	Clearfil Majesty Posterior	ja	26,7
	Grandioso Flow	nein	26,4
	Clearfil Majesty Posterior	nein	24,3
	SonicFill	ja	21,0
	SonicFill	nein	20,9
	Clearfil Majesty Esthetic	ja	20,0
	Grandioso Flow	ja	19,3
	Estelite Sigma Quick	ja	19,1
	Clearfil Majesty Esthetic	nein	18,4

Weder SonicFill noch eines der anderen Reparaturmaterialien zeigten konstant bessere Haftfestigkeitswerte bei Einsatz der Schallaktivierung als bei konventioneller Verarbeitung. Allerdings wies Estelite Sigma Quick als Reparaturmaterial insgesamt bei schallaktivierter Reparatur bessere Haftfestigkeitswerte auf. Dies könnte man auf die besondere Form der

Füllkörper des Materials zurückführen, welche einen Durchmesser von 0,2 µm besitzen und kugelförmig geformt sind. Letzteres ist auch auf dem mithilfe des Rasterelektronenmikroskops aufgenommenen Bild deutlich erkennbar.

Die zum Teil sehr viel schlechteren Haftfestigkeitswerte von Grandioso Flow als Reparaturmaterial bei Schallaktivierung als bei herkömmlicher Verarbeitungsweise lassen sich wahrscheinlich unter anderem auf die Tatsache zurückführen, dass das bereits schon von vornherein sehr niedrig-visköse Material bei weiterer Verflüssigung durch Schall sehr schwierig zu dosieren und applizieren war und es oft zu Luftblasen bei der Applikation kam. Dies führte wohl auch zu der relativ hohen Streuung der Messwerte.

Einige Komposite eignen sich möglicherweise aufgrund ihrer Füllkörperzusammensetzung oder -menge nicht für den Einsatz von Schall zur Verringerung der Viskosität. Eine merkliche Verflüssigung im Vergleich zum Normalzustand wiesen außer SonicFill noch Estelite Sigma Quick, Clearfil Majesty Esthetic und Grandioso Flow auf, die drei Materialien mit dem niedrigsten Volumenanteil an Füllern und den niedrigsten E-Moduli. Die Mikroskop-Bilder von SonicFill, die einen Überblick über die Füllkörperverteilung sowie deren Größe und Form gaben, ähnelten allerdings denen von Grandioso Flow und Clearfil Majesty Posterior am meisten. Bei der Applikation von Clearfil Majesty Posterior erschien dieses subjektiv wahrgenommen als kaum oder gar nicht verflüssigt. Auf den Übersichtsbildern zeigten sich dessen Füllkörper allerdings, wenn auch möglicherweise in anderer Zusammensetzung, in Verteilung, Form und Größe denen von SonicFill als sehr ähnlich. Eventuell spielt also der Füllstoffgehalt eine größere Rolle als der Aufbau des Fülleranteils. Nach Herstellerangaben besitzt SonicFill einen Füllstoffgehalt von 83,5 Gewichtsprozent. Davon weicht Clearfil Majesty Posterior mit einem Füllkörperanteil von 92 Gewichtsprozent, beziehungsweise 82 Volumenprozent, von allen untersuchten Materialien am meisten ab. Gleichzeitig stellt es den

Werkstoff dar, der am wenigsten Viskositätsveränderung bei Benutzung des SonicFill-Handstücks zeigte.

Dass SonicFill bei der Reparatur unter Schallaktivierung teilweise niedrigere Haftfestigkeitswerte erbrachte als bei herkömmlicher Verarbeitung, wirft weitere Fragen auf. Bei der Handhabung fiel auf, dass die Extrusion des Materials im Vergleich zu den anderen unter Schallaktivierung eingebrachten Materialien und zu Vorversuchen auf Stufe fünf des Handstücks sehr langsam vonstattenging und die Oberfläche des Materials sich sehr inhomogen gestaltete. Für die vorliegende Studie kam jedoch Stufe 1 zur Anwendung, da diese laut Hersteller die größte Verflüssigung verspricht. Das Material wies eine subjektiv als hoch empfundene Klebrigkeit zwar sowohl an schon ausgehärteten Kompositschichten, als aber auch an der Applikationskartusche auf. Diese Beobachtungen stehen im Widerspruch zu den vom Hersteller beworbenen Verarbeitungseigenschaften (Kerr SonicFill 2013).

Dennoch konnte ein großer Viskositätsunterschied zwischen konventionell und unter Schalleinsatz verarbeitetem Material festgestellt werden. Es ließ sich eine deutliche Verflüssigung auf allen Stufen des Handstücks im Vergleich zum sehr hoch viskösen Ausgangszustand beobachten. SonicFill ließ sich nur mit erhöhtem Kraftaufwand konventionell verarbeiten, da es im ursprünglichen Zustand eine sehr hohe Viskosität aufweist.

Das Material zeigt also zwar eine reduzierte Viskosität bei Aktivierung durch Schall, die aber nicht zwingend zu verbesserten Haftfestigkeiten bei Reparaturen führt, zumindest nicht bei plan gestalteten Oberflächen.

Besonders bei der Reparatur von Clearfil Majesty Esthetic und Posterior zeigten sich bei schallaktivierter Anwendung niedrigere Haftfestigkeitswerte. Die Haftung des verflüssigten und unter Umständen daher klebrigeren Reparaturkomposits an der SonicFill-Applikationskanüle kann zu Lufteinschlüssen und Porositäten innerhalb der Reparaturschicht

geführt haben, die besonders nahe der Verbundschicht zu niedrigeren Scherhaftfestigkeitswerten geführt haben, da die Haftfläche insgesamt verkleinert wurde.

Es erfolgt beim manuellen Legen beziehungsweise Stopfen und Formgeben einer Füllung auch immer die Applikation externer Kräfte auf das Material. Möglicherweise reicht diese manuelle Manipulation während des Einbringens von Füllungsmaterialien schon aus, um deren thixotrope Eigenschaften zu aktivieren, sodass eine Schallaktivierung überflüssig ist. Außerdem ist es möglich, dass zusätzlich die in der Mundhöhle herrschenden höheren Temperaturen zu einer geringen Viskositätsverminderung von Kompositen führen (Lee et al. 2006). Die Klebrigkeit reduziert sich zudem bei der Bearbeitung des Materials mit schnellen Bewegungen (Leinfelder et al. 1999). Somit könnte das Material bei der manuellen Reparaturmethode weniger stark am Füllungsinstrument haften geblieben sein, womit Lufteinschlüsse eventuell vermieden oder reduziert werden konnten. Abbildung 19 zeigt die Bruchfläche einer adhäsiven Fraktur bei konventionell verarbeitetem Komposit (Estelite Sigma Quick). Es kam also auch bei der manuellen Applikation zu Lufteinschlüssen, die in diesem Fall, da sie sich auf Höhe der Verbundfläche manifestierten, zur Entstehung der adhäsiven Fraktur beigetragen haben können. Dies scheint in besonderem Maße bei dem Material Estelite Sigma Quick der Fall gewesen zu sein, sowohl bei konventioneller als auch bei schallaktivierter Verarbeitung. Laut *Hansen und Asmussen* kann eine übermäßige Manipulation des Komposits bei der Füllung einer Kavität zur vermehrten Bildung marginaler Porositäten und zur Vergrößerung von schrumpfungsbedingten Randspalten führen (Hansen & Asmussen 1989).

Es ist vorstellbar, dass schallaktivierte Reparaturen in vivo bessere Ergebnisse liefern, wenn die zu reparierende Fläche Unterschnitte und Unebenheiten, also die Möglichkeit zur Makroretention, aufweist. So können marginale Stellen der Kavität mit einem schallverflüssigten Material aufgrund der Fließfähigkeit und besseren Benetzungsfähigkeit

eventuell besser ausgefüllt werden. Demnach könnte man auch auf einen fließfähigen Liner zur Verbesserung der Adaptation an Kavitätenwände verzichten und Randspalten mit einem fließfähigen Material auffüllen, das gleichzeitig gute mechanische Eigenschaften aufweist. In dieser Studie wurde jedoch eine plan geschliffene Oberfläche verwendet, die keine makroretentiven Verankerungsflächen bot.

Weitere Untersuchungen zur Eignung verschiedener Komposite zur Verflüssigung durch Schallaktivierung und den dabei stattfindenden chemischen und physikalischen Veränderungen sind notwendig. Ebenso sollte die Haftung schallaktiviert reparierter Füllungen an Zahnhartsubstanz Gegenstand nachfolgender Studien sein. Dabei ist zu empfehlen, besonderes Augenmerk auf die Reparatur von Randspalten und anderen Kavitäten zu legen, die Unterschnitte aufweisen oder zum Erreichen der Benetzung aller Kavitätenwände eines fließfähigen Materials bedürfen.

7. Schlussfolgerungen

- Das SonicFill-Handstück ist mit anderen Kompositen als SonicFill kombinierbar. Eine subjektiv wahrnehmbare Verflüssigung trat außer bei SonicFill ebenfalls bei Clearfil Majesty Esthetic, Estelite Sigma Quick und Grandioso Flow auf. Für letzteres ist das System aufgrund der sehr niedrigen Viskosität und schwierigen Handhabung nicht zu empfehlen.
- Es lassen sich von der Verteilung, Größe und Form der Füllkörper nicht direkt Rückschlüsse auf die Eignung eines Komposits zur Viskositätsverminderung durch Schalleinsatz ziehen. Es gibt jedoch Hinweise darauf, dass ein höherer Volumenanteil an Füllern zu einer reduzierten Viskositätsverringerung unter Schalleinsatz führt.
- Es bestehen bei den Reparaturmaterialien Grandioso Flow, Clearfil Majesty Posterior und SonicFill signifikante Unterschiede zwischen den Haftfestigkeitsmittelwerten bei herkömmlicher und schallaktivierter Reparatur. Letztere ergab insgesamt bei diesen Materialien sowie bei Clearfil Majesty Esthetic niedrigere Mittelwerte als nach konventionellem Vorgehen.
- Estelite Sigma Quick ist das einzige der untersuchten Materialien, das einen höheren Haftfestigkeitsmittelwert bei schallaktivierter Reparatur zeigt als bei herkömmlicher.
- Die homotype Reparatur ist der heterotypen nicht überlegen.

- Die Wahl des Reparaturmaterials übt einen größeren Einfluss auf die Scherhaftfestigkeit aus als das Substratmaterial. Dies bedeutet für den behandelnden Zahnarzt die Möglichkeit zur Einflussnahme auf den Erfolg einer Reparatur.
- Der höchste Mittelwert für die Verbundhaftfestigkeit konnte mit der Kombination Clearfil Majesty Esthetic als Substratmaterial repariert mit Clearfil Majesty Posterior ohne Schallaktivierung erreicht werden (28,1 MPa).
- Clearfil Majesty Posterior erwies sich als das Reparaturmaterial, das die höchsten Mittelwerte für die Haftfestigkeit erzielte. Clearfil Majesty Esthetic als Substratmaterial erreichte den höchsten Haftfestigkeitsmittelwert, wenn es auf herkömmliche Weise repariert wurde.
- Mit den untersuchten homotypen Reparaturkombinationen wurden 41,6 - 72,5 % der Inkrementellen Verbundfestigkeiten der jeweiligen Komposite erzielt. Clearfil Majesty Posterior erreichte die besten Ergebnisse (62,1 % bei schallaktivierter Reparatur und 72,5 % bei konventioneller Reparatur).
- Adhäsive Frakturverläufe traten vorwiegend bei niedrigen Verbundfestigkeiten auf, während gemischte und kohäsive Frakturmodi vor allem in Zusammenhang mit hohen Scherhaftfestigkeitswerten beobachtet werden konnten.
- Ist dem praktizierenden Zahnarzt das Material der zu reparierenden Füllung unbekannt oder handelt es sich um Grandioso Flow, Clearfil Majesty Posterior oder Clearfil Majesty Esthetic, ist die Wahl eines Materials mit hohem Elastizitätsmodul als

Reparaturkomposit in konventioneller Verarbeitungsweise zu empfehlen. Dieses Vorgehen erfordert nicht das Vorhandensein eines passenden Handstücks zur Schallaktivierung und ist somit universell durchführbar. Bei der Reparatur von Estelite Sigma Quick lassen sich jedoch mit der schallaktivierten Applikation von Clearfil Majesty Posterior die höchsten Haftfestigkeiten erzielen. Dies gilt auch für die Reparatur von Füllungen aus SonicFill. Alternativ kann man hier aber mit Grandioso Flow in herkömmlicher Applikationsweise ähnlich gute Ergebnisse erreichen.

8. Zusammenfassung

Mit der Etablierung der adhäsiv befestigten Komposite in der Zahnheilkunde wurde ein Weg hin zu minimalinvasiven Therapieansätzen eingeschlagen. Die Schonung der Zahnhartsubstanz rückte in den Mittelpunkt (Tyas et al. 2000). Allerdings weisen auch diese modernen zahnärztlichen Werkstoffe nur eine begrenzte Lebensdauer auf. Zahnärzte verbringen einen Großteil ihrer Behandlungszeit mit der Erneuerung defekter oder insuffizienter Füllungen (Fernández et al. 2011). Mit jeder Re-Restoration geht jedoch wertvolle Zahnhartsubstanz verloren, was zur Gefährdung der Integrität der Pulpa und somit zur Notwendigkeit weiterer zeitintensiver und für den Patienten ökonomisch sowie psychisch belastender Therapiemaßnahmen führen kann. Eine Möglichkeit, diese Entwicklung aufzuhalten oder zumindest zu verlangsamen ist, partiell insuffiziente Restaurationen nicht sofort zu erneuern, sondern, wenn möglich, zu reparieren (Kamann & Gängler 2000). Die vorliegende Arbeit soll zum bisherigen Wissensstand über die Kompatibilität verschiedener (methacrylatbasierter) Komposite beitragen und eine Entscheidungshilfe für oder gegen bestimmte Reparaturmaterialien- und Methoden darstellen. Als neuer Ansatzpunkt wurde der Einsatz von Schallaktivierung zur Reduzierung der Viskosität und Veränderung des Fließverhaltens der Reparaturkunststoffe untersucht.

Die fünf methacrylatbasierten Komposite Grandioso Flow (Voco), Clearfil Majesty Posterior (Kuraray), Clearfil Majesty Esthetic (Kuraray), Estelite Sigma Quick (Tokuyama) und SonicFill (Kerr) fanden jeweils als Substrat- und Reparaturmaterial Verwendung. Sie wurden sowohl mit sich selbst als auch mit jedem der vier anderen Kunststoffe kombiniert. Eine Hälfte der zylinderförmigen Proben wurde auf konventionelle Art mithilfe von Handinstrumenten hergestellt, bei der anderen Hälfte kam das Handstück SonicFill zur schallaktivierten Applikation des Reparaturmaterials zum Einsatz. Als Haftvermittler dienten

ein Silane Primer und ein Adhäsiv (Optibond FL, beide Kerr). Vor der Reparatur wurden die Proben zwei Monate in bidestilliertem Wasser bei 37°C einem artifiziellen Alterungsprozess unterworfen. Anschließend wurden die Oberflächen mit Siliziumkarbidpapier der Körnung 400 angeraut und mit Phosphorsäure gereinigt. Nach Auftragen der Haftvermittler und der neuen Kompositschichten erfolgte erneut eine Lagerung über zwei Monate in bidestilliertem Wasser. Um vergleichende Aussagen treffen zu können, wurden positive Kontrollgruppen für alle Restaurationsmaterialien hergestellt. Zur Evaluierung der Haftfestigkeit des Verbundes wurde ein Makro-Scherversuch durchgeführt.

Es stellte sich heraus, dass verschiedene Materialkombinationen zu sehr unterschiedlichen Haftfestigkeitswerten führten. Mehrere Kombinationen überschritten den in der Literatur genannten Richtwert von 18-20 Megapascal (Puckett et al. 1991) und könnten möglicherweise somit intraoral erfolgreich für Reparaturen eingesetzt werden. Der Einfluss des Reparaturmaterials auf die Scherhaftfestigkeit (partiell η -Quadrat = 0,219) war höher als der des Substratmaterials (partiell η -Quadrat = 0,126) und des Schalleinsatzes bei der Verarbeitung des Reparaturwerkstoffes (partiell η -Quadrat = 0,015). Dies bedeutet für den behandelnden Zahnarzt die Möglichkeit, den Erfolg einer Reparatur selbst beeinflussen zu können.

Insgesamt erwies sich Clearfil Majesty Posterior als das Reparaturmaterial, welches sowohl relativ zur Kontrollgruppe gesehen als auch in absoluten Zahlen die höchsten Werte erzielte. Es war gleichzeitig das am höchsten gefüllte der untersuchten Materialien. Diese Beobachtung steht in Widerspruch zu den Ergebnissen einer früheren Studie, wonach hochgefüllte Komposite aufgrund schlechterer Benetzungsfähigkeit zu niedrigeren Haftfestigkeiten führten (Baur & Ilie 2012), jedoch in Übereinstimmung mit der Untersuchung von Boyer et al. (Boyer et al. 1984). Betrachtet man die Frakturmuster der abgescherten Proben, fällt auf, dass es hauptsächlich zu adhäsiven Brüchen kam. Gemischte

und kohäsive Brüche traten vor allem in Zusammenhang mit hohen Haftfestigkeitswerten auf. Sie häuften sich bei den Proben der positiven Kontrollgruppen. Außerdem fiel auf, dass gleich hohe Haftfestigkeitswerte nicht immer auch zu identischen Frakturverläufen führten, wie auch *Maneenut et al.* schon beobachtet hatten (Maneenut et al. 2011).

Im Einklang mit den Ergebnissen anderer Autoren (Gregory et al. 1990; Maneenut et al. 2011) schnitten in der vorliegenden Untersuchung homotype Reparaturen insgesamt nicht besser ab als heterotype. Die bei homotypen Reparaturen erzielten Haftfestigkeitswerte variierten zwischen 41,6 % und 72,5 % der kohäsiven Mittelwerte.

Bei der Verarbeitung der Materialien ließ sich feststellen, dass nicht alle Materialien gleichermaßen durch die Schallaktivierung beeinflusst wurden. Clearfil Majesty Posterior zeigte kaum eine Veränderung der Viskosität. Da sich SonicFill von Clearfil Majesty Posterior den Füllstoffgehalt nach Herstellerangaben betreffend im Vergleich mit den anderen drei Materialien am meisten unterscheidet, könnte der Füllstoffgehalt eines Komposits bei der Verwendung von Schall zur Viskositätsveränderung eine größere Rolle spielen als die Zusammensetzung und Gestalt der Füllkörper.

Nur Estelite Sigma Quick zeigte als Reparaturmaterial insgesamt bessere Ergebnisse nach schallaktiviert durchgeführter Reparatur. Möglicherweise lässt sich diese Beobachtung auf den Aufbau der Füllerfraktion zurückführen. Die Füllkörper wiesen eine nahezu einheitliche Größe und kugelförmige Form auf, wodurch sich Estelite Sigma Quick stark von den anderen Materialien unterschied. Auch SonicFill, ein Material, das für den Einsatz mit dem SonicFill-Handstück entwickelt wurde, lieferte höhere Haftfestigkeitswerte bei konventioneller Verarbeitung. Dies lässt sich eventuell darauf zurückführen, dass für die vorliegende Studie eine plan geschliffene Substratoberfläche ohne Möglichkeit zur Makroretention verwendet wurde. Andererseits reicht die manuelle Bearbeitung eines Komposits durch Edelmetallinstrumente möglicherweise bereits aus, um die thixotropen Eigenschaften des

Materials schon in ausreichendem Maße zu aktivieren und die Fließeigenschaften sowie die Benetzung der Oberfläche optimal zu modifizieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass einige Komposite das Potential zur Viskositätsverringering durch den Einsatz eines Schallhandstücks aufweisen. Die Empfehlung, diese Methode zur Reparatur einzusetzen, kann jedoch nur eingeschränkt und teilweise für das Material Estelite Sigma Quick oder die schallaktivierte Reparatur von Füllungen aus Estelite Sigma Quick und SonicFill mit Clearfil Majesty Posterior erfolgen. In den meisten Fällen ist Clearfil Majesty Posterior (konventionell verarbeitet) als Reparaturmaterial zu empfehlen. Weitere Studien an Zahnhartsubstanz und Kavitäten, die die Möglichkeit zur Makroretention aufweisen und bessere Fließeigenschaften des Reparaturmaterials verlangen, sollten folgen. Ebenso sollte näher untersucht werden, welche physikalischen und chemischen Auswirkungen die Schallaktivierung auf Dentalkunststoffe hat.

9. Literaturverzeichnis

Abbas G, Fleming GJP, Harrington E, Shortall ACC, Burke FJT (2003) Cuspal movement and microleakage in premolar teeth restored with a packable composite cured in bulk or in increments. *Journal of Dentistry* 31: 437–444.

Abe Y, Lambrechts P, Inoue S, Braem MJA, Takeuchi M, Vanherle G, van Meerbeek B (2001) Dynamic elastic modulus of ‘packable’ composites. *Dental Materials* 17: 520–525.

Ahlers MO (2006) Intraorale Reparatur zahnfarbener Restaurationen aus Composite-Füllungswerkstoffen. Schlütersche, Hannover.

Ahlers MO, Platzer U, Duschner H (1996) Confocal laser scanning microscopy: repair bonding agent penetration into composite. *Journal of Dental Research* 75: 237.

Akimoto N, Sakamoto T, Kubota Y, Kondo Y, Momoi Y (2011) A novel composite-to-composite adhesive bond mechanism. *Dental Materials* 30: 523–527.

Al-Sharaa KA, Watts DC (2003) Stickiness prior to setting of some light cured resin-composites. *Dental Materials* 19: 182–187.

Anusavice KJ (1984) Suchtests (Screening Tests) für Metall-Keramik-Systeme. In: McLean JW (Hrsg.) *Dental-Keramik - Vorträge und Diskussionen anlässlich des 1. internationalen Keramik-Symposiums* 371–413. Quintessenz, Berlin.

Anusavice KJ, Phillips RW (2003) *Phillips' science of dental materials*. 11 Saunders, St. Louis, Mo.

Attin T, Buchalla W, Kielbassa AM, Hellwig E (1995) Curing shrinkage and volumetric changes of resin-modified glass ionomer restorative materials. *Dental Materials* 11: 359–362.

Azarbal P, Boyer DB, Chan KC (1986) The effect of bonding agents on the interfacial bond strength of repaired composites. *Dental Materials* 2: 153–155.

Baur V, Ilie N (2012) Repair of dental resin-based composites. *Clinical Oral Investigations*: 1–8.

Bayne SC, Thompson JY, Swift EJ, Stamatiades P, Wilkerson M (1998) A characterization of first-generation flowable composites. *Journal of the American Dental Association*. 129: 567–577.

Bergmann A, Kieschnick A (2009) Komposit – Entscheidend ist die Rezeptur. http://www.dental-online-community.de/images/magazin/artikel/tw5_09_produk-ueberblick.pdf (17.11.2013).

Bertolini JC (1992) Hydrofluoric acid: A review of toxicity. *Journal of Emergency Medicine* 10: 163–168.

Beun S, Bailly C, Dabin A, Vreven J, Devaux J, Leloup G (2009) Rheological properties of experimental Bis-GMA/TEGDMA flowable resin composites with various macrofiller/microfiller ratio. *Dental Materials* 25: 198–205.

Beun S, Bailly C, Devaux J, Leloup G (2008) Rheological properties of flowable resin composites and pit and fissure sealants. *Dental Materials* 24: 548–555.

Beun S, Bailly C, Devaux J, Leloup G (2012) Physical, mechanical and rheological characterization of resin-based pit and fissure sealants compared to flowable resin composites. *Dental Materials* 28: 349–359.

Beun S, Glorieux T, Devaux J, Vreven J, Leloup G (2007) Characterization of nanofilled compared to universal and microfilled composites. *Dental Materials* 23: 51–59.

Blum I, Lynch CD, Schriever AR, Heidemann D, Wilson NH (2011a) Repair versus replacement of defective composite restorations in dental schools in Germany. *Eur J Prosthodont Restor Dent* 19: 56–61.

Blum IR, Jagger DC, Newton JT, Wilson NH (2009) The Opinions of Manufacturers of Resin-Based Composite Materials Towards the Repair of Failing Composite Restorations. *Primary Dental Care* 16: 149–153.

Blum IR, Jagger DC, Wilson NH (2011b) Defective dental restorations: to repair or not to repair? Part 1: direct composite restorations. *Dental Update* 38: 78-80, 82-84.

Blum IR, Schriever A, Heidemann D, Mjör IA, Wilson NH (2003) The repair of direct composite restorations: an international survey of the teaching of operative techniques and materials. *European Journal of Dental Education* 7: 41.

Bonstein T, Garlapo B, Donarummo J, Bush PJ (2005) Evaluation of varied repair protocols applied to aged composite resin. *Journal of Adhesive Dentistry* 7: 41–49.

Bouschlicher MR, Reinhardt JW, Vargas MA (1997) Surface treatment techniques for resin composite repair. *American Journal of Dentistry* 10: 279–283.

Bowen R (1965) Adhesive Bonding of Various Materials to Hard Tooth Tissues. I. Method of Determining Bond Strength. *Journal of Dental Research* 44: 690–695.

Boyer D, Chan K, Reinhardt J (1984) Build-up and Repair of Light-cured Composites: Bond Strength. *Quintessenz International* 63: 1241–1244.

Boyer DB, Chan KC, Torney DL (1978) The strength of multilayer and repaired composite resin. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 39: 63–67.

Braem MJ, Davidson CL, Lambrechts P, Vanherle G (1994) In-Vitro flexural fatigue limits of dental composites. *Journal of Biomedical Materials Research* 28: 1397–1402.

- Brendeke J, Özcan M (2007) Effect of physicochemical aging conditions on the composite-composite repair bond strength. *Journal of Adhesive Dentistry* 9: 399-406.
- Brosh T, Pilo R, Bichacho N, Blutstein R (1997) Effect of combinations of surface treatments and bonding agents on the bond strength of repaired composites. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 77: 122–126.
- Cavalcanti AN, Fonseca Lima A de, Rezende Peris A, Ogata Mitsui FH, Marchi GM (2007) Effect of Surface Treatments and Bonding Agents on the Bond Strength of Repaired Composites. *Journal of Esthetic & Restorative Dentistry* 19: 90–98.
- Chiang Y, Knezevic A, Kunzelmann K (2008) Slumping during sculpturing of composite materials. *Dental Materials* 24: 1594–1601.
- Chiba K, Hosoda H, Fusayama T (1989) The addition of an adhesive composite resin to the same material: Bond strength and clinical techniques. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 61: 669–675.
- Choi KK, Ferracane JL, Hilton TJ, Charlton D (2000) Properties of Packable Dental Composites. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry* 12: 216–226.
- Cipriano TM, Santos JFF (1995) Clinical behavior of repaired amalgam restorations: A two-year study. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 73: 8–11.
- Coppola MN, Ozcan YA, Bogacki R (2003) Evaluation of Performance of Dental Providers on Posterior Restorations: Does Experience Matter? A Data Envelopment Analysis (DEA) Approach. *Journal of Medical Systems* 27: 445–456.
- Croll TP (1990) Repair of defective Class I composite resin restorations. *Quintessenz International* 21: 695–698.

Crumpler DC, Bayne SC, Sockwell S, Brunson D, Roberson TM (1989) Bonding to resurfaced posterior composites. *Dental Materials* 5: 417–424.

Curtis AR, Shortall AC, Marquis PM, Palin WM (2008) Water uptake and strength characteristics of a nanofilled resin-based composite. *Journal of Dental Research* 36: 186–193.

Czasch P, Ilie N (2013) In vitro comparison of mechanical properties and degree of cure of bulk fill composites. *Clinical Oral Investigations* 17: 227–235.

Da Rosa Rodolpho PA, Donassollo TA, Cenci MS, Loguércio AD, Moraes RR, Bronkhorst EM, Opdam NJM, Demarco FF (2011) 22-Year clinical evaluation of the performance of two posterior composites with different filler characteristics. *Dental Materials* 27: 955–963.

Demarco FF, Corrêa MB, Cenci MS, Moraes RR, Opdam NJM (2012) Longevity of posterior composite restorations: Not only a matter of materials. *Dental Materials* 28: 87–101.

DGZ - Deutsche Gesellschaft für Zahnerhaltung - Restaurative Zahnheilkunde (2012). http://www.dgz-online.de/?DGZ-Gesellschaften_%28Wissenschaftliche_Beirat%29:Restaurative_Zahnheilkunde (31.07.2012).

El-Askary FS, El-Banna AH, van Noort R (2012) Repair bond strength of a long-term water-stored nano-hybrid resin composite. *Abstracts of the Academy of Dental Materials Annual Meeting*, 19-22 September 2012, Lake Buena Vista, Florida, USA 28, Supplement 1: e45.

Elderton RJ, Davies JA (1984) Restorative dental treatment in the General Dental Service in Scotland. *British Dental Journal* 157: 196–200.

Eliades T, Katsavrias E, Zinelis S, Eliades G (2004) Effect of Loading Rate on Bond Strength. *Journal of Orofacial Orthopedics/Fortschritte der Kieferorthopädie* 65: 336–342.

Ellakwa A, Cho N, Lee B in (2007) The effect of resin matrix composition on the polymerization shrinkage and rheological properties of experimental dental composites. Dental Materials 23: 1229–1235.

El-Safty S, Silikas N, Watts DC (2012) Creep deformation of restorative resin-composites intended for bulk-fill placement. Dental Materials 28: 928–935.

Ernst C (2006) Die Verwendung von Flow-Kompositen zur Versorgung kleinerer Klasse-V-Kavität. Ästhetische Zahnmedizin 9: 16–20.

Ernst C (2011) Update Komposite: Einführung - Teil 2. Eine Einteilung der Kompositmaterialien. <http://www.zmk-aktuell.de/zahnheilkunde/zahnerhaltung/story/update-komposite-einfuehrung-teil-2.html> (17.11.2013).

Ertl K, Graf A, Watts D, Schedle A (2010) Stickiness of dental resin composite materials to steel, dentin and bonded dentin. Dental Materials 26: 59–66.

Farid MR, Abdel-Mawla EA (1995) Fracture resistance of repaired Class II composite resin restorations. Egyptian Dental Journal 41: 1507–1512.

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

Fernández EM, Martin JA, Angel PA, Mjör IA, Gordan VV, Moncada GA (2011) Survival Rate of Sealed, Refurbished and Repaired Defective Restorations: 4-Year Follow-Up. Brazilian Dental Journal 22: 134–139.

Ferracane JL (2006) Hygroscopic and hydrolytic effects in dental polymer networks. Dental Materials 22: 211–222.

Ferracane JL, Condon JR (1999) In vitro evaluation of the marginal degradation of dental composites under simulated occlusal loading. *Dental Materials* 15: 262–267.

Ferracane JL, Moser JB, Greener EH (1981) Rheology of composite restoratives. *Journal of Dental Research* 60: 1678–1685.

Ferrari M, Goracci C, Cardoso PEC, Sadek F (2002) Microtensile bond strength tests: scanning electron microscopy evaluation of sample integrity before testing. *European Journal of Oral Sciences* 110: 385.

Fleming GJP, Awan M, Cooper PR, Sloan AJ (2008) The potential of a resin-composite to be cured to a 4 mm depth. *Dental Materials* 24: 522–529.

Foitzik M, Attin T (2004) Korrekturfüllung – Möglichkeiten und Durchführung. http://www.sso.ch/doc/doc_download.cfm?uuid=882D39A2D9D9424C4ED506212012FDA4 (17.11.2013).

Forss H, Widström E (2004) Reasons for restorative therapy and the longevity of restorations in adults. *Acta Odontologica Scandinavica* 62: 82–86.

Frankenberger R, Kramer N, Ebert J, Lohbauer U, Kappel S, Weges S ten, Petschelt A (2003a) Fatigue behavior of the resin-resin bond of partially replaced resin-based composite restorations. *American Journal of Dentistry* 16: 17–22.

Frankenberger R, Roth S, Krämer N, Pelka M, Petschelt A (2003b) Effect of preparation mode on Class II resin composite repair. *Journal of Oral Rehabilitation* 30: 559–564.

Garcia-Da-Silva TC, Bacchi A, Schneider LFJ, Sinhoreti MAC, Consani RLX (2011) Effect of surface treatments on the bond strength of repaired-composites. Abstracts of the Academy of Dental Materials Annual Meeting, 13-15 October 2011, Bahia, Brazil. *Dental Materials* 27, Supplement 1: e35.

Goldberg M (2008) In vitro and in vivo studies on the toxicity of dental resin components: a review. *Clinical Oral Investigations* 12: 1–8.

Gordan VV (2001) Clinical evaluation of replacement of class V resin based composite restorations. *Journal of Dentistry* 29: 485–488.

Gordan VV, Chiayi Shen, Riley III J, Mjör IA (2006) Two-Year Clinical Evaluation of Repair versus Replacement of Composite Restorations. *Journal of Esthetic & Restorative Dentistry* 18: 144–153.

Gordan VV, Garvan CW, Blase PK, Mondragon E, Mjör IA (2009) A long-term evaluation of alternative treatments to replacement of resin-based composite restorations: Results of a seven-year study. *Journal of the American Dental Association* 140: 1476–1484.

Gordan VV, Riley III JL, Geraldeli S, Rindal B, Qvist V, Fellows JL, Kellum P, Gilbert GH (2012) Repair or replacement of defective restorations by dentists in The Dental Practice-Based Research Network. *Journal of the American Dental Association* 143: 593–601.

Gregory WA, Berry S, Duke E, Dennison JB (1992) Physical properties and repair bond strength of direct and indirect composite resins. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 68: 406–411.

Gregory WA, Moss SM (1990) Effects of heterogeneous layers of composite and time on composite repair of porcelain. *Operative Dentistry* 15: 18–22.

Gregory WA, Pounder B, Bakus E (1990) Bond strengths of chemically dissimilar repaired composite resins. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 64: 664–668.

Hahnel S, Henrich A, Bürgers R, Handel G, Rosentritt M (2010) Investigation of mechanical properties of modern dental composites after artificial aging for one year. *Operative Dentistry* 35: 412–419.

- Hamano N, Chiang Y, Nyamaa I, Yamaguchi H, Ino S, Hickel R, Kunzelmann K (2011) Effect of different surface treatments on the repair strength of a nanofilled resin-based composite. *Dental Material Journal* 30: 537–545.
- Hansen EK, Asmussen E (1989) Efficacy of Dentin-Bonding Agents in Relation to Application Technique. *Acta Odontologica Scandinavica* 47: 117–120.
- Hara T, Akizumi H, Suzuki T, Kazama H (2006) Novel photopolymerization initiator system including radical-amplifier for resin composite. *Journal of Dental Research* 85: 1393.
- Heintze SD (2013) Clinical relevance of tests on bond strength, microleakage and marginal adaptation. Abstracts of the Academy of Dental Materials Annual Meeting, 19-22 September 2012, Lake Buena Vista, Florida, USA 29: 59–84.
- Heintze SD, Zimmerli B (2011a) Relevanz von In-vitro-Untersuchungen von Adhäsiv- und Kompositmaterialien. Eine Übersicht in drei Teilen. Teil 1: Zulassungsanforderungen und standardisierte Prüfungen nach ISO von Kompositmaterialien. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin* 121: 804–809.
- Heintze SD, Zimmerli B (2011b) Relevanz von In-vitro-Untersuchungen von Adhäsiv- und Kompositmaterialien. Eine Übersicht in drei Teilen. Teil 2: Nicht normierte Prüfungen von Kompositmaterialien. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin* 121: 924–930.
- Heintze SD, Zimmerli B (2011c) Relevanz von In-vitro-Untersuchungen von Adhäsiv- und Kompositmaterialien. Eine Übersicht in drei Teilen. Teil 3: In-vitro-Prüfungen von Adhäsivsystemen. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin* 121: 1033–1040.
- Helvatjoglu-Antoniades M, Papadogiannis Y, Lakes RS, Dionysopoulos P, Papadogiannis D (2006) Dynamic and static elastic moduli of packable and flowable composite resins and their development after initial photo curing. *Dental Materials* 22: 450–459.

Hickel R, Brühshaver K, Ilie N (2013) Repair of restorations – Criteria for decision making and clinical recommendations. Abstracts of the Academy of Dental Materials Annual Meeting, 19-22 September 2012, Lake Buena Vista, Florida, USA 29: 28–50.

Hickel R, Peschke A, Tyas M, Mjoer I, Bayne S, Peters M, Hiller K, Randall R, Vanherle G, Heintze SD (2010) FDI World Dental Federation - Clinical Criteria for the Evaluation of Direct and Indirect Restorations Update and Clinical Examples. Journal of Adhesive Dentistry 12: 259–272.

Hisamatsu N, Atsuta M, Matsumura H (2002) Effect of silane primers and unfilled resin bonding agents on repair bond strength of a prosthodontic microfilled composite. Journal of Oral Rehabilitation 29: 644–648.

Hotz P (1975) Die Anpolymerisation von Kompositmaterial. Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin 85: 608–614.

Hunter AR, Treasure ET, Hunter AJ (1995) Increases in cavity volume associated with the removal of class 2 amalgam and composite restorations. Operative Dentistry 20: 2–6.

Ilie N, Hickel R (2009a) Investigations on mechanical behaviour of dental composites. Clinical Oral Investigations 13: 427–438.

Ilie N, Hickel R (2009b) Macro-, micro- and nano-mechanical investigations on silorane and methacrylate-based composites. Dental Materials 25: 810–819.

Ilie N, Hickel R (2011a) Investigations on a methacrylate-based flowable composite based on the SDR (TM) technology. Dental Materials 27: 348–355.

Ilie N, Hickel R (2011b) Resin composite restorative materials. Australian Dental Journal 56: 59–66.

- Ilie N, Rencz A, Hickel R (2012) Investigations towards nano-hybrid resin-based composites. *Clinical Oral Investigations* 17: 185-193.
- Ilie N, Bucuta S, Draenert M (2013) Bulk-fill resin-based Composites: An *in vitro* assessment of their mechanical performance. *Operative Dentistry* 38: 618-625.
- Inoue T (1978) Repair of restoration materials: repair of amalgam and composite resin used in restorations. *Shikai Tenbo Dental Outlook* 52: 87–96.
- Ivanovas S (2011) Reparatur siloranebasierter Dentalkomposite. Dissertation, München.
- Ivanovas S, Hickel R, Ilie N (2011) How to repair fillings made by silorane-based composites. *Clinical Oral Investigations* 15: 915–922.
- Jacobsen PH, Whiting R, Richardson PCA (1977) Viscosity of setting anterior restorative materials. *British Dental Journal* 143: 393–396.
- Kaleem M, Satterthwaite JD, Watts DC (2009) Effect of filler particle size and morphology on force/work parameters for stickiness of unset resin-composites. *Dental Materials* 25: 1585–1592.
- Kamann WK (2002) Flicker oder gleich ganz neu. *Zahnärztliche Mitteilungen* 92: 864-868
- Kamann WK, Gängler P (2000) Füllungsreparatur und Reparaturfüllung. *Schweizer Monatsschrift für Zahnmedizin* 110: 1054-71
- Katsuyama S, Nogami I, Tsuzuki K, Suzuki S, Yoshida K (1979) Prognosis in composite resin restoration and its repair. *Shikai Tenbo Dental Outlook* 53: 1–12.
- Kerr SonicFill (2013). <http://www.sonicfill.de/> (17.11.2013).
- Kim SW, Jang JS (1998) Rheological properties of fumed silica filled Bis-GMA dispersions. *Polymer Engineering and Science* 38: 1142–1148.

- Kim J, Moon H, Lim B, Lee Y, Rhee S, Yang H (2007) The effect of nanofiller on the opacity of experimental composites. *Journal of Biomedical Materials Research Part B - Applied Biomaterials* 80: 332–338.
- Kim K, Ong JL, Okuno O (2002) The effect of filler loading and morphology on the mechanical properties of contemporary composites. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 87: 642–649.
- Klein F, Keller AK, Staehle HJ, Dorfer CE (2002) Proximal contact formation with different restorative materials and techniques. *American Journal of Dentistry* 15: 232–235.
- Krejci I, Lieber CM, Lutz F (1995) Time required to remove totally bonded tooth-colored posterior restorations and related tooth substance loss. *Dental Materials* 11: 34–40.
- Kullmann W (1986) Zur Frage der Reparatur-Möglichkeit von Kunststoff-Füllungsmaterialien. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 41: 200–203.
- Kuraray Home (2013a): Produkte. <http://www.kuraray-dental.eu/de/produkte/produkte/?p=11&pg=> (17.11.2013). Verantwortlicher Manager für Inhalte der Website: Murata N.
- Kuraray Home (2013b): Produkte. <http://www.kuraray-dental.eu/nc/de/produkte/produkte/?p=15&pg=3> (17.11.2013). Verantwortlicher Manager für Inhalte der Website: Murata N.
- Labella R, Lambrechts P, van Meerbeek B, Vanherle G (1999) Polymerization shrinkage and elasticity of flowable composites and filled adhesives. *Dental Materials* 15: 128–137.
- Lambrechts P, Braem M, Vanherle G (1987) Evaluation of clinical performance for posterior composite resins and dentin adhesives. *Operative Dentistry* 12: 53–78.
- Lee B in, Cho BH, Son HH, Um CM (2007) Rheological characterization of composites using a vertical oscillation rheometer. *Dental Materials* 23: 425–432.

Lee I, Min S, Kim S, Ferracane J (2010) Slumping tendency and rheological properties of flowable composites. *Dental Materials* 26: 443–448.

Lee I, Son H, Um C (2003) Rheologic properties of flowable, conventional hybrid, and condensable composite resins. *Dental Materials* 19: 298–307.

Lee J, Um C, Lee I (2006) Rheological properties of resin composites according to variations in monomer and filler composition. *Dental Materials* 22: 515–526.

Leevailoj C, Cochran MA, Matsi BA, Moore BK, Platt JA (2001) Microleakage of posterior packable resin composites with and without flowable liners. *Operative Dentistry* 26: 302–307.

Leinfelder K, Prasad A (1998) A new condensable composite for the restoration of posterior teeth. *Dent Today* 17: 112–116.

Leinfelder KF, Bayne SC, Swift EJ (1999) Packable Composites: Overview and Technical Considerations. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry* 11: 234–249.

Leinfelder KF, Radz GM, Nash RW (1998) A report on a new condensable composite resin. *Compendium of Continuing Education in Dentistry* 19: 230-232, 234, 236-237.

Leloup G, D’Hoore W, Bouter D, Degrange M, Vreven J (2001) Meta-analytical review of factors involved in dentin adherence. *Journal of Dental Research* 80: 1605–1614.

Lindemuth JS, Hagge MS (2000) Effect of universal testing machine crosshead speed on the shear bond strength and bonding failure mode of composite resin to enamel and dentin. *Military Medicine* 165: 742–746.

Lloyd CH, Dhuru VB (1985) Effect of a commercial bonding agent upon the fracture toughness (K'_{Ic}) of repaired heavily filled composite. *Dental Materials* 1: 83–85.

Loomans BA, Cardoso MV, Roeters FJ, Opdam NJ, Munck J de, Huysmans MC, van Meerbeek B (2011) Is there one optimal repair technique for all composites? *Dental Materials* 27: 701–709.

Lucena-Martín C, González-López S, Mondelo JMN de (2001) The effect of various surface treatments and bonding agents on the repaired strength of heat-treated composites. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 86: 481–488.

Lung CYK, Matinlinna JP (2012) Aspects of silane coupling agents and surface conditioning in dentistry: An overview. *Dental Materials* 28: 467–477.

Lutz F, Lüscher B, Ochsenbein H, Mühlemann H (1976) *Adhäsive Zahnheilkunde* Zürich: Abteilung für Kariologie und Parodontologie. Juris Druck & Verlag, Zürich: 165–166.

Lynch CD, Blum IR, Frazier KB, Haisch LD, Wilson NH (2012) Repair or replacement of defective direct resin-based composite restorations: Contemporary teaching in U.S. and Canadian dental schools. *Journal of the American Dental Association* 143: 157–163.

Magni E, Ferrari M, Papacchini F, Hickel R, Ilie N (2011) Influence of ozone on the composite-to-composite bond. *Clinical Oral Investigations* 15: 249–256.

Maneenut C, Sakoolnamarka R, Tyas MJ (2011) The repair potential of resin composite materials. *Dental Materials* 27: e20.

Manhart J, Chen H, Hamm G, Hickel R (2004) Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. *Operative Dentistry* 29: 481–508.

Manhart J, Kunzelmann K, Chen HY, Hickel R (2000) Mechanical properties and wear behavior of light-cured packable composite resins. *Dental Materials* 16: 33–40.

Maryniuk GA (1984) In search of treatment longevity - a 30-year perspective. *Journal of Dental Research* 109: 739–744.

Maryniuk GA, Kaplan SH (1986) Longevity of restorations: survey results of dentists' estimates and attitudes. *Journal of the American Dental Association* 112: 39–45.

Masouras K, Silikas N, Watts DC (2008) Correlation of filler content and elastic properties of resin-composites. *Dental Materials* 24: 932–939.

McLean JW (1990) The failed restoration: causes of failure and how to prevent them. *International Dental Journal* 40: 354–358.

Millar BJ, Robinson PB, Davies BR (1992) Effects of the removal of composite resin restorations on Class II cavities. *British Dental Journal* 173: 210–212.

Mitsaki-Matsou H, Karanika-Kouma A, Papadoyiannis Y, Theodoridou-Pahine S (1991) An in vitro study of the tensile strength of composite resins repaired with the same or another composite resin. *Quintessence International* 22: 475–481.

Mjör IA (1981) Placement and replacement of restorations. *Operative Dentistry* 6: 49–54.

Mjör IA (1993) Repair versus replacement of failed restorations. *International Dental Journal* 43: 466–472.

Mjör IA, Gordan VV (2002) Failure, repair, refurbishing and longevity of restorations. *Operative Dentistry* 27: 528–534.

Moncada G, Martin J, Fernández E, Hempel MC, Mjör IA, Gordan VV (2009) Sealing, refurbishment and repair of Class I and Class II defective restorations: A three-year clinical trial. *Journal of the American Dental Association* 140: 425–432.

Moncada G, Martin J, Fernandez E, Vildosola PG, Caamano C, Caro MJ, Mjor IA, Gordan VV (2006) Alternative treatments for resin-based composite and amalgam restorations with marginal defects: a 12-month clinical trial. *General Dentistry* 54: 314–318.

Moorthy A, Hogg CH, Dowling AH, Grufferty BF, Benetti AR, Fleming GJP (2012) Cuspal deflection and microleakage in premolar teeth restored with bulk-fill flowable resin-based composite base materials. *Journal of Dentistry* 40: 500–505.

Munck J de, Mine A, Poitevin A, van Ende A, Cardoso MV, van Landuyt KL, Peumans M, van Meerbeek B (2012) Meta-analytical Review of Parameters Involved in Dentin Bonding. *Journal of Dental Research* 91: 351–357.

Oilo G (1993) Bond strength testing--what does it mean? *International Dental Journal* 43: 492–498.

Opdam NJ, Bronkhorst EM, Roeters JM, Loomans BA (2007a) Longevity and reasons for failure of sandwich and total-etch posterior composite resin restorations. *Journal of Adhesive Dentistry* 9: 469–475.

Opdam NJ, Bronkhorst EM, Roeters JM, Loomans BA (2007b) A retrospective clinical study on longevity of posterior composite and amalgam restorations. *Dental Materials* 23: 2–8.

Opdam NJ, Bronkhorst EM, Loomans BA, Huysmans MC (2010) 12-year Survival of Composite vs. Amalgam Restorations. *Journal of Dental Research* 89: 1063–1067.

Opdam NJM, Bronkhorst EM, Loomans BAC, Huysmans MDNJM (2012) Longevity of repaired restorations: A practice based study. *Journal of Dentistry* 40: 829–835.

Opdam NJ, Roeters JM, Peters TC, Burgersdijk RC, Kuijs RH (1996) Consistency of resin composites for posterior use. *Dental Materials* 12: 350–354.

Ortengren U, Wellendorf H, Karlsson S, Ruyter IE (2001) Water sorption and solubility of dental composites and identification of monomers released in an aqueous environment. *Journal of Oral Rehabilitation* 28: 1106–1115.

Osborne JW, Summitt JB (1998) Extension for prevention: is it relevant today? *American Journal of Dentistry* 11: 189–196.

Özcan M, Alander P, Vallittu PK, Huysmans M, Kalk W (2005) Effect of three surface conditioning methods to improve bond strength of particulate filler resin composites. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine* 16: 21–27.

Özcan M, Barbosa SH, Melo RM, Galhano GÁP, Bottino MA (2007) Effect of surface conditioning methods on the microtensile bond strength of resin composite to composite after aging conditions. *Dental Materials* 23: 1276–1282.

Padipatvuthikul P, Mair LH (2007) Bonding of composite to water aged composite with surface treatments. *Dental Materials* 23: 519–525.

Papacchini F, Magni E, Radovic I, Mazzitelli C, Monticelli F, Goracci C, Polimeni A, Ferrari M (2007a) Effect of Intermediate Agents and Pre-heating of Repairing Resin on Composite-repair Bonds. *Operative Dentistry* 32: 363–371.

Papacchini F, Radovic I, Magni E, Goracci C, Monticelli F, Chieffi N, Polimeni A, Ferrari M (2008) Flowable composites as intermediate agents without adhesive application in resin composite repair. *American Journal of Dentistry* 21: 53–58.

Papacchini FDS, Chieffi N, Goracci C, Sadek FT, Suh BI, Tay FR, Ferrari M (2007b) Composite-to-composite microtensile bond strength in the repair of a microfilled hybrid resin: effect of surface treatment and oxygen inhibition. *Journal of Adhesive Dentistry* 9: 25–31.

- Papadogiannis DY, Lakes RS, Papadogiannis Y, Palaghias G, Helvatjoglu-Antoniades M (2008) The effect of temperature on the viscoelastic properties of nano-hybrid composites. *Dental Materials* 24: 257–266.
- Pecora N, Yaman P, Dennison J, Herrero A (2002) Comparison of shear bond strength relative to two testing devices. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 88: 511–515.
- Perdigão J, Swift EJ, JR., Lopes GC (1999) Effects of repeated use on bond strengths of one-bottle adhesives. *Quintessenz International* 30: 819–823.
- Peumans M, van Meerbeek B, Asscherickx K, Simon S, Abe Y, Lambrechts P, Vanherle G (2001) Do condensable composites help to achieve better proximal contacts? *Dental Materials* 17: 533–541.
- Polydorou O, König A, Hellwig E, Kümmerer K (2009) Long-term release of monomers from modern dental-composite materials. *European Journal of Oral Sciences* 117: 68–75.
- Polydorou O, Trittler R, Hellwig E, Kümmerer K (2007) Elution of monomers from two conventional dental composite materials. *Dental Materials* 23: 1535–1541.
- Puckett AD, Holder R, Ohara JW (1991) Strength of posterior composite repairs using different composite bonding agent combinations. *Operative Dentistry* 16: 136–140.
- Qvist V, Thylstrup A, Mjör IA (1986) Restorative treatment pattern and longevity of amalgam restorations in Denmark. *Acta Odontologica Scandinavica* 44: 351–356.
- Raskin A, Michotte-Theall B, Vreven J, Wilson NH (1999) Clinical evaluation of a posterior composite 10-year report. *Journal of Dentistry* 27: 13–19.
- Rasmussen ST (1996) Analysis of dental shear bond strength tests, shear or tensile? *International Journal of Adhesion and Adhesives* 16: 147–154.

Rasmusson CG, Lundin SA (1995) Class II restorations in six different posterior composite resins: five-year results. *Swedish Dental Journal* 19: 173–182.

Rathke A, Tymina Y, Haller B (2009) Effect of different surface treatments on the composite–composite repair bond strength. *Clinical Oral Investigations* 13: 317–323.

Reinhardt KJ, Vahl J (1981) Polymerization behavior of composites in contact with high polymers as foil and molding materials. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 36: 811–815.

Rinastiti M, Özcan M, Siswomihardjo W, Busscher H (2011) Effects of surface conditioning on repair bond strengths of non-aged and aged microhybrid, nanohybrid, and nanofilled composite resins. *Clinical Oral Investigations* 15: 625–633.

Rinastiti M, Özcan M, Siswomihardjo W, Busscher HJ (2010a) Immediate repair bond strengths of microhybrid, nanohybrid and nanofilled composites after different surface treatments. *Journal of Dentistry* 38: 29–38.

Rinastiti M, Özcan M, Siswomihardjo W, Busscher HJ, van der Mei HC (2010b) Effect of Biofilm on the Repair Bond Strengths of Composites. *Journal of Dental Research* 89: 1476–1481.

Rodrigues SA, Junior, Ferracane JL, Della Bona Á (2009) Influence of surface treatments on the bond strength of repaired resin composite restorative materials. *Dental Materials* 25: 442–451.

Rosales-Leal JI, Osorio R, Holgado-Terriza JA, Cabrerizo-Vílchez MA, Toledano M (2001) Dentin wetting by four adhesive systems. *Dental Materials* 17: 526–532.

Ruyter IE (1981) unpolymerized surface-layers on sealants. *Acta Odontologica Scandinavica* 39: 27–32.

Sabbagh J, Vreven J, Leloup G (2002) Dynamic and static moduli of elasticity of resin-based materials. *Dental Materials* 18: 64–71.

Sankarapandian M, Shobha HK, Kalachandra S, McGrath JE, Taylor DF (1997) Characterization of some aromatic dimethacrylates for dental composite applications. *Journal of Materials Science-Materials in Medicine* 8: 465–468.

Sarrett DC, Brooks CN, Rose JT (2006) Clinical performance evaluation of a packable posterior composite in bulk-cured restorations. *Journal of the American Dental Association* 137: 71–80.

Schaub KM (2010) The effect of a novel photoinitiator system (RAP) on dental resin composites' flexural strength, polymerization stress, and degree of conversion. Dissertation, University of Indiana.

Schulze KA, Zaman AA, Söderholm KM (2003) Effect of filler fraction on strength, viscosity and porosity of experimental compomer materials. *Journal of Dentistry* 31: 373.

Shahdad SA, Kennedy JG (1998) Bond strength of repaired anterior composite resins: an in vitro study. *Journal of Dentistry* 26: 685–694.

Sharif MO, Catleugh M, Merry A, Tickle M, Dunne SM, Brunton P, Aggarwal VR (2010) Replacement versus repair of defective restorations in adults: resin composite. *The Cochrane Library* 2010: Issue 2

Sideridou I, Tserki V, Papanastasiou G (2002) Effect of chemical structure on degree of conversion in light-cured dimethacrylate-based dental resins. *Biomaterials* 23: 1819–1829.

Silikas N, Watts DC (1999) Rheology of urethane dimethacrylate and diluent formulations. *Dental Materials* 15: 257–261.

Söderholm KJ, Zigan M, Ragan M, Fischlschweiger W, Bergman M (1984) Hydrolytic degradation of dental composites. *Journal of Dental Research* 63: 1248–1254.

Söderholm KM, Roberts MJ (1991) Variables influencing the repair strength of dental composites. *Scandinavian Journal of Dental Research* 99: 173–180.

Spahl W, Budzikiewicz H, Geurtsen W (1998) Determination of leachable components from four commercial dental composites by gas and liquid chromatography mass spectrometry. *Journal of Dentistry* 26: 137–145.

Spanoudakis J, Young RJ (1984) Crack propagation in a glass particle-filled epoxy resin. *Journal of Materials Science* 19: 487–496.

Staehle, HJ (2009) Neue Indikationen in der Zahnerhaltung als Ergänzung zu kieferorthopädischen, prothetischen und implantologischen Eingriffen. <http://www.dgzmk.de/zahnaerzte/mitgliederservice/dzm-aktuell/neue-indikationen-in-der-zahnerhaltung-als-ergaenzung-zu-kieferorthopaedischen-prothetischen-und-implantologischen-eingriffen.html> (12.10.2013).

Staxrud F, Dahl JE (2011) Role of bonding agents in the repair of composite resin restorations. *European Journal of Oral Sciences* 119: 316–322.

Steet TC, Perdigao J, Swift EJ (2000) Marginal adaption of composite restorations with and without flowable liners. *Journal of Dental Research* 79: 269.

Suzuki S, Ori T, Saimi Y (2005) Effects of filler composition on flexibility of microfilled resin composite. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials* 74: 547–552.

Swift EJ, JR., Cloe BC, Boyer DB (1994) Effect of a silane coupling agent on composite repair strengths. *American Journal of Dentistry* 7: 200–202.

Swift EJ, JR., LeValley BD, Boyer DB (1992) Evaluation of new methods for composite repair. *Dental Materials* 8: 362–365.

Tarumi H, Torii M, Tsuchitani Y (1995) Relationship between particle size of barium glass filler and water sorption of light-cured composite resin. *Dental Materials J.* 14: 37–44.

Tavas MA, Watts DC (1989) The use of a cone and plate viscometer for determination of flow properties of unfilled resins and etching gels. *Journal of Oral Rehabilitation* 16: 185–192.

Taylor DF, Kalachandra S, Sankarapandian M, McGrath JE (1998) Relationship between filler and matrix resin characteristics and the properties of uncured composite pastes. *Biomaterials* 19: 197–204.

Teixeira EC, Bayne SC, Thompson JY, Ritter AV, Swift EJ (2005) Shear bond strength of self-etching bonding systems in combination with various composites used for repairing aged composites. *Journal of Adhesive Dentistry* 7: 159–164.

Tezvergil A, Lassila LVJ, Vallittu PK (2003) Composite–composite repair bond strength: effect of different adhesion primers. *Journal of Dentistry* 31: 521.

Thiele P (2002) Reparaturmöglichkeit von Kompositen / Kompomeren unter Berücksichtigung der Kontamination der Schmelzoberfläche mit Reparaturmaterialien. Dissertation, Freiburg.

Tiller HJ, Eichler D, Musil R (1988) Examinations of synthetic resin-metal bonding. Significance and problems of use. *Dental-Labor* 36: 1425–1430.

Tokuyama Home (2013)- Estelite Sigma Quick. http://www.tokuyama-dental.de/estelite_sigma_quick.php (17.11.2013). Verantwortlicher für Inhalte der Website: Klaus Zurstraßen.

Turner CW, Meiers JC (1993) Repair of an aged, contaminated indirect composite resin with a direct, visible-light-cured composite resin. *Operative Dentistry* 18: 187–194.

Tyas MJ, Anusavice KJ, Frencken JE, Mount GJ (2000) Minimal intervention dentistry - a review. *International Dental Journal* 50: 1–12.

Tyas MJ, Jones DW, Rizkalla AS (1998) The evaluation of resin composite consistency. *Dental Materials* 14: 424–428.

Unterbrink GL, Liebenberg WH (1999) Flowable resin composites as filled adhesives: Literature review and clinical recommendations. *Quintessence International* 30: 249–257.

van Landuyt K, Nawrot T, Geebelen B, Munck J de, Snauwaert J, Yoshihara K, Scheers H, Godderis L, Hoet P, van Meerbeek B (2011) How much do resin-based Dental Materials release? A meta-analytical approach. *Dental Materials* 27: 723–747.

van Meerbeek B, Inokoshi S, Davidson CL, Gee A de, Lambrechts P, Braem M, Vanherle G (1994) Dual cure luting composites – Part II: Clinically related properties. *Journal of Oral Rehabilitation* 21: 57-66.

van Nieuwenhuysen J, D'Hoore W, Carvalho J, Qvist V (2003) Long-term evaluation of extensive restorations in permanent teeth. *Journal of Dentistry* 31: 395.

Vankerckhoven H, Lambrechts P, Vanbeylen M, Davidson CL, Vanherle G (1982) Unreacted methacrylate groups on the surfaces of composite resins. *Journal of Dental Research* 61: 791–796.

Voco Home 2013 - GrandioSO Flow. http://www.voco.de/de/products/_products/GrandioSO_Flow/index.html (17.11.2013). Verantwortlicher für Inhalte der Website: Olaf Sauerbier.

Wiegand A, Stawarczyk B, Buchalla W, Tauböck TT, Özcan M, Attin T (2012) Repair of silorane composite—Using the same substrate or a methacrylate-based composite? Abstracts of the Academy of Dental Materials Annual Meeting, 19-22 September 2012, Lake Buena Vista, Florida, USA 28: e19.

Willems G, Lambrechts P, Braem M, Celis JP, Vanherle G (1992) A classification of dental composites according to their morphological and mechanical characteristics. *Dental Materials* 8: 310–319.

Yesilyurt C, Kusgoz A, Bayram M, Ulker M (2009) Initial Repair Bond Strength of a Nano-filled Hybrid Resin: Effect of Surface Treatments and Bonding Agents. *Journal of Esthetic & Restorative Dentistry* 21: 251–260.

Yousef MK, Khoja NH (2009) Repair and Replacement Perception of Dental Restorations. *Medical Science Journal* 16: 75–85.

10. Abbildungsverzeichnis

Abbildungen 1 – 24: eigenes Bildmaterial

Tabellen 1 – 14: eigenes Bildmaterial

11. Abkürzungsverzeichnis

Bis-EMA	Bisphenol-A-polyethylenglykoldietherdimethacrylat
Bis-GMA	Bisphenol-A-glycidylmethacrylat
bzw.	beziehungsweise
EBPDMA	ethoxyliertes Bisphenol-A-dimethacrylat
E-Modul	Elastizitätsmodul
[Gew.%]	Gewichtsprozent
[GPa]	Gigapascal
HDDMA	Hexandioldimethacrylat
ISO	Internationale Organisation für Normung (International Organization for Standardization)
ISO/TS	siehe oben; Technische Spezifikation (Technical Specification)
ISO/TR	siehe oben; Technischer Bericht (Technical Report)
LED	Lichtemittierende Diode (Light-emitting diode)
[min]	Minute
[mm]	Millimeter
[mm ²]	Quadratmillimeter
[MPa]	Megapascal

[N]	Newton
n	Anzahl
[nm]	Nanometer
pH	Maß für die Aktivität von Protonen einer wässrigen Lösung (Säuregrad)
RAP	Radical Amplified Photopolymerization Technology
REM	Rasterelektronenmikroskop
SDR	Stress Decreasing Resin
TEGDMA	Triethylenglycol-Dimethacrylat
UDMA	Urethandimethacrylat
[Vol.%]	Volumenprozent
[µm]	Mikrometer
[°C]	Grad Celsius

13. Danksagung

Ich möchte allen Personen danken, die mir bei der Erstellung dieser Arbeit geholfen haben.

Allen voran steht dabei meine Betreuerin Frau PD Dr. Nicoleta Ilie, die mir nicht nur dieses Thema zur Bearbeitung angeboten hat, sondern mir bei Fragen und Problemen auch immer hilfreich zur Seite stand. Ohne sie wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Außerdem möchte ich Frau MTA Evi Köbele für die Hilfe beim Mikroskopieren und der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie München für die Bereitstellung der benötigten Materialien und Geräte danken.

14. Ehrenwörtliche Erklärung

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Thema

*Reparatur methacrylatbasierter dentaler Restauraionskomposite unter Einsatz von
Schallaktivierung*

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen sowie von Dritten weder mittelbar noch unmittelbar geldwerte Leistungen für die Arbeit erhalten habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

München, 17.11.2013

Marie-Thérèse Oberthür