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

Direktor: Prof. Dr. R. Hickel

Reparatur siloranbasierter Dentalkomposite

Dissertation
zum Erwerb des Doktorgrades der Zahnheilkunde
an der Medizinischen Fakultät der
Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Sarah Ivanovas

aus

Tübingen

2011

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Universität München

Berichterstatter: PD Dr. Nicoleta Ilie

Mitberichterstatter: PD Dr. Dr. Christof Holberg, PD Dr. Dr. Christoph Pautke

Mitbetreuung durch den promovierten Mitarbeiter:

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

Tag der mündlichen Prüfung: 10.3. 2011

Meiner Familie gewidmet

Inhaltsverzeichnis:

1	Einleitung.....	5
2	Literaturübersicht.....	7
2.1	Die Füllungsreparatur.....	7
2.1.1	Die Entwicklung der Füllungsreparatur.....	9
2.2	Lebensdauer von Kompositrestaurationen.....	13
2.2.1	Gründe für das Scheitern einer Restauration.....	14
2.3	Zusammensetzung der Komposite.....	16
2.3.1	Methacrylate.....	16
2.3.2	Siloranbasierende Komposite.....	24
2.3.2.1	Aufbau siloranbasierender Komposite.....	24
3	Fragestellung.....	26
4	Material und Methode.....	29
4.1	Material.....	31
4.1.1	Verwendete Restaurationsmaterialien.....	31
4.1.2	Verwendete Haftvermittler	31
4.2	Methode.....	34
4.2.1	Probenpräparation.....	34
4.2.2	Lagerung und Alterung der Prüfkörper.....	36
4.2.3	Bruchmodusanalyse.....	37
4.2.4	Versuchsaufbau.....	37
4.2.5	Statistische Auswertung.....	41

5 Ergebnisse.....	42
5.1 Teil I.....	42
5.1.1 Haftwerte.....	42
5.2 Teil II.....	49
5.2.1 Haftwerte.....	49
6 Diskussion.....	54
6.1 Diskussion von Material und Methode.....	54
6.1.1 Materialauswahl.....	55
6.1.2 Herstellung der Prüfkörper.....	56
6.1.3 Materialapplikation.....	58
6.1.4 Lagerung und Alterung der Prüfkörper.....	60
6.1.5 Scherversuch.....	60
6.1.6 Versuchsdurchführung	61
6.1.7 Analyse des Bruchmodus.....	62
6.2 Diskussion der Ergebnisse.....	63
6.2.1 Teil I	63
6.2.2 Teil II.....	65
7 Schlussfolgerungen.....	70
8 Zusammenfassung.....	72
9 Literaturverzeichnis.....	75
10 Abbildungsverzeichnis.....	83
11 Curriculum Vitae.....	84

12 Danksagung.....85

1 Einleitung

Dank ihrer ästhetischen Eigenschaften, die Ermöglichung konservativer Kavitätenpräparation durch adhäsive Befestigung, die stetig verbesserten Eigenschaften und das weit reichende Indikationsspektrum, ist die Verwendung von Kompositmaterialien ein fester Bestandteil der modernen operativen Zahnheilkunde.

Trotz guter Materialeigenschaften haben Zahnrestorationen im Allgemeinen eine begrenzte Lebensdauer. Die Ansicht, dass zahnärztliche Restaurationen eine Art permanenter Ersatz für verlorene Zahnhartsubstanz seien, muss angesichts der heutigen Kenntnis über die Funktionszeiten der zur Verfügung stehenden zahnärztlichen Materialien als überholt gelten (Elderton, 1990). Da Komposite und die zur adhäsiven Befestigung benutzten Haftvermittler techniksensitive Materialien sind, kann es zu Fehlern an der Grenzfläche von Zahn zu Restauration kommen (Roulet, 1997). Außerdem unterliegen Komposite wie die meisten dentalen Materialien im Milieu der Mundhöhle Alterungsprozessen und Verschleiß (Söderholm et al. 1984) (Finer und Santerre, 2004). Daher sind defekte Kompositfüllungen ein häufiges Problem in der zahnärztlichen Praxis. Der Austausch und die Erneuerung von Füllungen sind sogar die häufigste Art der Behandlung bei Erwachsenen (Mjör, 1981).

Die Füllungsreparatur ist als selektiver Ersatz von Füllungsanteilen definiert. Frisches Füllungsmaterial wird innerhalb dieser einfachen Prozedur an das vorhandene Material angetragen, wobei defektes oder verfärbtes Material und/oder sekundärkariöse Zahnhartsubstanz vorausgehend entfernt wurden. Eine Reparatur kann bei Diskolorierungen, Absprengungen, Abrasionsverlusten, Fehlern in der Oberflächenverarbeitung, Randspaltbildungen (Mikroleakage), Sekundärkaries, Frakturen im Material, Zahnfrakturen und dem Verlust der anatomischen Form indiziert sein.

Für den Fall, dass eine adhäsive Restauration fehlschlägt, stellt die Reparatur einer defekten Füllung eine minimalinvasive und einfache Alternative gegenüber einem kompletten

Austauschs einer zahnfarbenen Füllung dar. Gerade zahnfarbene dentinadhäsive Füllungen sind sehr aufwändig zu entfernen, da das Material farblich, taktil und visuell, bedingt durch seine Transluzenz und die Haftung an Schmelz und Dentin, nur schwer von der umgebenden Zahnhartsubstanz zu unterscheiden ist. Darüber hinaus ergeben sich ökonomische und behandlungsstrategische Aspekte. Die Füllungsreparatur ist weniger zeit- und kostenintensiv sowie für den Patienten weniger belastend als die Erneuerung der gesamten Restauration.

Eine wichtige Frage ist die nach der Zuverlässigkeit des Verbundes zwischen vorhandenem und angetragenem Kompositmaterial. Das Spektrum der verfügbaren Kompositmaterialien ist aufgrund schneller Innovationszyklen groß und bisher ist wenig bekannt über die Kompatibilität zwischen den Materialien, die sich in Zusammensetzung der Matrix und Füllstoffe unterscheiden können. Das 2007 eingeführte siloranbasierte Komposit Filtek Silorane (3M Espe, Seefeld, Deutschland) wurde entwickelt, um die Probleme herkömmlicher dentaler Komposite bedingt durch Polymerisationsschrumpfung und –stress zu lösen. Die völlig neue Chemie des Siloran-Monomers, basierend auf einer kationischen ringöffnenden Polymerisation, führt zu Polymerisationsschrumpfung des Materials unter 1 Volumenprozent (Weinmann et al. 2005).

Falls unterschiedliche Dentalkomposite wie siloranbasierende und methacrylatbasierende Komposite für Reparaturzwecke verwendet werden, ist es wichtig zu wissen, ob die Kombination der verwendeten Materialien zu akzeptabler Stabilität des Verbundes führen.

Ziel der vorliegenden Studie war es, den Haftverbund bzw. die Scherfestigkeit von Reparaturen mit dem auf Siloran basierendem Komposit Filtek Silorane (3M Espe, Seefeld Deutschland) zu evaluieren und mit Reparaturen herkömmlicher Komposite zu vergleichen. Außerdem wird die Kompatibilität von siloranbasierendem und methacrylatbasierendem Komposit untersucht und nach einer geeigneten Reparaturmethode geforscht. Ein experimentelles siloranbasierendes fließfähiges Komposit wurde in diesem Zusammenhang evaluiert.

2 Literaturübersicht

Trotz vieler positiver Eigenschaften unterliegen Kompositmaterialien wie der Großteil der dentalen Werkstoffe in der Mundhöhle Verschleiß und Alterung (Söderholm et al 1984)(Finer and Santerre, 2004). Da es sich um techniksensitive Materialien handelt, können auch Fehler im Verbund zwischen Zahnschmelz und Restauration auftreten.

Der Umgang mit defekten Restaurationen ist als Folge dessen ein übliches Problem in der Praxis. Über Lange Zeit war der Austausch der gesamten Füllung selbst bei kleinen Veränderungen ein gängiges Vorgehen. Durch Forschung im Bereich Kariologie und dentaler Materialien hat sich in letzter Zeit eine minimalinvasive Philosophie durchgesetzt und die Vorteile der Reparatur hervorgebracht, wie z.B. Schonung der Zahnhartsubstanzen und ökonomische Vorteile.

2.1 Die Füllungsreparatur

Ein kompletter Austausch von Kompositfüllungen kann verschiedene Probleme mit sich bringen. Die vollständige Entfernung des Komposits ist technisch anspruchsvoll, zeitaufwändig und führt zu zunehmender Größe der nachfolgenden Restauration (Krejci et al. 1995) (Gordan, 2000). Die Zahnschmelz kann geschwächt und das Pulpengewebe erneut gereizt werden (Krejci et al. 1995), (Tyas et al. 2000), (Mjör and Gordan, 2002). Das Wissen um die Schädigung der Pulpa und der Zahnhartsubstanzen durch die Maßnahmen der Füllungstherapie führte zu den Überlegungen, durch eine materialspezifische Nachsorge und die Methode der Füllungsreparatur die Funktionszeit zahnärztlicher Restaurationen zu erhöhen (Kamann und Gängler, 2000). Darüber hinaus ergeben sich ökonomische und behandlungsstrategische Aspekte. Die Füllungsreparatur ist weniger zeit- und kostenintensiv sowie für den Patienten weniger belastend als die Erneuerung der gesamten Restauration.

Unter einer Füllungsreparatur versteht man subtraktive oder additive Maßnahmen zum Erhalt einer Restauration. Die Maßnahmen können als Füllungskorrektur lediglich das Beseitigen von Stufen oder Überhängen, aber auch das Nachtragen von Material umfassen. Erfolgt vor dem Nachtragen von Material noch Präparationsmaßnahmen, wird der fließende Übergang zwischen Füllungsreparatur und Reparaturfüllung deutlich (Kamann und Gängler, 2000).

Die Reparaturfüllung kann, wie nach kohäsivem Versagen des Füllungswerkstoffes, allein von der Primärrestauration umgeben sein (Einschlussfüllung oder zentrale Reparaturfüllung), oder sowohl an die Primärrestauration als auch an Zahnhartsubstanz grenzen (periphere Reparaturfüllung).

Weiterhin können, in Abhängigkeit von den verwendeten Materialien, homotype und heterotype Reparaturen unterschieden werden. Primär- und Reparaturfüllung gehören bei einer homotypen Reparatur der gleichen Werkstoffgruppe an. Bei der heterotypen Reparatur werden für Primär- und Reparaturfüllung unterschiedliche Materialien verwendet (Kamann und Gängler, 2000).

Je nach zeitlicher Beziehung zwischen der Primärrestauration und der Reparaturfüllung unterscheidet man eine Frühreparatur von einer Spätreparatur. Bei der Spätreparatur liegt eine gealterte Füllungsoberfläche vor, da diese vor dem Reparaturvorgang schon über einen unterschiedlich langen Zeitraum dem oralen Milieu ausgesetzt wurde.

Neben der Reparaturfüllung, deren Ziel die Wiederherstellung einer vorhandenen Restauration ist, ist die Erweiterungs- oder Ergänzungsfüllung zu nennen, die der Versorgung eines benachbarten, nicht mit der schon vorhandenen Restauration in Beziehung stehenden Defektes dient und die, statt der üblichen zirkulären Begrenzung durch Zahnhartsubstanzen, mit einer oder mehreren Wandungen in Kontakt mit der vorhandenen Restauration steht. Die sich durch Re-Restauration des Zahnes ergebende Füllung wird als Sekundärfüllung, Tertiärfüllung etc. bezeichnet.

2.1.1 Die Entwicklung der Füllungsreparatur

Schon *Hotz* warf 1975 die Frage auf, ob weiteres Kompositmaterial an bereits erhärtetes anpolymerisiert werden kann, um zum Beispiel größere Kavitäten portionsweise zu füllen oder kleine Unterschüsse an neuen Füllungen oder aufgebauten Frontzähnen zu beheben (*Hotz*, 1975). *Hotz* publizierte 1975 die Arbeit, in der er den Einfluss verschiedener Rahmenbedingungen auf die Verbundfestigkeit nach Kompositreparatur testete. Diese Veröffentlichung bildete die Grundlage für die erste klinische Empfehlung der Züricher Arbeitsgruppe um *Lutz* (*Lutz et al.* 1975). Das hierin empfohlene Vorgehen beruht im Wesentlichen in einem ausreichenden Materialabtrag, um eine ausreichende Schichtstärke der Reparaturfüllung zu gewährleisten. Ergänzt wurde das Vorgehen durch Anrauen der Substratoberfläche zur Ausbildung makromechanischer Retentionen und durch chemische Entfettung der Oberfläche mittels Methylenchlorid. Die Autoren räumten ein, dass die zu erwartenden Haftfestigkeiten bei älterem Substrat geringer als die Kohäsionskräfte unreparierter Komposite seien, hielten die Verbundfestigkeit jedoch für vergleichbar mit der erzielbaren Haftung auf Schmelz und daher für ausreichend.

Darauf folgend wurden zahlreiche Einzelfragen zur Kompositreparatur *in vitro* untersucht.

Die Mehrzahl der Arbeiten untersuchte mehrere folgender Parameter:

- Einfluss verschiedener Komposite als Substrate,
- Einfluss des Alters der Substrats,
- verschiedene Methoden der Oberflächenbearbeitung,
- Einsatz von Adhäsiven,
- Einfluss verschiedener Komposite als Reparaturfüllung,
- Einfluss verschiedener Lagerzeiten und -bedingungen vor Reparatur,
- Prüfmethode zur Beurteilung der Haltbarkeit.

Ein Problem bei der Bewertung des Einfluss der Substratzusammensetzung ist der Umstand, dass in der Regel zahlreiche mit Handelsnamen identifizierte Substrate untersucht wurden,

wobei meist detaillierte Angaben zu Matrixpolymeren fehlen und untersuchte Materialien teilweise nicht mehr erhältlich sind. Da man von einer Kompatibilität unter bisher marktüblichen auf Methacrylat basierenden Kompositen ausging, wurden Rückschlüsse auf Reparatureigenschaften daher oft nach den in Kompositen enthaltenen Füllkörpern aufgeschlüsselt (Ahlers, 2006). Untersuchungen dieses Parameters (Boyer et al. 1984), (Gregory et al. 1992), (Swift et al. 1994) führten zu sehr stark streuenden Ergebnissen und lassen zusammenfassend schlussfolgern, dass Art, Menge und Größe der Füllkörper alleine keine Vorhersage des zu erwartenden Reparaturerefolgs zulassen. *Vanckerhoven* (Vanckerhoven et al. 1982) und *Roulet* (Roulet, 1987) konnten jedoch zeigen, dass eine Abhängigkeit zwischen der Zusammensetzung der Matrix und dem Gehalt an freien Methacrylatgruppen vorliegt. Auch *Siderou und Achiliias* konnten 2005 unter Verwendung der Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (HPLC) nachweisen, dass die Struktur des im Komposit eingesetzten Monomers (Bis-GMA, UDMA und TEGDMA) die Menge des aus dem Komposit eluierbaren Monomers beeinflusst. Die Polymerisation der Monomere und der Komonomere verläuft nicht vollständig. Mit Hilfe der Infrarot (IR)-Spektroskopie lässt sich der Prozentsatz an nicht umgesetzten Doppelbindungen im Komposit bestimmen. Er beträgt je nach Schichttiefe 20 bis 70 Prozent (Hellwig et al. 2003). Durch quantitative Bestimmung wurde für einige Komposite nach zwei Wochen Extraktion in Wasser eine gesamte Restmonomerabgabe in vitro von 0,2 bis zwei Gewichtsprozent festgestellt (Ortengren et al. 2001). Die Extraktion von Restmonomeren erfolgt nicht linear über die Zeit. Im Versuch fand Ferracane heraus, dass etwa 75% der eluierbaren Substanzen bereits innerhalb weniger Stunden freigesetzt werden, der größte Teil der eluierbaren Substanzen war bereits nach einem Tag Liegezeit in Wasser oder Ethanol/Wasser aus einem Komposit ausgelaugt (Ferracane, 1994).

Nach Alterung einer Restauration aus methacrylatbasierendem Komposit und der Politur der Oberfläche, wodurch zusätzlich die Sauerstoffinhibitionsschicht abgetragen wird, ist somit

der zu erwartende Gehalt an Doppelbindungen geringer als vor Alterung (Vanckerhoven et al. 1982) (Siderou et al. 2002).

Die Reparaturmöglichkeit älterer Füllungen, die zusätzlich oralem Milieu ausgesetzt waren, wurde von verschiedenen Autoren in vitro unter nachgeahmten Bedingungen untersucht. Verschiedene In-vitro-Prozeduren zur Alterung von Kompositoberflächen, wie die Lagerung bei 37°C in destilliertem Wasser (Ahlers, 2006) oder das Kochen in Wasser (Brendeke et al. 2007), das Thermowechselbad (Frankenberger et al. 2003)(Papacchini et al. 2007) oder das Tauchbad in Zitronensäure (Brendeke et al. 2007) sind gebräuchlich. Eine Autorengruppe fand heraus, dass auch nach längerer Lagerungsdauer des Substrats vor der Reparatur hohe Verbundfestigkeiten möglich sind. Voraussetzung hierfür waren allerdings das Beschleifen der Substratoberfläche mittels Hartmetallfräse und die Applikation eines Adhäsivs (Chiba et al. 1989). Weitere Studien bestätigen, dass das Anrauen gealterter Kompositoberflächen vor der Reparatur zu erhöhten Verbundfestigkeiten führt (Rodrigues et al. 2009). Neben rotierenden Schleifkörpern wie Diamanten (Bonstein et al. 2005), Karborundschleifern (Brosh et al. 1997) oder Schleifscheiben werden in neueren Veröffentlichungen auch Sandstrahlgeräte beschrieben (Lucena-Martín et al. 2001) (Bonstein et al. 2005) (Frankenberger et al. 2003)(Papacchini et al. 2007) (Rathke et al. 2008). Das Einbringen von Unterschnitten bringt dagegen keine Verbesserung, da diese häufig nicht vollständig gefüllt werden können und zu erhöhtem Materialstress führen (Shen et al. 2004). Verglichen mit unbehandelten Oberflächen verbessert das mechanische Anrauen allein schon die Verbundhaftung nach dem Auftrag einer neuen Kompositschicht. Die zusätzliche Verwendung eines Haftvermittlers verbessert diese Werte wesentlich (Rathke et al. 2008). Das Reparaturkomposit kann aufgrund der hohen Viskosität die Substratoberfläche nicht vollständig benetzen und wird möglicherweise während der Polymerisation durch Schrumpfungsspannung vom Material weggerissen. Es werden drei unterschiedliche Mechanismen vermutet, wie Haftvermittler die Verbundfestigkeit der Reparatur begünstigen

können:

- a) chemischer Verbund zur Komposit-Matrix
- b) physikalischer/chemischer Verbund zu exponierten Füllerpartikeln
- c) mikromechanische Retention durch Penetration des Haftvermittlers in Unebenheiten der Oberflächen

(Lucena-Martin et al. 2001) (Brosh et al. 1997)

Es wurde bisher eine Vielzahl verschiedener Adhäsive und/oder Reparaturprozeduren eingesetzt, teilweise in Kombination mit unterschiedlichen Kompositen als Substrat. Teils wurden Schmelzhaftvermittler (Swift et al. 1994) (Lucena-Martin et al. 2001), teils Dentinhaftvermittler (Tezvergil et al. 2003) (Papacchini et al. 2007) (Rathke et al. 2008) verwendet; spezielle Haftvermittler zur Reparatur von Kompositen sind derzeit nicht verfügbar. Auch Self-etch-Systeme wie Prime&Bond NT und OptiBond Solo Plus SE können verwendet werden, führen jedoch je nach verwendetem Substrat zu unterschiedlicher Wirksamkeit; in der Studie von *Teiveira et al.* ist die Haftfestigkeit zu Z100 (3M ESPE) beider Haftvermittler geringer als zu den anderen Hybridkompositen (AeliteFil (Bisco), Prodigy (SDS Kerr), TPH (Dentsply Caulk)) (Teixeira et al. 2005). Systeme zur tribochemischen Konditionierung wie Co-Jet wurden ebenso untersucht. *Hannig et al.* konditionierten ein Hybridkomposit (TetricCeram) mit Co-Jet, Monobond und dem zugehörige Adhäsiv (Heliobond), was zu hoher Scherhaftfestigkeit führte, fanden aber heraus, dass auch die alleinige Anwendung des Adhäsives zu befriedigenden Werten führte (Hannig et al. 2006). 2009 zeigten *Rodrigues et al.* anhand einer Studie mit zwei Substraten (Filtek Z250 und Filtek Supreme), dass Sandstrahlen und tribochemisches Silikatisieren im Zugversuch zu vergleichbarem Ergebnis führt (Rodrigues et al. 2009). Neueste Untersuchungen zeigen, dass der Einsatz von fließfähigen Kompositen die Verbundfestigkeit (Papacchini et al. 2008) und die marginale Integrität (Frankenberger et al. 2003) von Reparaturen verbessern. Die Anwendung von Silan alleine innerhalb der Reparaturprozedur

ist immer noch kontrovers diskutiert. In einigen Studien wird eine positive Korrelation zwischen Anwendung eines Silans und der Reparaturhaftfestigkeit hervorgehoben (Matsumura et al. 1995) (Tezvergil et al. 2003), andere fanden keinen signifikanten Einfluss (Rodrigues et al. 2009). In der Studie von *Brosh et al.* aus dem Jahr 1997 weist die Reparatur unter Verwendung eines ungefüllten Adhäsivs im Vergleich zur selben Prozedur mit zusätzlicher Applikation von Silan vor dem Adhäsiv keinen signifikanten Unterschied auf. *Papacchini et al.* beobachteten eine Verbesserung des Verbunds durch Anwendung eines Silans, wenn dieses warm luftgetrocknet wurde (Papacchini et al. 2007).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass zur Reparatur gealterter Kompositfüllungen die Applikation einer Zwischenschicht in Form eines niedrigviskösen Adhäsivs oder Komposits in Kombination mit einer mechanischen Erhöhung der Oberflächenrauigkeit des Substrats notwendig ist, um zuverlässige Resultate zu erhalten.

2.2 Lebensdauer von Kompositfüllungen

Während vor allem ältere Querschnittstudie tendenziell bessere Werte für Amalgam im Vergleich zu Komposite aufweisen, zeigen Longitudinalstudien, die vor allem in den letzten 15 Jahren durchgeführt wurden, etwa gleich gute Ergebnisse (Manhart et al. 2004)

Die Lebensdauer dentaler Restaurationen hängt von vielen verschiedenen Faktoren ab, die material-, -patienten oder behandlerabhängig sind. Hauptursachen für das Scheitern einer Restauration sind Sekundärkaries, Fraktur, marginale Defizite, Verschleiß und postoperative Beschwerden (Manhart et al. 2004).

Eine große Anzahl von Studien widmet sich der Lebensdauer von Kompositrestaurationen. Es existieren retrospektive Untersuchungen (Redman et al. 2003) (Brunthaler et al. 2003) (Forss and Widstrom, 2004) (Opdam et al. 2004) (Opdam et al. 2006), prospektive Studien (Van Dijken, 2001) (Van Nieuwenhuysen et al. 2003) (Van Dijken und Sunnegardh-Gronberg,

2005) (Kramer et al. 2005), ausserdem liegen einige relevante Reviews zur Thematik vor (Downer et al. 1999) (Hickel und Manhart, 2001) (Brunthaler et al. 2003) (Manhart et al. 2004) (Sarrett, 2005). Ein direkter Vergleich der Langlebigkeit anhand vorhandener Studien ist nahezu unmöglich, da es große Unterschiede im Studiendesign, der verwandten Materialien und Untersuchungszeiträume gibt. Retrospektive Querschnittsstudien unterscheiden sich von kontrollierten Longitudinalstudien, in denen selektierte Behandler ausgesuchte Patienten unter idealen Konditionen behandeln. Prospektive Studien verwenden meist USPHS/Ryge –Kriterien. Cvar & Ryge (Cvar und Ryge 1971) stellten die USPHS-Kriterien (U.S. Public Health Service) zur klinischen Bewertung von dentalen Füllungsmaterialien auf. Für die Beurteilung werden Faktoren wie Randständigkeit, Randverfärbungen, anatomische Form, Approximalkontakt, Sekundärkaries, postoperative Sensibilität, Farbänderungen und Verbleibquote herangezogen. (Cvar and Ryge, 1971) (Ryge and Snyder 1972). Es leuchtet ein, dass subjektive interpretative Unterschiede zwischen den Untersuchern und unterschiedlich gewählte Diagnosekriterien zu verschiedenen klinischen Bewertungen der Lebensdauer von Restaurationen führen (Hickel and Manhart, 2001). Eine durchschnittliche Lebensdauer von 6-8 Jahren von Kompositrestaurationen kann trotz der großen Variation der Angaben in den genannten Studien ermittelt werden.

2.2.1 Gründe für das Scheitern einer Restauration

Komposite sind durch festigkeitsverbessernde Modifikationen von Matrix und Füllstoffen und durch die Anwendung der Adhäsivtechnik deutlich haltbarer geworden (Buonocore, 1955). Diese Haltbarkeit ist sehr an eine sorgfältige Ausführung von adhäsiver Befestigung und Füllungslegung gebunden. Die Verwendung der Materialien ist techniksensitiv und birgt zahlreiche Fehlerquellen. Bei der Anwendung von Dentinadhäsiven kann zu langes Anätzen, Trocknung des Primers direkt nach Applikation, exzessives Trocknen nach dem Ätzvorgang oder nach Auftrag des Primers zu deutlich verminderter Verbundfestigkeit sowie Spaltbildung

führen (Frankenberger et al. 2000). Um die Folgen der bei der Polymerisation entstehenden Schrumpfungsvorgänge zu begrenzen, durch welche es im ungünstigsten Fall zu Randspalten (Roulet et al. 1991) oder Frakturen der Zahnhartsubstanz (Lambrechts et al. 1987) kommen kann, sind differenzierte Präparations- und Verarbeitungsstrategien eingeführt worden. Zu diesen gehören die Anwendung oben bereits erwähnter Haftvermittler, sowie die Applikation des Füllungswerkstoffes in einzelnen Inkrementen. Sofern die Gebrauchsanweisung des Herstellers nicht andere Werte vorgibt, sind maximal 2 mm starke Inkremente in Einzelschritten zu applizieren und nacheinander auszuhärten. Durch die Inkrementtechnik kann ein kleinerer C- Faktor erzielt werden. Der C-Faktor entspricht dem Verhältnis von gebundener zu ungebundener Oberfläche des Füllungswerkstoffes (Feilzer et al. 1987). Ein erhöhter C-Faktor (große gebundene Oberfläche) reduziert Fließvorgänge und die Adhäsion zur Zahnhartsubstanz ist gefährdet. Im Randbereich können Randspalten entstehen. Die Inkrementtechnik zielt ausserdem darauf ab, durch geringe Schichtdicke des Materials den Polymerisationsgrad des Werkstoffs zu erhöhen. Es ist bekannt, dass fehlende Umsetzung von Doppelbindungen bei lichthärtenden Systemen mit zunehmender Schichtdicke zunimmt (Ferracane 1985). Ungenügender Polymerisationsgrad führt zu reduzierten physikalischen Eigenschaften, verminderter Verschleißfestigkeit, mangelnder Pulpenverträglichkeit und ungenügender Farbstabilität (Gängler und Arnold, 2005). Auch die Einhaltung eines Protokolls zur Anwendung von Polymerisationslampen ist notwendig, um einen hohen Polymerisationsgrad zu erhalten und den Polymerisationsstress gering zu halten. Die Polymerisationstiefe ist abhängig vom Abstand der Kompositoberfläche zur Lichtquelle. Die Einhaltung der für den jeweiligen Lampentyp und den Werkstoff empfohlenen Belichtungsdauer ist zu beachten. Bei Verwendung von High-power LEDs reichen 20 Sekunden für ein 2 mm dickes Inkrement um beständige Ergebnisse zu erhalten (Kramer et al. 2008).

Die Techniksensitivität der Kompositmaterialien in Kombination mit der aufgrund begrenzter

physikalischer und chemischer Beständigkeit ohnehin endlichen intraoralen Lebensdauer führt zu Verschleißerscheinungen, die früher oder später eine Erneuerung oder Reparatur der Füllung notwendig machen.

2.3 Zusammensetzung der Komposite

2.3.1 Methacrylatbasierende Komposite

Im Jahr 1962 entwickelte *Bowen* das Bis-GMA (Bisphenol-A-Glycidylmethacrylat), welches als organische Matrix zusammen mit silanisiertem Quarzmehl als anorganischem Füllstoff den ersten dentalen Kompositwerkstoff (*Bowen*, 1963) ergab. Bis zu diesem Zeitpunkt wurden in der Zahnheilkunde seit den vierziger Jahren ungefüllte kalthärtende Kunststoffe wie Methylmethacrylate (MMA) verwandt (*Mc Lean*, 1987). Nachfolgende bei Mundtemperatur aushärtende Polymethylmethacrylate (PMMA) zeigten ein exothermes Reaktionsverhalten, ungenügende Abrasionsstabilität und starke Polymerisationsschrumpfung von über fünf Prozent (*Körper und Ludwig*, 1982). Aufgrund des hohen Restmonomergehalts waren sie pulpschädigend und verfärbten sich schon nach kurzer Liegedauer (*Geurtsen*, 1989).

Moderne zahnärztliche Komposite sind aus einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten zusammengesetzt. Die drei Hauptbestandteile konventioneller, auf Methacrylat basierender Komposite sind die organische Matrix, die disperse Phase (Füller) und die Verbundphase (Silane). Die organische Matrix besteht aus hochmolekularen Monomeren, bei denen es sich meist um Di- oder Triester der Methacrylsäure handelt. Diese sind Reaktionsprodukte (Ester) der Säure mit in der Regel hochmolekularen Alkoholen.

Die am häufigsten für Dentalkunststoffe verwendeten Monomere gehören zur Gruppe der Dimethylacrylate. Die im monomeren Zustand vorliegenden Methacrylatgruppen mit ihren reaktiven Doppelbindungen sind im Wesentlichen für die Reaktivität, d.h. die Polymerisationsreaktion verantwortlich. Unter Aufspaltung der endständigen Gruppen erfolgt

eine Vernetzung der Monomere zu einem dreidimensionalen stabilen Polymergerüst.

Neben den Monomeren Bis-GMA (Bisphenol-Glycidylmethacrylat) und UDMA (Urethan-Dimethacrylat) (Abbildung 1) können weitere Comonomere wie TEGDMA (Triethylen-Dimethacrylat) (Abbildung 1) oder EDMA (Ethylen-Dimethacrylat) Bestandteil der Matrix sein. Die einzelnen Monomere sind für die mechanischen Eigenschaften, die Wasseraufnahme, die Schrumpfung, den Polymerisationsgrad, die Viskosität, Feuchtigkeitsempfindlichkeit, allgemeine Mundbeständigkeit und die toxikologische Eigenschaften verantwortlich (Janda, 1988). In der Regel nimmt die Polymerisationsschrumpfung mit steigender Kettenlänge und steigendem Molekulargewicht ab, da sich das Verhältnis des Molekulargewichtes zur Anzahl der reaktiven Doppelbindungen erhöht. Die Viskosität hingegen nimmt meist mit steigendem Molekulargewicht zu. Um eine Steigerung der Molekülbeweglichkeit zu erhalten, die eine Erhöhung der Konversionsrate bewirkt, werden oft Verdünnermonomere (TEGDMA) zugesetzt. Dadurch nehmen chemische Resistenz und Festigkeit, aber auch die Polymerisationsschrumpfung zu (Ferracane und Greener 1986). Es muss also ein Optimum für das Verhältnis Monomer/Verdünnungsmittel gefunden werden, da das Mengenverhältnis von Matrixmonomer und Comonomer wesentlich die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Komposites beeinflusst.

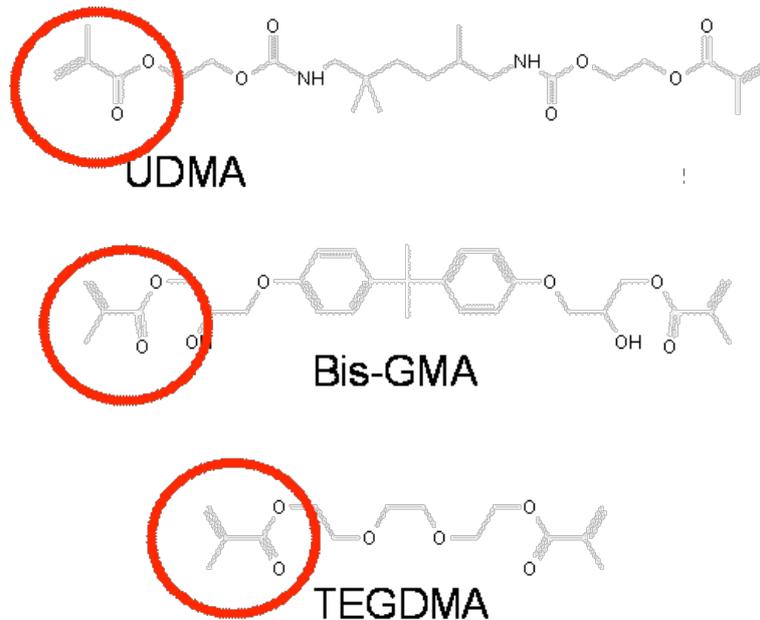


Abb. 1 Chemische Formel der Methacrylate

Von oben nach unten sind folgende Monomere dargestellt:

UDMA (Urethanedimethacrylat),

Bis-GMA (Bisphenol A Diglycidylmethacrylat),

TEGDMA (Triethyleneglycoldimethacrylat),

Rot markiert sind die Methacrylatgruppen der Monomere

Weitere Bestandteile der organischen Matrix sind Initiatoren, Inhibitoren, UV- Stabilisatoren, Pigmente und andere Additive. Während die Initiatoren die radikalische Polymerisationreaktion starten, dienen Inhibitoren, wie das Methoxyhydrochinon, der Inaktivierung radikaler Substanzen. Eine vorzeitige Polymerisation der Monomere wird somit verhindert. Der Initiationsprozess hat signifikanten Einfluss auf die Polymerisationskinetik und die Polymerstruktur. Rheologie und Langzeitstabilität des Netzwerks hängen davon ab (Moad et al. 2002). Farbstabilisatoren absorbieren UV-Wellen und wirken damit einer Verfärbung der Matrix entgegen. Pigmente erlauben die Herstellung einer Vielzahl an nuancierten Farbpasten. In die Kategorie anderer Additiva sind Weichmacher und optische Aufheller einzuordnen (Hellwig et al. 2003). Neben organischen Füllkörpern - Perlpolymere (Korngröße um 20-30 μm) und Splitterpolymere (Korngröße um 2-150 μm) - enthalten Komposite anorganische Füllkörper. Makrofüllerkomposite enthalten rein anorganische Partikel aus Quarz, Glas oder Keramik. Um eine Röntgenopazität zu erzielen, sind die Gläser

schwermetallhaltig (Barium-, Strontiumglas). Die durchschnittliche Füllkörpergröße liegt zwischen 1,5 und 15 μm . Makrofüller weisen ein schlechtes Verschleißverhalten auf und kommen als Füllungsmaterial heute nicht mehr zum Einsatz. Mikrofüllerkomposite enthalten Füllstoffe aus hochdispenser Kieselsäure (Siliziumdioxid) mit einer Größenverteilung zwischen 0,007 und 0,04 μm und einer mittleren Teilchengröße von 0,05 μm . Bedingt durch die kleine Füllkörpergröße lassen sich mikrogefüllte Kompositmaterialien optimal polieren und behalten ihren Oberflächenglanz. In den physikalischen Eigenschaften sind die Mikrofüllerkomposite den Hybridkompositen unterlegen. 85-90 Gew.-% der Füllkörper der Hybridkomposite sind Makrofüller und 10-15 Gew.-% sind Mikrofüller. Der Füllkörpergehalt des gesamten Materials ist auf bis zu 85% gesteigert (Hellwig et al. 2003). Während bei dem Oberbegriff Hybridkomposit mittlere Füllkörpergrößen bis zu 10 μm enthalten sind, enthält ein Feinpartikelhybridkomposit Füllkörper bis zu 5 μm Korngröße, ein Feinstpartikelhybridkomposit bis zu 3 μm und ein Submikrometerhybridkomposit eine mittlere Füllkörpergröße von unter 1 μm aber nicht unter 0,4 μm . Submikrometerhybridkomposite sind auch als Mikrohybridkomposite bekannt. Mit der Entwicklung der Nanokomposite ist es inzwischen möglich, Materialien zu verarbeiten, deren Polierbarkeit wie die eines Mikrofüllerkomposites ist, die aber darüber hinaus mechanische Eigenschaften aufweisen, die zu klassischen Hybridkompositen vergleichbar sind. Die Nanokomposite umfassen zum einen die Nanofüllerkomposite (Nanomikrofüllerkomposit), und zum anderen Nanohybridkomposite, die zu den Hybridkompositen zählen. Nanofüllerkomposite enthalten ausschließlich Füllkörper im Nanometerbereich. Es besteht aus einer Kombination von Nanomeren und Nanoclustern. Unter Nanomeren versteht man einzelne nichtagglomerierte Partikel mit einer Größe von 20-75 nm. Nanocluster sind locker vernetzte Agglomerate aus einzelnen Nanomeren. Sie haben eine Größe von 0,6-1,4 μm . Zudem sind feinstkörnige röntgenopake Zirkonoxid-Füllkörper in einer mittleren Größe von 2-5 nm integriert, die für die Röntgenopazität verantwortlich sind.

Nanohybridkomposite enthalten Füllkörper unterschiedlicher Korngröße, darunter auch Nanofüller. Nanohybridkomposite enthalten zusätzlich zu den Nanofüllern weitere größere Füllkörper im Mikrometerbereich. Dabei handelt es sich meist um konventionelle Glasfüller, wie sie in herkömmlichen Hybridkompositen vorkommen.

Füllkörper werden grundsätzlich silanisiert, um einen Verbund zwischen Matrix und Füllstoff zu erreichen. Spezielle Silane, wie hydrolisiertes Methacryloyloxypropyl-trimethoxysilan, sind organische Siliziumverbindungen. Die Silanolgruppen des Silans reagieren unter Wasserabspaltung mit den Hydroxylgruppen der silikatreichen Füllstoffe (Bowen 1979) (Bowen und Marjenhoff, 1993). Das noch freie Ende des bifunktionellen Silanmoleküls vermag mit den Kunststoffmonomeren zu polymerisieren und somit eine Bindung der Füllkörper mit der Kunststoffmatrix zu erzeugen.

Weitere Bestandteile von konventionellen Kompositen sind Photoinitiatoren oder thermische Initiatoren, die die radikalische Polymerisation der Methacrylate starten.

Beim physikalischen Aktivieren durch Licht oder Wärme zerfallen sie zu Radikalen. Als Initiator für die Lichtpolymerisation wirkt Kampherchinon zusammen mit Katalysatoren als reduzierende Substanz, z. B. mit einem tertiären aromatischen Amin, das als Elektronendonator fungiert. Das Kampherchinon absorbiert Licht der Wellenlänge 420-460 nm und produziert zusammen mit dem Elektronendonator Radikale, die die Polymerisation in Gang setzen, indem die im Monomer vorhandenen Doppelbindungen aufgespalten werden.

Das Kettenwachstum wird so lange fortgeführt bis zwei Radikale aufeinander treffen und/oder kein weiteres Monomer zur Reaktion zur Verfügung steht (Roulet, 1987). Ein Ende der Kettenbildung erfolgt jedoch auch in der Gegenwart von Luftsauerstoff. Der biradikale Sauerstoff kann mit den Monomer- und Initiatorradikalen interagieren und wirkt somit polymerisationshemmend (Roulet, 1987). An der Oberfläche des dem Sauerstoff ausgesetzten Materials bildet sich eine dünne, weniger gut polymerisierte Kompositschicht, die Sauerstoffinhibitionsschicht.

Seit der Einführung der Komposite im Jahre 1962 wurden zu deren Beschreibung viele Klassifikationssysteme eingeführt. Bis vor einigen Jahren wurden die Komposite anhand ihres Füllkörpertyps charakterisiert. Man unterteilte die Kunststoffe nach Füllkörpertyp (Lutz und Phillips, 1983), bzw. nach Art und Menge der Füllkörper (Willems et al. 1992). Spätestens seit der Einführung der Kompomere und Ormocere muss auch das Monomersystem bei der Differenzierung berücksichtigt werden.

In Tabelle 1 ist eine derzeit gültige Einteilung zusammengefasst,.

Tab. 1 Eine Einteilung von Kompositen nach ihrer Matrixzusammensetzung

Matrizeinteilung	Chemisches System	Beispiele
Komposite mit traditionellen Monomeren	klassische Dentalmatrix (z.B. Bis-GMA, UDMA, TEGDMA, Bis-EMA)	TetricEvo Ceram/Ivoclar Vivadent Charisma/HeraeusKulzer Filtek Supreme/3M Espe Grandio/Voco ClearfilMajesty/Kuraray
Kompomere (=Polyacrylsäure-modifizierte Komposite)	Im Vergleich zur klassischen Dentalmatrix hydrophilere Monomerbestandteile, z.B. durch polare Seitengruppen(z.B. COOH=Kompomere)	Dyract AP/Dentsply Compoglass F/Ivoclar Vivadent Hytac/3M Espe
Ormocere („organic modified ceramics“)	Anorganisch-organische Kopolymere als Matrix	Definite/Degussa Admira/Voco CeramX/Dentsply
Silorane	Siloranmonomer	Filtek Silorane/3M Espe
Komposite mit traditionellen + neuen Monomeren	Traditionelle Monomere +TCD-Urethan oder +DuPont-Monomer (DX 511) +Dimer-Säure modifizierte Methacrylate	Venus Diamond/Heraeus Kulzer Kalore/GC N´Durance/Septodont

Die Forderung nach zahnfarbenen ästhetischen Restaurationen hat zu einer Zunahme in der Nachfrage für Kompositmaterialien geführt und bis heute werden die Werkstoffe weiter modifiziert um die physikalischen und chemischen Eigenschaften zu verbessern.

Bei allen Verbesserungen der physikalischen Eigenschaften der Komposite besteht nach wie vor die Problematik der Polymerisationsschrumpfung und der resultierende Polymerisationsstress. Schrumpfung verursacht Spannungen im Material. Diese Spannungen können zu Randspalten, zu Rissen im Zahn oder Komposit und hierüber zu postoperativen Beschwerden führen. Die Reaktion der Monomere zu Polymeren konventioneller Komposite ist immer mit einem mehr oder weniger starken Schrumpfen verbunden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die größeren zwischenmolekularen Abstände der Van-der-Waals-Bindungen zwischen den Monomerbausteinen durch die sehr viel kürzeren Abstände der kovalenten Bindungen in den Polymerketten ersetzt werden. Die Schrumpfung hängt vom Polymerisationsgrad ab, sowie von der Molekülgröße der Monomere. Während des Aushärtens werden nicht alle C=C Doppelbindungen der Kompositmaterialien in C-C Einfachbindungen umgesetzt. Der Polymerisationsgrad (Anteil der in Polymere eingebauten Monomere) und die Konversionsrate (Prozentsatz der umgesetzten Doppelbindungen) geben Auskunft über die Vollständigkeit der Polymerisationsreaktion und sind abhängig von dem Härtungsmechanismus der Kompositmaterialien.

Konventionelle Komposite unterliegen nach wie vor einer Polymerisationsschrumpfung von 2-4 Vo. 1%, fließfähige Komposite weisen aufgrund des niedrigen Füllkörpergehalts einen Schrumpf um 4 Vol. %, Hybridkomposite einen Schrumpf von 1,9-3,5 Vol. % auf. (Guggenberger und Weinmann, 2000) (Weinmann et al. 2005)

Verschiedene Strategien wurden verfolgt, um eine Reduktion der Polymerisationsschrumpfung zu erreichen. Es wurden Komposite entwickelt, die einen erhöhten Füllkörperanteil haben, denen Präpolymerisate oder Nanofüllkörper beigemischt wurden

oder/und bei denen zum anderen auf kurzkettige Monomermoleküle, die eine höhere Schrumpfung verursachen verzichtet wurde.

Bei den 2007 eingeführten siloranbasierenden Kompositen wird ein Teil der Polymerisationsschrumpfung durch ringöffnende Monomersysteme kompensiert.

2.3.2 Siloranbasierende Komposite

Siloranbasierende Komposite besitzen eine neue Klasse von ringöffnenden Monomeren, mit einer neuen Chemie. Dieser Typ von Monomeren kann chemisch als eine Verschmelzung von Siloxanen und Oxirane angesehen werden, mit den Vor- und Nachteilen beider Stoffe. Silorane sollen neue hochreaktive und biokompatible Füllungswerkstoffe mit einer sehr geringen Polymerisationsschrumpfung darstellen.

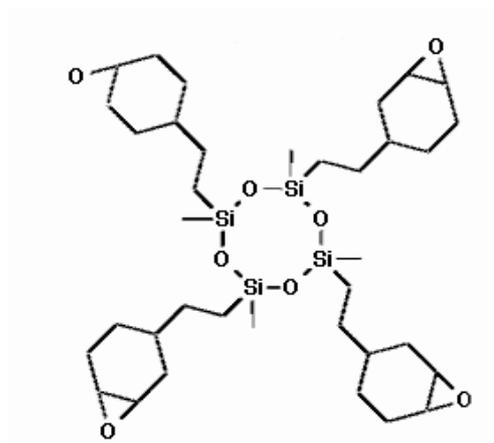


Abb. 2 Strukturformel des Siloranmonomers

2.3.2.1 Aufbau siloranbasierender Komposite

Das multifunktionelle Siloranmonomer, dessen Strukturformel in Abbildung 2 dargestellt ist, ist eine chemische Kombination von Siloxan und Oxiran, was sich auch in der Namensgebung widerspiegelt. Das Siloxan, eine Sauerstoff-Silizium-Verbindung, gibt dem Material eine

stark hydrophobe Charakteristik. Das Oxiran, synonym auch Epoxid, ist ein zyklisches organisches Molekül. Es gewährleistet als reaktive Gruppe des Monomers einen kationischen ringöffnenden Schritt in der Polymerisationsreaktion, welcher einen Teil der Polymerisationsschrumpfung während des Prozesses kompensiert. Der Polymerisationsprozess wird durch ein saures Kation initiiert, welches einen Oxiranring öffnet und damit ein neues saures Zentrum, ein Karbokation, generiert. Nach der Zugabe eines weiteren multifunktionellen Siloranmonomers kann über den geöffneten Epoxyring ein Netzwerk ausgebildet werden (Weinmann et al. 2005). Das initiierte System der Silorane besteht aus drei Komponenten: Campherchinon, Iodonium-Salz und einem Amin-Accelerator als Elektronendonator. Da Campherchinon als Photoinitiator eingesetzt wird können daher wie bei den Methacrylaten herkömmliche Polymerisationslampen zur Aktivierung benutzt werden. Es konnte gezeigt werden, dass siloranbasierende Komposite geringerem Schrumpfstress unterliegen (Weinmann et al. 2005), (Ilie et al. 2007) und gute mechanische Eigenschaften besitzen, die mit denen klinisch erfolgreicher methacrylatbasierender Komposite vergleichbar sind (Ilie und Hickel, 2006), (Ilie und Hickel, 2009). Durch die neuartige, ringöffnende Chemie der siloranbasierenden Komposite lassen sich theoretisch Komposite ohne Volumenschrumpfung herstellen. Nach Weinmann wird aber wegen der grundsätzlich stattfindenden Wasseraufnahme ein Wert von etwa 1,0% als ideal angesehen. Siloranbasierende Komposite wurden in vitro auf Zyto- und Genotoxizität getestet. In der Zytotoxizität liegen die siloranbasierenden Komposite im Bereich der Wirksamkeit von Monomeren in Kompositen auf Methacrylatbasis. Eine Genotoxizität konnte nicht nachgewiesen werden. Auch Chromosomenschäden konnten nicht beobachtet werden (Schweikl, et al. 2004).

Die Matrix siloranbasierender Komposite erforderte die Entwicklung neuer, angepasster Adhäsivsysteme (Guggenberger und Weinmann, 2000). Als ein Nachteil muss angesehen werden, dass das Adhäsivsystem nicht mit anderen Kompositen kombinierbar ist.

3 Fragestellung

Auf Methacrylat basierende Kompositmassen verschiedener Systeme oder Hersteller sind miteinander kompatibel und durchaus kombinierbar. Dies gilt für die heute bekannten markteingeführten traditionellen Komposite, die licht- oder chemischhärtend sind. Die Reaktion aller Matrixmoleküle konventioneller Komposite läuft nach dem gleichen chemischen Mechanismus ab (Radikalkettenreaktion), unabhängig von den verwendeten Füllern und ihrer Zusammensetzung. So sind zum Beispiel auch Hybridkomposite mit Feinstpartikelhybridkompositen kombinierbar.

Die chemische Kompatibilität verschiedener auf Methacrylat basierender Materialien zu Reparaturzwecken wurde in verschiedenen Studien evaluiert (Gregory et al. 1990) (Mitsaki-Matsou et al., 1991) (Sau et al. 1999). Es konnte gezeigt werden, dass die Kombination unterschiedlicher Methacrylat-Komposite zu ausreichender Verbundhaftung führt, wenn ein entsprechendes Reparaturverfahren angewandt wird (Anrauen, Auftrag eines Haftvermittlers). Ahlers benutzte 14 unterschiedliche methacrylatbasierende Komposite als Substrate, ein methacrylatbasierendes Komposit als Reparaturmaterial und ein definiertes Reparaturprotokoll (Anrauen, Auftrag eines auf Methacrylat basierenden Haftvermittlers). Er kam zu dem Ergebnis, dass sich die verschiedenen Materialien erfolgreich reparieren lassen, trotz Unterschieden in Füllkörpergehalt und Matrixzusammensetzung (Ahlers, 2006).

Über die Reparatur von siloranbasierenden Kompositen ist bisher wenig bekannt. *Tezvergil-Mutluay et al.* fanden 2008 in einem Scherversuch heraus, dass die Kombination von siloranbasierendem Komposit mit einem methacrylatbasierenden Komposit ohne Konditionierung der Verbundfläche im Vergleich zu Methacrylat- Methacrylat und Siloran-Siloran Verbund zu der im Versuch niedrigsten Verbundfestigkeit führt. Allerdings konnte durch Anwendung eines Phosphat-Methacrylat-Adhäsivs die Scherhaftfestigkeit signifikant

gesteigert werden.

Ziel der folgenden Untersuchung war es durch eine In-vitro-Studie die Reparaturfähigkeit der Materialgruppe der siloranbasierenden Komposite zu bestimmen.

Die Ermittlung der Reparaturhaftfestigkeit erfolgte mit der Methodik des Scherversuches, wobei ein siloranbasierendes Komposit mit siloranbasierendem Komposit aber auch mit einem gängigen methacrylatbasierenden Komposit repariert wurde unter Anwendung unterschiedlicher Haftvermittler. Ebenso sollte die Reparaturfestigkeit nach künstlicher Alterung durch Thermowechselbelastung und Lagerung in destilliertem Wasser ermittelt werden.

Folgende Punkte sollten im Einzelnen hierbei Beachtung finden:

- Können siloranbasierende Komposite mit gängigen Reparaturmethoden wie methacrylatbasierende Komposite repariert werden?

Es wird geprüft, ob die für methacrylatbasierende Komposite etablierte Reparaturmethode des Anrauhens und der Applikation von Haftvermittlern auch für siloranbasierende Komposite zugänglich ist.

- Sind siloranbasierende Komposite und methacrylatbasierende Komposite für Reparaturzwecke kompatibel?

Es ist von Interesse ob für den Fall, dass eine vorliegende Siloranefüllung nicht als solche identifiziert wird, diese auch mit einem methacrylatbasierenden Komposit repariert werden kann.

- Was bringt der Einsatz von fließfähigen Kompositen für die Reparatur von siloranbasierenden Kompositen?

Geprüft wird, ob fließfähige Komposite für die Reparatur siloranbasierender Komposite denselben Vorteil bringen, den sie für die Reparatur von methacrylarbasierenden Kompositen zeigten.

- Kann ein experimentelles fließfähiges siloranbasierendes Komposit, welches erstmalig für den Reparatursatz untersucht wird, die Siloranreparatur im Vergleich zu anderen Methoden, besonders im Vergleich zur Applikation des Silorane System Adhesive Bond verbessern?

4 Material und Methode

In der vorliegenden Untersuchung wird die Scherhaftfestigkeit von auf Füllungsflächen aufgebrauchte Restaurationsmaterialien bestimmt, die unter Einhaltung eines Reparaturprotokolls verarbeitet wurden.

Die Studie ist in zwei Teile eingeteilt. Teil I der Studie untersucht den Einfluss der Alterung auf Reparaturen mit siloranbasierendem Komposit. In Teil II der Studie wird der Einfluss unterschiedlicher Haftvermittler auf die Scherhaftfestigkeit von Reparaturen mit siloranbasierendem Komposit untersucht.

Folgende Parameter wurden hierfür variiert:

- **Füllung –**
 - siloranbasierendes Komposit (Filtek Silorane, 3M Espe, Seefeld, Deutschland) und
 - methacrylatbasierendes Komposit (Tetric Evo Ceram, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein)

- **Reparatur –**
 - siloranbasierendes Komposit (Filtek Silorane, 3M Espe, Seefeld, Deutschland) und -
 - methacrylatbasierendes Komposit (Tetric Evo Ceram, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein)

- **Haftvermittler –**
 - Teil I:
 - Adhäsiv
 - Heliobond (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein)
 - Silorane System Adhesive Bond (3M Espe, Seefeld, Deutschland)

Teil II zusätzlich:

fließfähige Komposite

-Tetric Evo Flow(Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein)

-Grandio Flow (Voco, Cuxhaven, Deutschland)

-experimentelles, auf Silorane basierendes fließfähiges Komposit, Hermes Flow (3M Espe, Seefeld, Deutschland)

Reparaturset: Clearfil Repair (Kuraray, Tokio, Japan)

Silan (Espe Sil, 3M Espe, St Paul, MN, USA) + Heliobond (Heliobond, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein)

→ Lagerung

Teil I:

1) Lagerung der Füllung

- keine Lagerung

- Lagerung für eine Woche in Aqua dest. bei 37° C oder

- Lagerung für einen Monat in Aqua dest. bei 37° C inklusive Thermowechselbad (Willytec GmbH, Gräfelfing, Deutschland) für 5000 Zyklen zwischen 5° und 55°C.

2) Lagerung des Verbundes

- keine Lagerung

- Lagerung für eine Woche in Aqua dest. bei 37° C oder

- Lagerung für einen Monat in Aqua dest. bei 37° C inklusive Thermowechselbad für 5000 Zyklen zwischen 5° und 55°C.

→ neun Kombinationsmöglichkeiten für die Art der Lagerung

Teil II

1) Lagerung der Füllung für eine Woche in Aqua dest. bei 37°C

2) Lagerung des Verbundes für eine Woche in Aqua dest. bei 37°C

4.1 Material

4.1.1 Verwendete Restaurationsmaterialien

Für diese Studie wurden das auf Siloran basierende Microhybridkomposit Filtek Silorane (3M Espe, Seefeld, Deutschland) und das auf Methacrylat basierende Nanohybridkomposit Tetric Evo Ceram (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) jeweils als Substrat und als Reparaturkomposit verwendet (Tabelle 2). Beide Komposite wurden in der Farbe A3 verwendet.

Tab. 2 Verarbeitungsmodus und Zusammensetzung der verwendeten Komposite

Komposite	Lot	Verarbeitung	Matrix	Füllkörper (Gehalt)
Tetric Evo Ceram A3 (Ivoclar Vivadent, Schaan, FL)	K34 039	20s Polymerisation 2 mm Inkremente	Bis-GMA, UDMA, DMDMA	Ba-Glas, YbF ₃ , MO, PPF (76 Gew%, 55 Vol%)
Filtek Silorane A3 (3M Espe, St. Paul, MN, USA)	7A Y	20s Polymerisation 2 mm Inkremente	1,3,5,7-Tetrakis(ethyl cyclohexane epoxy)- 1,3,5,7-tetramethyl cyclotetrasiloxane- methyl-bis[2-(7-oxabicyclo[4.1.0]hept-3-yl)ethyl]phenyl	Quartz, YbF ₆ (76 Gew%, 55 Vol%)

Abkürzungen - Bis-GMA: Bisphenol A Diglycidylmethacrylat; DMDMA: Diethylenglykoldimethacrylat
UDMA: Urethanedimethacrylat; Ba-Glas: Bariumglas YbF₃: Ytterbiumfluorid, MO: gemischte Oxide; PPF: präpolymerisierte Füllkörper

4.1.2 Verwendete Haftvermittler

Als Haftvermittler für die Reparatur wurden für den ersten Teil der Studie zwei Adhäsive ausgewählt: das auf Methacrylat basierende Heliobond (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) und das auf Phosphat-Methacrylat basierende Silorane System Adhesive Bond (3M Espe, Seefeld, Deutschland). Das Silorane System Adhesive Bond ist die zweite

Komponente des Silorane System Adhesive. Die erste Komponente des Systems, ein selbstätzender lichthärtender Primer, wurde in vorliegender Studie nur zur Herstellung der Proben der Kontrollgruppe eingesetzt, bei welcher die Haftung der Komposite an Dentin gemessen wurde, also eine Dentinbeteiligung vorlag. Entsprechend dem Silorane System Adhesive Bond wurde Heliobond, die entsprechende Komponente des Syntac classic Systems, eingesetzt. Auch hier wurden die Dentinhaftvermittler „Primer“ und „Adhäsiv“ des Systems nur für die Kontrollgruppen mit Dentinbeteiligung verwendet.

Im zweiten Teil der Studie wurden zusätzlich zu den oben genannten Haftvermittlern zwei fließfähige Komposite basierend auf Methacrylat (Tetric Evo Flow, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein und Grandio Flow, Voco, Cuxhaven, Deutschland) und ein experimentelles auf Silorane basierendes fließfähiges Komposite (Hermes Flow, 3M Espe, Seefeld, Deutschland) verwendet. Zusätzlich wurde ein Reparaturset eingesetzt, Clearfil Repair (Kuraray, Tokio, Japan), bestehend aus vier Komponenten, einem phosphorsäurehaltigen Ätzel, einem Primer, einem Adhäsiv und einem Silan, im Vergleich zur Applikation eines Silans (Espe Sil, 3M Espe, St Paul, MN, USA) mit anschließendem Auftrag von Heliobond.

Näheres zu den verarbeiteten Haftvermittlern und die fabrikatspezifischen Angaben der Hersteller sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tab. 3 Verarbeitung und Materialzusammensetzung der untersuchten Haftvermittler

Haftvermittler	Lot	Verarbeitung	Materialzusammensetzung
Heliobond (Ivoclar Vivadent, Schaan, FL)	K28890	Applikation einer dünnen Schicht, Verteilen mit Druckluft 10s Polymerisation	Bis-GMA, TEGDMA
Silorane System Adhesive Bond (3M Espe, St. Paul, MN, USA)	7AH	Applikation einer dünnen Schicht, Verteilen mit Druckluft 10s Polymerisation	TEGDMA, Phosphoric acid methacryloxy- hexylesters, 1,6- hexanediol dimethacrylate
Hermes Flow A3 (3M Espe, Seefeld, Deutschland)	H1Flow - PST014 6	Applikation einer dünnen Schicht, 20s Polymerisation	1,3,5,7-Tetrakis(ethyl cyclohexane epoxy)- 1,3,5,7-tetramethyl cyclotetrasiloxane-methyl-bis[2- (7-oxabicyclo[4.1.0]hept-3- yl)ethyl]phenyl
Tetric Evo Flow A3 (Ivoclar Vivadent, Schaan, FL)	K28619	Applikation einer dünnen Schicht, 20s Polymerisation	Bis-GMA, UDMA, Decandioldimethacrylat,
Grandio Flow A3 (Voco, Cuxhaven, Deutschland)	661487	Applikation einer dünnen Schicht, 20s Polymerisation	Bis-GMA, UDMA, TEGDMA, HEDMA
Clearfil Repair -K-etchant Gel	41258 00423A	Applikation 10s, Spülen, Trocknen	40% Phosphorsäure
-Porcelain Bond Activator	00221A	Activator und Primer 1:1, mischen, auftragen einwirken für 20s, trocknen	γ -MPS ,Bisphenol A polyethoxy dimethacrylat, MPTS
- Clearfil SE Bond Primer Clearfil SE Bond Bond (Kuraray, Tokio, Japan)	00791A 01150A	dünne Bondingschicht applizieren, verteilen mit Druckluft, 10s Polymerisation	MDP, HEMA, Wasser MDP, Bis-GMA, HEMA, hydrophobes Dimethacrylat, kolloidale Kieselerde
Espe Sil (3M Espe, St. Paul, MN, USA)	284122	60s applizieren, trocknen	Silan

Abkürzungen - Bis-GMA: Bis-phenol A Diglycidylmethacrylat; Bis-EMA: Bisphenol A polyethylenglycoldietherdimethacrylat; HEMA: 2-Hydroxyethylmethacrylat; HEDMA: Hexanedioldimethacrylate; MDP: 10-Methacryloyloxydecyltrihydrogenphosphat; γ -MPS: γ -Methacryloxypropyltrimethoxysilan; TEGDMA: Triethyleneglycoldimethacrylat UDMA: Urethanedimethacrylat.

4.2 Methode

4.2.1 Probenpräparation

Die Probenpräparation ist in Abbildung 3 a-e schematisch dargestellt.

Die Substrate der Proben wurden vorbereitet, indem die Komposite – Filtek Silorane und Tetric Evo Ceram mit einem sauberen Füllungsinstrument in eine vorgefertigte Kavität von 2 mm Tiefe und einem Durchmesser von 6 mm eines Acrylzylinders (Abbildung 3 a) appliziert wurden. Der Acrylzylinder war umgeben von einem Stahlzylinder. Nach Einbringen des Materials wurde die Oberfläche mit einem Frasacostreifen abgedeckt und anschließend mit einem Objektträger geglättet. Der Objektträger wurde dann wieder entfernt. Die so genannten „Füllungen“ (Abbildung 3 b) wurden mit einer LED-Lampe (Bluephase, IvoclarVivadent, Schaan, FL) für 20 Sekunden bei einer Lichtintensität von 1435 mW/cm^2 polymerisiert, wobei die LED-Lampe senkrecht und ohne Abstand zur Füllungsoberfläche positioniert war. Die Oberflächen der Füllungen wurden nach der Polymerisation mit einem Silikonkarbidpapier der Körnung 400 (Leco, St. Joseph, USA) angeraut. Die Proben wurden danach teilweise gelagert oder direkt der Reparaturprozedur zugeführt.

Vor der Reparatur wurden die Proben erneut angeraut, dann, um die Oberfläche von Schleifpartikeln zu reinigen, mit dem 37% Phosphorsäuregel Total Etch (IvoclarVivadent, Schaan, FL) für 30 Sekunden bedeckt und schließlich gründlich mit Wasser gespült und mit Druckluft getrocknet. Der Haftvermittler wurde entsprechend der Herstellerangaben wie in Tabelle 3 aufgetragen und polymerisiert (Abbildung 3 c). Die zylindrische Reparaturfüllung (Abb. 3 d) wurde in zwei Inkrementen von 2 mm Dicke und 3 mm Durchmesser mit Hilfe einer Matrize aufgetragen und wie die Füllung polymerisiert. Die vorab aus Registriersilikon angefertigte Matrize bestand aus zwei Hälften, die einen zylindrischen Hohlraum mit einem Durchmesser von 3 mm und einer Höhe von 4 mm umschlossen. Diese ließ sich anschließend seitlich drucklos entfernen.

Die fertigen Proben wurden entweder erneut gelagert oder direkt dem Scherversuch zugeführt.

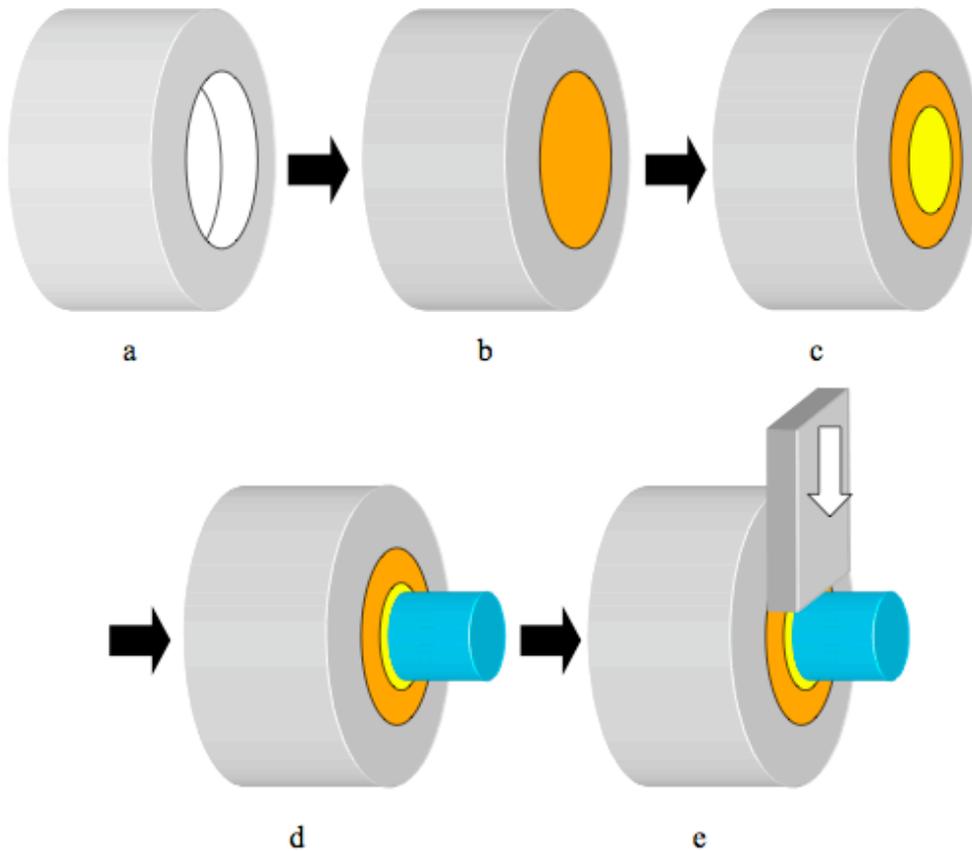


Abb. 3 a-e Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

a = präparierter Acrylzylinder zur Materialaufnahme

b = in den Acrylträger polymerisierte Kompositfüllung

c = auf die vorbereitete Probenoberfläche aufgetragener Haftvermittler

d = aufpolymerisierte Reparaturfüllung

e = Scherversuch

Um die Scherhaftfestigkeit zu messen wurden die Proben zur Messung in die entsprechende Abschervorrichtung einer Universalprüfmaschine eingespannt (MCE 2000ST, Quicktest Prüfpartner GmbH, Langenfeld, Deutschland).

Die gemessenen Scherkräfte wurden in einem Kraft-Dehnung-Diagramm aufgezeichnet. Die Vorschub-geschwindigkeit lag bei 0,5 mm/min.

Das Prinzip der Scherkraftmessungen besteht darin, dass der Scherstempel mit integrierter Kraftmessung mit einer festgelegten, gleichmäßigen Geschwindigkeit gegen den in der Einspannvorrichtung befestigten Prüfkörper gefahren wird (Abb. 3 e). Die Kraft steigt dann solange kontinuierlich an, bis es zur Abscherung des Materialzylinders von der Probe kommt. Eine Kraft-Dehnung-Grafik wurde bis zum Erreichen der Bruchlast aufgezeichnet. Die Ergebnisse der Bruchlast wurden für jeden einzelnen Prüfkörper in der Maßeinheit N in einer Tabelle festgehalten. Die Scherhaftfestigkeit errechnet sich aus der Bruchlast pro Fläche und wird in Megapascal (MPa) angegeben. Der Durchmesser der Reparaturfläche wurden bei jeder Probe an zwei Stellen gemessen und die Klebefläche ermittelt.

Die Scherhaftfestigkeit wurde mit der Formel $\delta_s = F/A$ berechnet, mit δ_s = Scherfestigkeit in MPa,

F = Scherkraft in N und A = Reparaturfläche in mm^2 .

4.2.2 Lagerung und Alterung der Prüfkörper

Im ersten Teil der Studie variierte die Lagerung der Proben wie im Folgenden beschrieben:

1) Lagerung der Füllung

- keine Lagerung
- Lagerung für eine Woche in destilliertem Wasser bei 37° C oder
- Lagerung für einen Monat in destilliertem Wasser bei 37° C inklusive Thermowechselbad (Willytec GmbH, Gräfelfing, Deutschland) für 5000 Zyklen zwischen 5° und 55°C.

2) Lagerung des Verbundes

- keine Lagerung
- Lagerung für eine Woche in destilliertem Wasser bei 37° C oder

- Lagerung für einen Monat in destilliertem Wasser bei 37° C inklusive Thermowechselbad für 5000 Zyklen zwischen 5° und 55°C.

→ somit entstehen neun Kombinationsmöglichkeiten für die Art der Lagerung

Im zweiten Teil der Studie wurde sowohl die Füllung für eine Woche bei 37°C in destilliertem Wasser gelagert als auch anschließend der Verbund für eine Woche bei 37°C in destilliertem Wasser gelagert.

4.2.3 Bruchmodusanalyse

Die Untersuchung des Bruchmodus erfolgte unter dem Stereomikroskop (Axioskop 2Mat Zeiss). Für ausgesuchte Proben erfolgte anschließend eine Untersuchung im Rasterelektronenmikroskop (Supra 55 VP Zeiss) bei unterschiedlicher Vergrößerung.

Folgende Differenzierung erfolgte bei Betrachtung der Bruchflächen:

Kohäsive Fraktur – innerhalb der Kompositschicht

Adhäsive Fraktur – innerhalb der Adhäsivschicht

Gemischte Fraktur – adhäsive und kohäsive Fraktur

Analysiert wurde der prozentuale Anteil der Frakturmodi der einzelnen Versuchsgruppen.

4.2.4 Versuchsaufbau Teil I und Teil II der Studie

I Einfluss der Alterung auf Reparaturen mit Silorane-Komposite

Für die Reparatur der Substrate Tetric Evo Ceram (M) und Filtek Silorane (S) wurden zwei unterschiedliche Adhäsive eingesetzt – das auf Methacrylat basierende Heliobond (HB) und das auf Phosphat-Methacrylat basierende Silorane System Adhesive Bond (SB). M und S

wurden beide auch als Reparaturfüllung eingesetzt. Es wurden folgende Materialkombinationen getestet:

Füllung+Reparaturfüllung+Haftvermittler:

M+M+HB,

S+S+SB,

S+M+SB,

S+M+HB

Die übrige Reparaturprozedur entsprach dem beschriebenen Protokoll.

Wie in *Lagerung und Alterung der Prüfkörper* aufgeführt, variierte neben den verwendeten Materialien die Lagerung der Proben. Die im Acrylkörper eingebettete Füllung (Fllg) wurde entweder nicht gelagert, für eine Woche (Wo) oder für einen Monat inklusive Thermowechselbad (Mo). Anschließend wurde die gesamte Reparatur - Füllung mit verbundener Reparaturfüllung - gelagert (Wo, Mo oder ohne Lagerung). Aus diesen Parametern ergaben sich 36 Gruppen (n = 10), die in Tabelle 4 aufgeführt sind.

Die Proben wurden anschließend im Scherversuch bis zum Bruch belastet.

Tab. 4 Teil I – Versuchsgruppen – insgesamt 36 Gruppen

	M+M+HB	S+S+SB	S+M+SB	S+M+HB
Fllg + Rep	x	x	x	x
Fllg + Rep Wo	x	x	x	x
Fllg + Rep Mo	x	x	x	x
Fllg Wo + Rep	x	x	x	x
Fllg Wo + Rep Wo	x	x	x	x
Fllg Wo + Rep Mo	x	x	x	x
Fllg Mo + Rep	x	x	x	x
Fllg Mo + Rep Wo	x	x	x	x
Fllg Mo + Rep Mo	x	x	x	x

M = Tetric Evo Ceram; S = Filtek Silorane; HB = Heliobond; SB = Silorane System Adhesive Bond; Fllg = Füllung; Rep = Reparatur; Wo = eine Woche; Mo = ein Monat+Thermowechselbad
Fllg/Rep ohne Bezeichnung = keine Lagerung

II Einfluss unterschiedlicher Haftvermittler auf die Scherhaftfestigkeit von Reparaturen mit Silorane-Komposit

In diesem Teil der Studie wurden 7 verschiedene Materialien als Haftvermittler zwischen Füllung und Reparaturfüllung getestet. Es wurden 70 Füllungen aus Filtek Silorane nach in 4.2.1 beschriebenem Verfahren hergestellt, angeraut und gereinigt und für eine Woche bei 37°C in Aqua dest. gelagert. Alle in Tabelle 3 unter Haftvermittler aufgeführten Produkte wurden für die Reparatur von siloranbasierendem Komposit getestet. Die Adhäsive Heliobond (HB) und Silorane System Adhesive Bond (SB) wurden mittels Applikator dünn aufgetragen, mit Druckluft dünn verblasen und für 10 Sekunden polymerisiert.

Die auf Methacrylat basierenden fließfähigen Komposite Grandio Flow (GF) und Tetric Evo Flow (TF) wurden je einmal mittels Spatel dünn auf die Füllung aufgetragen und polymerisiert (GF1 und TF1) und für eine andere Probengruppe einmal aufgetragen und mit Druckluft dünn verblasen, dann polymerisiert (GF2 und TF2). Das experimentelle fließfähige Komposit Silorane Hermes Flow (SF) wurde ausschließlich mittels Spatel dünn appliziert.

Mehrere Arbeitsschritte waren für das Clearfil Repair Kit (CR) notwendig. Nach Ätzen für 10 Sekunden mit 40 % Phosphorsäure wurden Porcelain Bond Activator und Bond Primer 1:1 gemischt, für 20 Sekunden auf die Füllungsoberfläche einmassiert und getrocknet, dann wurde das zugehörige Bonding dünn aufgetragen und 10 Sekunden polymerisiert.

Für eine weitere Gruppe wurde Silan (Espe Sil, 3M Espe) für 60 Sekunden auf die Füllungsoberfläche aufgetragen und getrocknet, anschließend Heliobond appliziert und 10 Sekunden polymerisiert (ES/HB).

Dann konnte die Reparaturfüllung entsprechend oben beschriebenem Protokoll erfolgen. Nach der Reparatur wurden die Proben erneut für eine Woche bei 37°C in destilliertem Wasser gelagert.

Folgende Kombinationen von Füllung, Reparaturfüllung und Haftvermittler wurden gewählt (Füllung+Reparatur+Haftvermittler):

S+S+SB, S+S+SF, S+M+SB, S+M+HB, S+M+SF, S+M+TF1, S+M+TF2, S+M+GF1, S+M+GF2, S+M+CR, S+M+ES/HB.

Des Weiteren wurde eine reine Methacrylatgruppe, M+M+TF, als Referenzgruppe hergestellt. Als Füllungsmaterial sowie als Reparaturfüllungsmaterial wurde Tetric Evo Ceram verwendet. Als Haftvermittler wurde Tetric Evo Flow appliziert. Das weitere Vorgehen entspricht oben beschriebenem Protokoll.

Zusätzlich wurden zylindrische Proben von Filtek Silorane und Tetric Evo Ceram, hergestellt wie die Reparaturfüllung, mit den zugehörigen Dentinadhäsiven (Silorane System Adhesive, 3M Espe/ Syntac, Ivoclar Vivadent) an Dentin (D) gebondet. Hierfür wurden 10 Molaren humaner Herkunft mit einer Niedertourensäge (Isomet, Buehler, Scotia, USA) 2 mm unterhalb der Schmelz-Dentingrenze horizontal in zwei Hälften geteilt. Die Hälften wurden randomisiert in zwei Versuchsgruppen aufgeteilt. Das Vorgehen ist in Abbildung 4 schematisch dargestellt.

Die Zwei Gruppen – D+S und D+M dienen als Referenzgruppen.

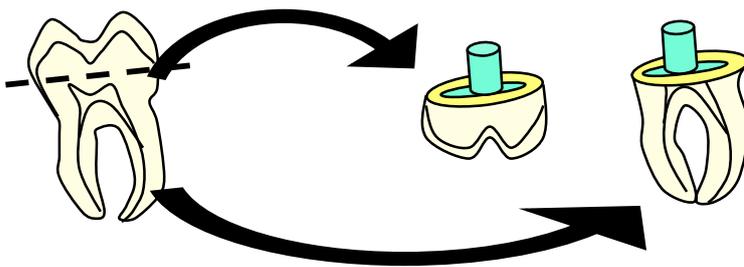


Abb. 4 Schematische Darstellung der Referenzprobenherstellung

4.2.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit dem Programm SPSS für Windows in der Version 17. Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen wurden mittels multivarianter ANOVA analysiert. Als Post-Hoc-Tests wurde der Tukey-HSD-Test gewählt. Das Signifikanzniveau wurde auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

Ein allgemeines lineares Modell wurde ausgeführt um die Haupteffekte zu identifizieren mit dem abhängigen Parameter Scherhaftfestigkeit und den unabhängigen Parametern Füllungs-material, Reparaturmaterial, Haftvermittler, Alterung der Füllung und Alterung der Reparatur. Als Effektstärke ist das partielle Eta-Quadrat angegeben (η^2).

Der Bruchmodus wurde nach seinem prozentualen Vorkommen deskriptiv ausgewertet.

5 Ergebnisse

5.1 Teil I: Einfluss der Alterung auf Reparaturen mit Silorane-Komposite

5.1.1 Haftwerte

In Tabelle 5 sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Haftfestigkeit zusammengefasst. Die Haftwerte sind jeweils für die Gruppen mit verschiedener Alterungsprozedur dargestellt und nach der Kombination der Füllungs-, Reparaturfüllungs-materialien und Haftvermittlern aufgeschlüsselt.

Die Daten wurden mittels ANOVA analysiert. Mit dem post-Hoc-Test Tukey HSD wurden paarweise multiple Vergleiche benutzt um statistisch homogene Untergruppen zu identifizieren, welche in Tabelle 4 mit denselben obenstehenden Buchstaben gekennzeichnet sind (Signifikanzniveau $\alpha = 0.05$).

Tab. 5 Mittelwerte und Standardabweichungen (SA) der Haftfestigkeit in MPa der verschiedenen Reparaturen bei unterschiedlicher Lagerung (ANOVA)

Subgruppen, die sich nicht signifikant unterscheiden, sind mit denselben hochgestellten Buchstaben ausgewiesen
Abkürzungen: M=Tetric Evo Ceram; S=Filtek Silorane; HB=Heliobond; SB=Silorane System Adhesive Bond; Fllg=Füllung; Rep=Reparatur; Wo=eine Woche; Mo=ein Monat Fllg/Rep ohne Bezeichnung=keine Lagerung erfolgt

	M+M+HB	S+S+SB	S+M+SB	S+M+HB
Fllg + Rep	17,5 ^{cdefghij} (2,7)	8,0 ^{abc} (0,8)	14,4 ^{bcdefghi} (3,1)	9,7 ^{abcde} (1,3)
Fllg + Rep Wo	31,9 ⁿ (10,7)	29,8 ^{klmn} (7,2)	14,2 ^{bcdefghi} (3,6)	11,2 ^{abcdef} (3,6)
Fllg + Rep Mo	28,0 ^{ijklmn} (9,6)	31,8 ^{mn} (7,0)	26,2 ^{ijklmn} (8,1)	10,8 ^{abcdef} (5,7)
Fllg Wo + Rep	14,1 ^{bcdefghi} (2,9)	4,1 ^a (2,1)	9,0 ^{abcde} (3,4)	6,5 ^{ab} (2,6)
Fllg Wo + Rep Wo	26,7 ^{ijklmn} (8,8)	19,4 ^{defghijk} (5,8)	22,7 ^{ghijklmn} (12,8)	17,6 ^{cdefghij} (8,6)
Fllg Wo + Rep Mo	30,2 ^{lmn} (3,6)	26,7 ^{ijklmn} (5,7)	23,3 ^{hijklmn} (7,2)	10,2 ^{abcde} (4,2)
Fllg Mo + Rep	12,9 ^{abcde} (4,7)	7,51 ^{abc} (1,6)	12,1 ^{abcde} (2,0)	8,2 ^{abc} (2,5)
Fllg Mo + Rep Wo	22,7 ^{ghijklmn} (6,0)	19,9 ^{efghijkl} (8,8)	15,2 ^{bcdefghi} (7,5)	10,9 ^{abcdef} (4,1)
Fllg Mo + Rep Mo	24,7 ^{ijklmn} (6,0)	24,3 ^{ijklmn} (4,8)	17,7 ^{cdefghij} (5,3)	9,4 ^{abc} (3,3)

Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen M+M+HB und S+S+SB gefunden, ausgenommen bei Lagerung der Füllung für eine Woche ohne zusätzliche Lagerung des Verbunds (Fllg Wo +Rep). M+M+HB und S+S+SB erbrachten die höchsten Reparaturhaftwerte nach Lagerung von Füllung und Verbund. Als höchster Mittelwert konnten 31,9 MPa für die Gruppe M+M+HB (Fllg+Rep Wo) und 31,8 MPa für S+S+SB ermittelt werden, gefolgt von der S+M+SB Gruppe mit 26,2 MPa (Fllg +Rep 1Mo). Ausser der Lagerung Fllg +Rep Wo, bei der S+M+SB eine geringe Haftfestigkeit aufweist, unterscheiden sich M+M+HB, S+S+SB und S+M+SB nicht signifikant voneinander. Die schwächste Gruppe war S+M+HB, die nach Lagerung signifikant geringere Scherhaftfestigkeit als M+M+HB und S+S+SB zeigt. Für alle Gruppen gilt: die Scherhaftfestigkeit steigt mit der Lagerung des Verbunds, jedoch konnte kein signifikanter Unterschied zwischen der Lagerung für 1 Woche oder 1 Monat inklusive Thermowechselbad festgestellt werden.

Ein Allgemeines Lineares Modell (GLM) wurde ausgeführt, um die Haupteffekte zu identifizieren. Als Effektstärke ist das partielle Eta Quadrat (η^2) angegeben, je größer (η^2) desto größer der Einfluss des Parameters.

Die Scherhaftfestigkeit wurde als abhängiger Parameter eingesetzt und Füllungsmaterial, Reparaturmaterial, Haftvermittler, Lagerung der Füllung, Lagerung des Verbunds als unabhängige Variablen. Den stärksten Effekt auf die Scherhaftfestigkeit hat die Lagerung des Verbunds ($\eta^2= 0,500$), gefolgt von der Art des Füllungsmaterials (0,298), der Wahl des Haftvermittlers (0,107) und der Lagerung der Füllung (0,091).

Tab. 6 Allgemeines lineares Modell mit Eta-Quadrat Statistik

Je größer der Eta-Quadrat-Wert desto größer der Einfluss der getesteten Parameter auf die Scherhaftfestigkeit

Abhängige Variable: Scherhaftfestigkeit [MPa]

Quelle	Partielles Eta-Quadrat
Lagerung des Verbunds	,500
Art des Füllungsmaterials	,298
Haftvermittler	,107
Lagerung der Füllung	,091
Art des Reparaturmaterials	,040

a Unter Verwendung von Alpha = ,05 berechnet

b R-Quadrat = ,695 (korrigiertes R-Quadrat = ,662)

Zusätzlich sind in nachfolgenden Boxplotdiagrammen (Abbildung 4 und 5) der Einfluss der Lagerung von Füllung und Verbund auf die Haftwerte der Reparatur von auf Methacrylat (Abbildung 6) und auf Silorane (Abbildung 5) basierendem Füllungsmaterial dargestellt. Dabei sieht man einen deutlichen Anstieg der Scherhaftfestigkeit nach Lagerung des Verbunds (Unterschied zwischen roten und grünen Boxplots) für beide Füllungsmaterialien und eine geringe Abnahme der Haftfestigkeit bei Lagerung der Füllung (Abnahme der Höhe aller Boxplots von links nach rechts).

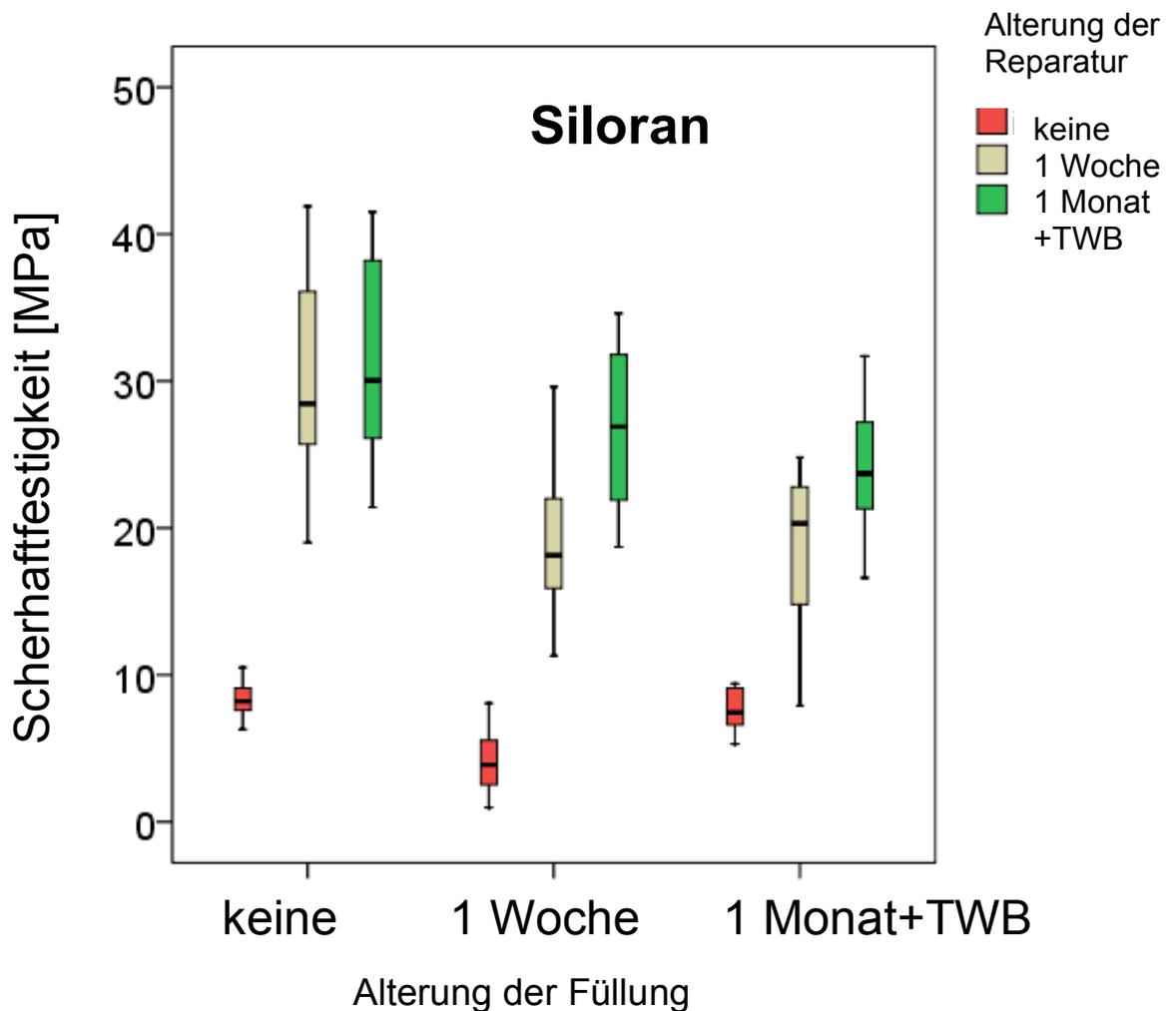


Abb. 5 Einfluss der Lagerung von Füllung und Verbund auf die Scherfestigkeit der Reparatur von siloranbasierendem Komposit
TWB = Thermowechselbad

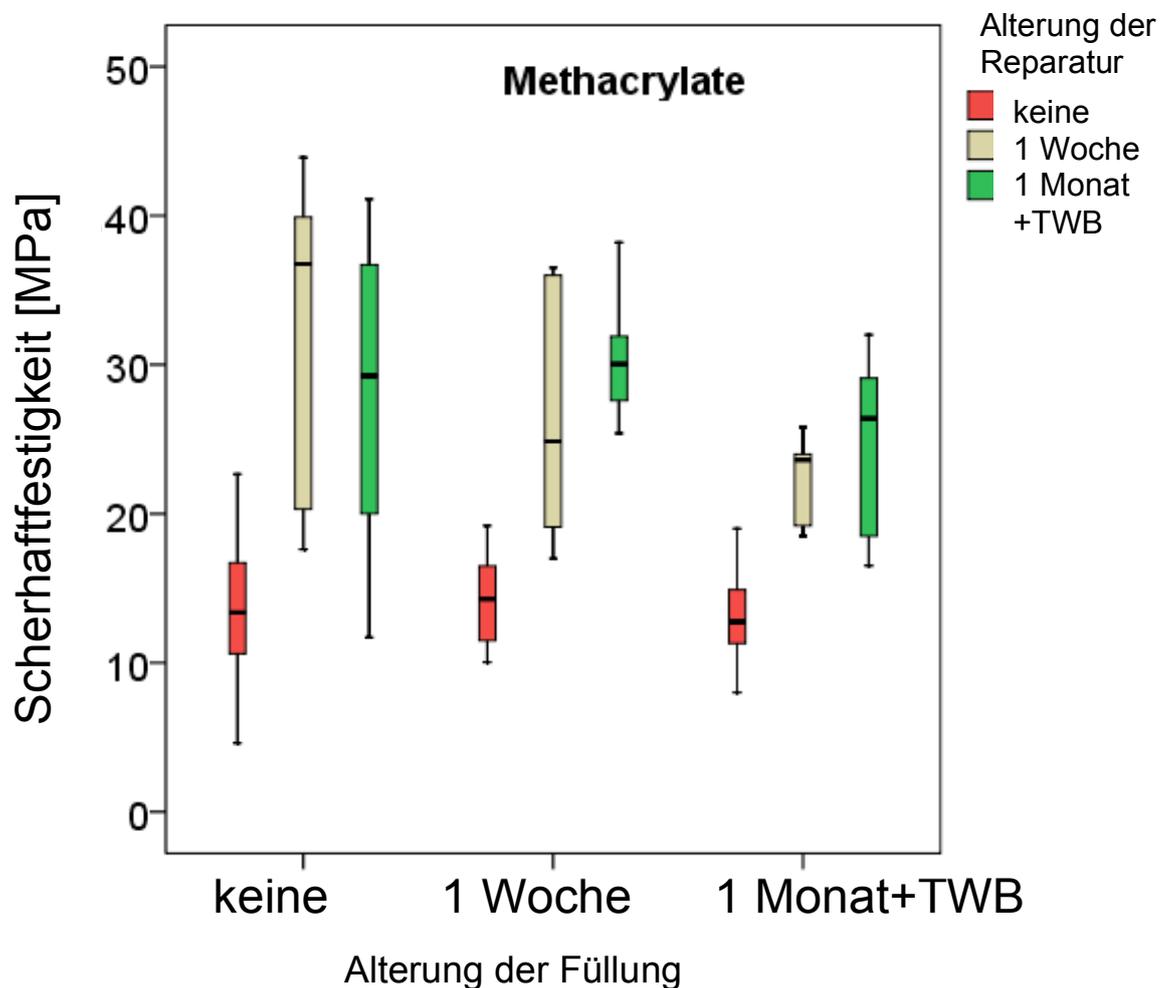


Abb. 6 Einfluss der Lagerung von Füllung und Verbund auf die Scherhaftfestigkeit der Reparatur von methacrylatbasierendem Komposit
TWB = Thermowechselbad

Die Analyse der Bruchflächen ist in Tabelle 7 dargestellt. Drei Frakturtypen wurden unterschieden: kohäsive Fraktur- innerhalb der Komposite; adhäsive Fraktur- innerhalb der Adhäsivschicht und gemischte- kohäsiv und adhäsive Frakturmodi. Folgende Gruppen wiesen den höchsten Anteil adhäsiver Frakturmodi auf:

SWo+MWo+HB (60%), SMo+MWo+HB (60%), M+MMo+HB (90%), MWo+MMo+HB (70%), S+SMo+SB (60%). Ausschließlich kohäsive Frakturen lagen bei folgenden Gruppen vor: M+M+HB, S+M+SB, SWo+S+SB, SWo+M+SB, MMo+M+HB, SMo+S+SB,

SMo+M+SB, S+MWo+SB, SWo+MWo+SB, S+MWo+SB, SWo+MMo+SB,
SMo+MMo+SB.

(M = methacrylatbasierendes Komposit; S = siloranbasierendes Komposit; HB = Heliobond;

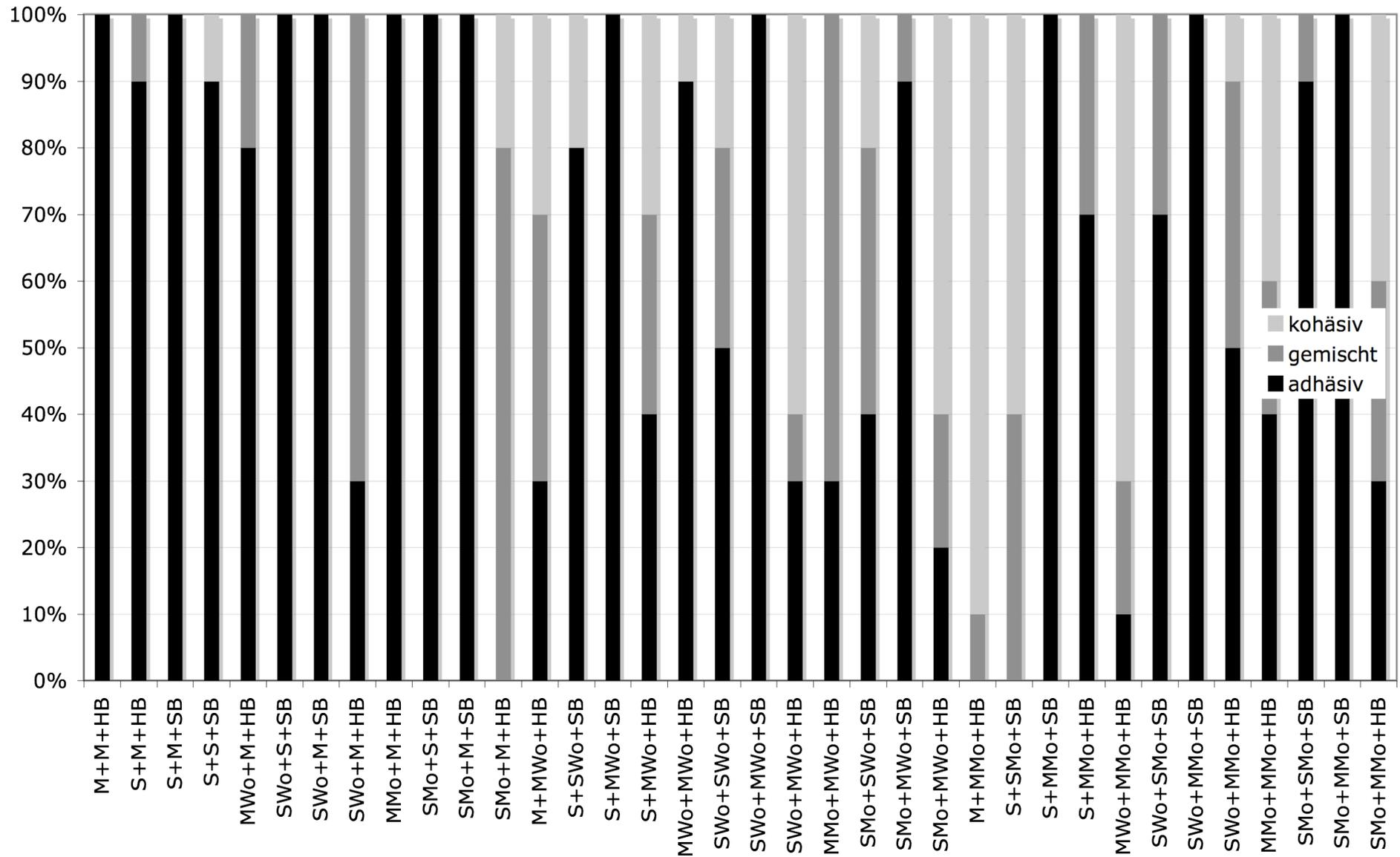
SB = Silorane System Adhesive Bond; Fllg/Rep ohne Bezeichnung = keine Lagerung erfolgt;

Wo = Lagerung 1 Woche; Mo = Lagerung 1 Monat+Thermowechselbad)

Tabelle 7 fasst die Ergebnisse zusammen.

Tab. 7 Prozentualer Anteil der Bruchmodi - adhäsiv, kohäsiv, gemischt - der 36 Versuchsgruppen

M = methacrylatbasierendes Komposit; S = siloranbasierendes Komposit; HB = Heliobond; SB = Silorane System Adhesive Bond
 Fllg/Rep ohne Bezeichnung = keine Lagerung erfolgt; Wo = Lagerung 1 Woche; Mo = Lagerung 1 Monat



5.2 II Einfluss unterschiedlicher Haftvermittler auf die Scherhaftfestigkeit von Reparaturen mit Silorane-Komposit

5.2.1 Haftwerte

Wie in 3.1.1 wurden die entstandenen Bruchlastwerte (N) durch die Haftfläche (mm) geteilt, um die Haftwerte in MPa zu erhalten. Dann wurden die Mittelwerte sowie die Standardabweichungen (SA) ermittelt, welche in Tabelle 8 zusammengefasst sind. Die Haftwerte sind für 11 Gruppen Reparatur von Siloranefüllungen mit verschiedener Kombination der Reparaturfüllungsmaterialien und Haftvermittlern, eine Vergleichsgruppe mit Methacrylatfüllung und –flow und zwei Referenzgruppen mit Dentin dargestellt.

Mittels ANOVA wurden signifikante Unterschiede unter den Gruppen ($p < 0.05$) analysiert, welche in Tabelle 5 mit unterschiedlichen obenstehenden Buchstaben gekennzeichnet sind.

Tab. 8 Mittelwerte und Standardabweichungen (SA) der Scherhaftfestigkeit der Reparaturen von Silorane und Referenzgruppen in MPa (ANOVA)

Subgruppen, die sich nicht signifikant unterscheiden, sind mit denselben hochgestellten Buchstaben ausgewiesen
Abkürzungen: M=Tetric Evo Ceram; S=Filtek Silorane; HB=Heliobond; SB=Silorane System Adhesive Bond; D=Dentin; SF = Hermes Flow; TF = Tetric Evo Flow; GF = Grandio Flow; CR = Clearfil Repair; ES = Espe Sil

S+M+SF	6.8 ^a (3.0)
S+M+HB	10.2 ^{ab} (4.2)
S+M+GF1	15.6 ^{abc} (6.3)
S+S+SB	19.4 ^{bc} (5.8)
S+M+TF1	21.3 ^{bcd} (6.9)
D+S	21.4 ^{bcd} (8.6)
S+M+GF2	22.4 ^{cde} (9.1)
S+M+SB	23.3 ^{cde} (7.3)
S+M+TF2	26.2 ^{def} (7.7)
D+M	31.6 ^{defg} (11.0)
S+S+SF	33.0 ^{efg} (11.4)
S+M+ES/HB	37.8 ^{fg} (8.9)
S+M+CR	38.6 ^g (6.9)
M+M+TF	42.2 ^g (4.7)

Die Methacrylat–Methacrylat Komposit Kombination M+M+TF erzielte mit 42.2 MPa den höchsten durchschnittlichen Scherhaftfestigkeitswert.

Bezüglich der Reparatur von Siloranekomposit wurden für die Gruppen S+M+CR und S+M+ES/HB die höchsten Scherhaftfestigkeitswerte ermittelt, gefolgt von der S+S+SF Gruppe. Die Mittelwerte der drei genannten Gruppen sind signifikant höher als die Kontrollgruppe D+S. Alle anderen Gruppen, ausgenommen die S+M+SF Gruppe mit niedrigen Werten, unterscheiden sich nicht signifikant von der D+S-Kontrolle. Die S+M+SF Gruppe zeigte die geringste Scherhaftfestigkeit aller Gruppen. Bessere Haftfestigkeit konnte erzielt werden, wenn anstatt des fließfähigen siloranbasierenden Komposit ein auf Methacrylat basierendes fließfähiges Komposit benutzt wurde. Wenn das methacrylatbasierende fließfähige Komposit Tetric Evo Flow mittels Füllungsinstrument dünn appliziert wurde (S+M+TF2 group), fanden sich Scherhaftfestigkeitswerte vergleichbar mit denen der S+S+SF und S+M+ES/HB Gruppe. Dasselbe fließfähige Komposit verteilt mittels Druckluft (S+M+TF1 Gruppe) führte zu verringerten Werten, signifikant niedriger als die Werte der S+S+SF Gruppe. Derselbe Effekt zeigt sich bezüglich der S+M+GF1 und S+M+GF2 Gruppe. Hier wurde das fließfähige methacrylatbasierte Komposit Grandio Flow einmal mittels Spatel und einmal mit Druckluft verteilt.

Die Scherhaftfestigkeit von Reparaturen mit dem Silorane System Adhesive Bond als Haftvermittler zwischen Füllung aus siloranbasierendem Komposit und Reparatur aus methacrylatbasierendem Komposit ist signifikant geringer als die S+M+ES/HB und S+M+CR Reparaturen, wobei jeweils ein Silan und ein auf Methacrylat, bzw. Phosphatmethacrylat (S+M+CR) basierender Haftvermittler verwandt wurde.

Die Ergebnisse aus Tabelle 5 sind grafisch in einem Balkendiagramm in Abbildung 7 zu sehen.

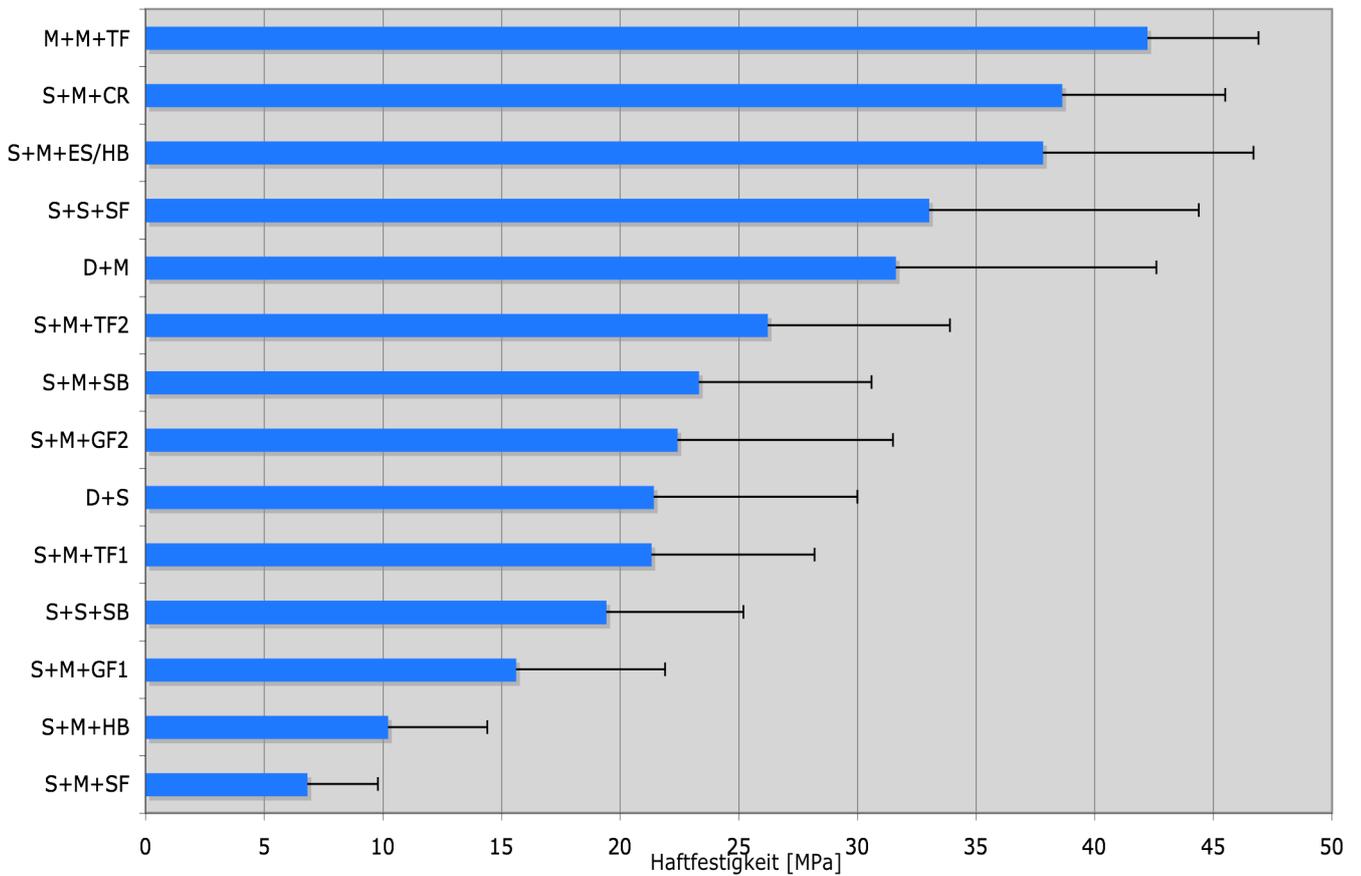


Abb. 7 Scherhaftfestigkeit der Proben von Reparaturen mit siloran- und methacrylatbasierendem Komposit unter Anwendung unterschiedlicher Haftvermittler

Abkürzungen: M = methacrylatbasierendes Komposit; S = siloranbasierendes Komposit; HB=Heliobond; SB=Silorane System Adhesive Bond; D=Dentin; SF = Hermes Flow; TF = Tetric Evo Flow; GF = Grandio Flow; CR = Clearfil Repair; ES = Espe Sil

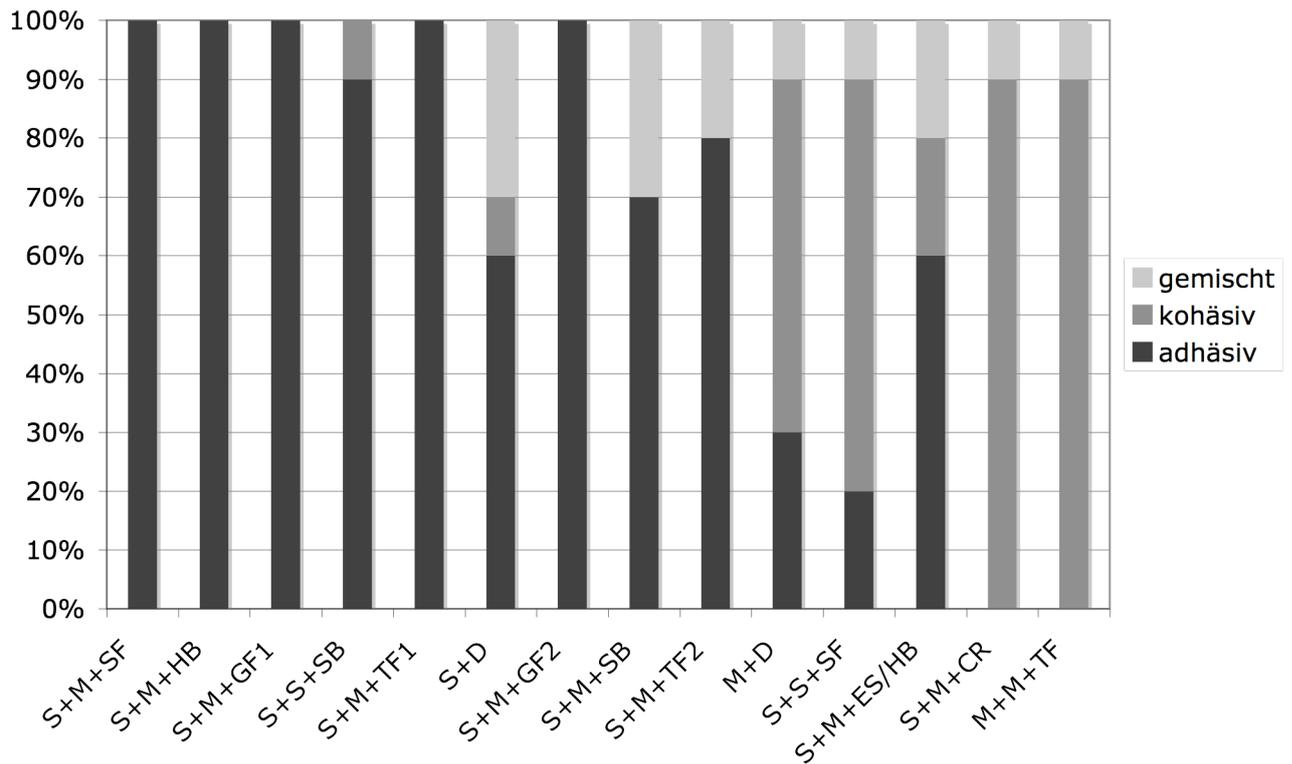
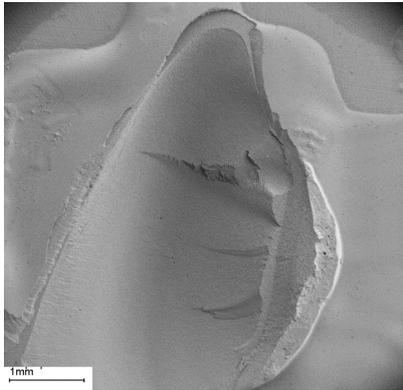


Abb. 8 Prozentualer Anteil der Bruchmodi der einzelnen Gruppen (n=10)

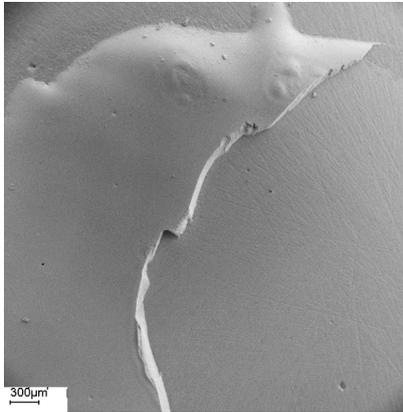
Die Analyse der Bruchflächen ist in Abbildung 8 dargestellt. Wie in *Teil I* wurden drei unterschiedliche Frakturtypen unterschieden: kohäsive Fraktur- innerhalb der Komposite; adhäsive Fraktur- innerhalb der Adhäsivschicht und gemischte- kohäsiv und adhäsive Frakturmodi.

Die Gruppen M+M+TF und S+M+CR zeigen 90 % kohäsive Frakturen, die S+S+SF Gruppe immernoch 70 %. Alle anderen Gruppen frakturierten hauptsächlich adhäsiv.

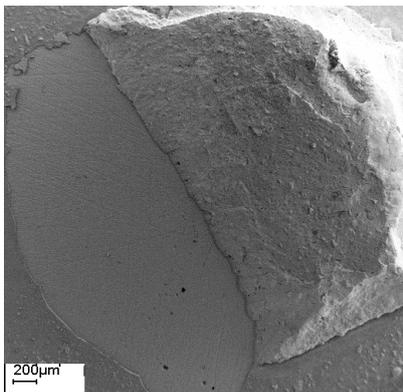
Die Kontrollgruppe D+M wies mehr kohäsive Frakturen auf (60%), wohingegen die Frakturen der D+S Kontrolle hauptsächlich adhäsiv waren (60%). In Abbildung 9 sind exemplarisch typische Frakturmuster dargestellt. Abbildung 9 a zeigt eine kohäsive Fraktur innerhalb der Füllung, Abbildung 9 b eine typische adhäsive Fraktur mit Ablösung der Haftvermittlers von der Füllungsoberfläche und Abbildung 9 c zeigt eine gemischte, adhäsive und kohäsive Fraktur, wobei sich der kohäsive Anteil durch die Reparaturfüllung zieht.



a Repräsentative kohäsive Fraktur innerhalb der Füllung (S+S+SF) mit strahlenförmiger Ausbreitung der Risse.



b Repräsentative adhäsive Fraktur der Füllungsseite (S+M+SF). Die adhäsive Fraktur verläuft zwischen Füllung und Haftvermittler und zwischen Haftvermittler und Reparaturfüllung.



c Repräsentative gemischte Fraktur (S+S+SB). Teilweise adhäsive Fraktur und im Verlauf kohäsiv innerhalb der Reparaturfüllung.

Abb. 9 a-c Typische Frakturmuster: a) adhäsives Muster b) kohäsives Muster c) gemischt

6 Diskussion

Siloranbasierende Komposite wurden mit der Intention entwickelt, einige Probleme der Komposite wie Polymerisationsschrumpfung, Polymerisationsstress und Wasseraufnahme zu lösen. Bisher weiß man, dass siloranbasierende Komposite gute mechanische Eigenschaften besitzen (Weinmann et al. 2005) (Ilie und Hickel, 2006) (Ilie und Hickel, 2009) (Lien und Vandewalle 2010). Im Gegensatz zur Reparatur von methacrylatbasierenden Kompositen ist bisher wenig bekannt über die Reparaturfähigkeit von siloranbasierendem Komposit. Ziel dieser Studie war es herauszufinden, welches Material und welche Methode notwendig ist, um für die Reparatur von siloranbasierendem Komposit zuverlässige Haftwerte zu erhalten.

6.1 Diskussion von Material und Methode

Die Evaluation zahnärztlicher Materialien und Verfahren ist eine zentrale Aufgabe der konservierenden Zahnheilkunde. Klinische Langzeituntersuchungen sind für eine sichere Beurteilung und abschließende Wertung unverzichtbar, da die Ergebnisse einer In-vitro-Studie nicht unmittelbar in die klinische Situation übertragbar sind. Eine In-vitro-Untersuchung bringt bezüglich ihrer klinischen Aussagekraft Probleme mit sich, da sich jeder Werkstoff im Munde eines Patienten anders verhalten kann als unter den Bedingungen im Labor. Andererseits kann mit In-vitro-Untersuchungen eine größere Anzahl von Materialien und Verfahren bei geringerem Aufwand an Stichproben und Zeit getestet werden. Entscheidende Faktoren, die die Resultate beeinflussen, lassen sich unter Laborbedingungen besser standardisieren. Daher bieten sich In-vitro-Untersuchungen, gerade bei neuen Materialien und Verfahren, zur Standortbestimmung oder Vorauswahl für die klinische Erprobung an. Letztendlich können jedoch nur klinische Langzeituntersuchungen genauere Auskunft über die dieser Studie zugrunde liegenden Fragestellungen geben.

Die vorliegenden Untersuchungen wurden in Anlehnung an die ISO Norm TR 11405 zur

Prüfung von Haftfestigkeiten durchgeführt. Grundsätzlich beruht die Methodik der vorliegenden Studie darüber hinaus auf den Erkenntnissen zahlreicher Untersuchungen zur Kompositreparatur (Bonstein et al. 2005), (Ahlers, 2006) (Papacchini et al. 2007), (Rodrigues et al. 2009).

6.1.1 Materialauswahl

Die Restauration von Zähnen mit Komposit unter Anwendung der Adhäsivtechnik ist ein fester Bestandteil der konservierenden Zahnheilkunde. Die Reparatur von Kompositmaterialien ist mittlerweile ein gängiges Verfahren um im Sinne minimalinvasiver Grundsätze Zähne mit defekten adhäsiven Restaurationen zu behandeln. Zahlreiche Studien liegen heute zur Reparatur von auf Methacrylat basierenden Kompositen vor. Mit der Einführung der auf einer völlig neuartigen Matrix basierenden Silorane steht ein neuer Werkstoff zur Verfügung, zu dem bislang wenig Erfahrung bezüglich Füllungsreparatur vorliegt. In der vorliegenden Studie wurde die Kombinierbarkeit von siloranbasierendem Komposit mit methacrylatbasierendem Komposit zum Zwecke der Reparatur mittels Scherversuch untersucht.

In die Auswertung gingen Materialkombinationen ein, die Aufschluss über folgende Fragen geben sollten:

- Können siloranbasierende Komposite mit denselben Methoden wie methacrylatbasierende Komposite repariert werden?
- Können siloranbasierende Komposite mit auf Methacrylat basierenden Kompositmaterialien repariert werden?
- Welchen Einfluss hat der Haftvermittler bei der Verwendung der Reparaturmaterialien?
- Ist eine der Materialkombinationen für Reparaturen hinsichtlich der

Scherhaftfestigkeit besonders geeignet?

- Bringt der Einsatz von fließfähigen Kompositen bei der Reparatur von siloranbasierendem Komposit denselben Vorteil wie dies bei der Reparatur von methacrylatbasierendem Komposit gezeigt werden konnte?
- Wo liegen möglicherweise die Schwachstellen im Haftverbund?

Kann ein experimentelles siloranbasierendes fließfähiges Komposit, welches erstmalig für den Reparatereinsatz untersucht wird, ein geeigneter Haftvermittler für die Reparatur von Siloranen sein, und kann das fließbare siloranbasierende Komposit die Siloranreparatur im Vergleich zu anderen Methoden, besonders im Vergleich zur Applikation des Silorane System Adhesive Bond verbessern?

Neben dem siloranbasierenden Komposit Filtek Silorane kam das etablierte, in zahlreichen werkstoffkundlichen Studien untersuchte auf Methacrylat basierende Hybridkomposit Tetric Evo Ceram zum Einsatz. Als Haftvermittler wurden zwei Adhäsive mit unterschiedlicher Chemie ausgewählt, wobei eines der beiden ein Bestandteil des Silorane System Adhäsivs ist, jedoch auf Methacrylat basiert, und das andere, ebenfalls auf Methacrylat basierend, zum Adhäsivsystem Syntac classic gehört. Des Weiteren wurde ein gebräuchliches Reparaturset verwendet, welches für die Reparatur von methacrylatbasierenden Kompositen bestimmt ist, ausserdem verschiedene fließfähige Komposite - zwei methacrylatbasierende fließfähige Komposite und ein experimentelles siloranbasierendes fließfähiges Komposit. Auch die Applikation eines typischen Silans (Espe Sil) wurde untersucht, dessen Nutzen für die Vorbehandlung von Kompositoberflächen von methacrylatbasierenden Kompositen kontrovers diskutiert wird.

6.1.2 Herstellung der Prüfkörper

Um die Materialproben in die Einspannvorrichtung einsetzen zu können mussten die

Kompositmaterialien in einen Stahlzylinder, aufgefüllt mit Acrylat, eingebettet werden. Beim Einbringen der Komposite wurde eine Inkrementdicke von 2 mm eingehalten. Um ein Herauslösen der Füllung während des Abscherens zu vermeiden, wurden in das Acrylbett Retentionen eingebracht. Auf die vorbereitete Kompositoberfläche sollte dann die zylindrische Reparaturfüllung mit einem Durchmesser von 3 mm und der Höhe 4 mm erfolgen. Da die Haftfestigkeit in direkter Relation zur Größe der Haftfläche steht, musste somit jeder Prüfkörper gleich groß sein um die Ergebnisse vergleichen zu können. Eine Matrize, um die Reparaturfüllung herzustellen musste folgenden Kriterien entsprechen:

- Das Material der Matrize durfte mit den Restaurationsmaterialien und den Reparaturmaterialien keine chemischen oder mechanischen Wechselwirkungen eingehen, welche dessen Eigenschaften negativ beeinflusst hätten.
- Eine ausreichende Photopolymerisation der ausschliesslich lichthärtenden Materialien musste gewährleistet sein.
- Die Entfernung der Matrize musste nach der Polymerisation trotz Passgenauigkeit so möglich sein, ohne den Prüfkörper zu beschädigen oder Kraft auf ihn zu übertragen.

Für Matrizen zur Herstellung lichthärtender Kompositprüfkörper zogen andere Autoren die unterschiedlichsten Materialien heran. *Hotz* (Hotz, 1975) verwendete Bakelitschablonen. *Kilian und Müller* (Kilian und Müller, 1980) benutzten zur Untersuchung der Polymerisationstiefen von UV- und lichthärtenden Kompositen Stahlformen und transluzente Teflonformen. Die Teflonformen erbrachten eindeutig bessere Ergebnisse der Polymerisationstiefen. *Chan und Boyer* (Chan und Boyer, 1983) stellten Prüfkörper mit einer Plexiglasform her und *Kullmann* (Kullmann, 1986) in einer Form aus Polyäthylen. Angaben über die Eignung der benutzten Formen machte jedoch keiner der genannten Autoren. *Reinhardt und Vahl* (Reinhardt und Vahl, 1981) weisen jedoch darauf hin, dass lichtpolymerisierende Komposite grundsätzlich eine geringere Beeinflussung durch das Formmaterial aufweisen, als es bei Autopolymerisaten der Fall ist. Wenn zusätzlich eine sehr

intensive Lichtquelle benutzt wird, reduziert sich der negative Einfluß der Folienunterlage noch weiter.

In vorliegender Studie wurde die Matrize aus einem additionsvernetzenden Bissregistriersilikon (Futar D Fast, Kettenbach) hergestellt. Dieses hat den Vorteil detailgenau und formstabil zu sein, aufgrund seiner elastomeren Eigenschaften aber dennoch ohne größere Kraftübertragung auf den Prüfkörper entfernbar ist. Die Matrize bestand aus zwei exakt zusammenfügbaren Teilen. Dies wurde erlangt, indem die zuvor als ganzes hergestellte Matrize in zwei Teile getrennt wurde. Vor dem Einsatz wurde die Matrize in destilliertem Wasser für 30 min ausgekocht um eventuelle Rückstände zu beseitigen.

6.1.3 Materialapplikation

Alle in der Studie verwandten Materialien wurden nach Herstellerangaben verarbeitet. Die Applikation aller Materialien, sowie alle vorbereitenden und nachfolgenden Arbeitsschritte wurden stets von derselben Person ausgeführt.

Zur Applikation der Füllungsmaterialien Filtek Silorane und Tetric Evo Ceram wurden hochvergütete dentale Füllungsinstrumente aus Edelstahl verwendet, die nach jedem Füllvorgang gereinigt wurden, um eine Kontamination des Füllwerkstoffs zu vermeiden.

Bei lichtgehärteten Kompositen wird in zunehmendem Abstand von der Füllungsoberfläche eine geringere Härte und eine niedrigere Konversionsrate beobachtet (Lutz et al. 1992). Das entsprechende gilt auch für einen zunehmenden Abstand zwischen der Lichtquelle und dem bestrahlten Komposit. Das Lichtaustrittsfenster einer Polymerisationslampe soll möglichst nahe an dem zu härtenden Komposit positioniert werden. Mit zunehmendem Abstand wie auch am Rande des Beleuchtungsfeldes ist ein deutlicher Intensitätsabfall zu erwarten (Lutz et al. 1992). Krämer et al. fanden jedoch heraus, dass dieser Effekt bei der Polymerisation mit High-power LED-Lampen erst entscheidend ist, wenn der Abstand zur Lichtquelle 6 mm übersteigt (Krämer et al. 2008). Die in vorliegender Studie benutzte Lichtquelle wurde im 90°

Winkel auf die Füllungsoberfläche aufgesetzt. Eine Schichtdicke der Reparaturmaterialien von 2 mm wurde nicht überschritten, um eine zuverlässige Polymerisation zu gewährleisten. Alle verwendeten Kompositmaterialien wurden in der Farbe A3 gewählt, um Differenzen im Polymerisationsgrad bedingt durch unterschiedlichen Pigmentgehalt zu minimieren. Die Leistung der Lampe wurde überprüft, so dass eine konstante Leistung von 1435 mW/cm^2 gewährleistet werden konnte. Die LED-Lampe Bluephase (Ivoclar Vivadent, Schaan, FL) wurde nach jedem Polymerisationsvorgang auf Verunreinigung am Lichtleiter kontrolliert.

In einer Studie von Papacchini et al. konnte gezeigt werden, dass die Applikation von 37-prozentiger Phosphorsäure keinen Einfluss auf das retentive Muster der angerauten Füllungsflächen hat, jedoch einen reinigenden Effekt zeigt, der die Füllungsfläche von Schleifstaub und -partikeln befreit (Papacchini et al. 2007). Zu diesem Zweck wurden in vorliegender Studie die angerauten Kompositoberflächen für 30 Sekunden mit 37-prozentiger Phosphorsäure behandelt und anschließend gründlich mit Wasser gespült.

Anhand der auf Methacrylat basierenden fließfähigen Komposite Tetric Evo Flow und Voco Grandio Flow wurden im zweiten Teil der Studie zwei unterschiedliche Methoden der Applikation miteinander verglichen. Einmal wurden die fließfähigen Komposite konventionell aufgetragen, wie bei der Verwendung als Liner bei der Füllungslegung. Das heißt, das Material wurde aus der Kartusche aufgetragen und mit einem Füllungsinstrument, einem kleinen Spatel, dünn ausgestrichen. Im zweiten Fall wurden die fließfähigen Komposite wie ein Adhäsiv benutzt. Das Material wurde appliziert und mit leichtem Luftstrom dünn verblasen. Die zweite Gruppe, bei der die Materialien verblasen wurden zeigten eine Tendenz zu geringeren Haftfestigkeitswerten, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Vermutlich wird durch die konventionelle Applikationsmethode eine dickere Schicht produziert, welche den Schrumpfstress besser absorbiert, oder es werden durch das Verblasen mit Luft kleine Luftbäschen unter das Material gemischt, was die Polymerisation inhibiert und zu verminderten Werten führt. Für die Versuche mit

fließfähigem siloranbasierendem Komposit wurde aufgrund dieser Tendenz die konventionelle Methode benutzt.

6.1.4 Lagerung und Alterung der Prüfkörper

Das Thermowechselbad und die Lagerung in Wasser sind beides akzeptierte Methoden, um Alterungsprozesse und Materialstress zu simulieren (Sideridou et al. 2004). Beides kann die Haftfestigkeit von Kompositen zu Zahnschmelz (Dhuru und Lloyd, 1985) (El-Araby et al. 2007) und die Haftfestigkeit zwischen Kompositen (Papacchini et al. 2007) verringern. Auch gibt es Studien, in denen eine Abnahme der Haftfestigkeit nicht signifikant war (Naughton et al. 2005).

Eine Wasserlagerung bei 37°C simuliert das durchschnittliche Mundhöhlenmilieu, wenn keine unterschiedlich temperierten Speisen und Getränke aufgenommen werden. Dadurch wird den hygroskopischen Komponenten der Proben die Möglichkeit der Wassereinlagerung und damit verbundenen Veränderung ihrer Eigenschaften gegeben.

Youngson und *Barclay* untersuchten 2000, dass in vivo tatsächlich mit erheblichen Temperaturunterschieden zu rechnen ist. Die Minimal- und Maximalwerte differierten in deren Studie im Mittel um 50°C. In vorliegender Studie wurden zwei Modifikationen von Alterungs-/Lagerungsmodi gebildet. Gruppen wurden teils in destilliertem Wasser bei konstant 37°C für eine Woche gelagert und teils für einen Monat gelagert inklusive Thermowechselbelastung mit Temperaturwechseln gemäß ISO CD TR 11405 zwischen 5°C und 55°C. Die Anzahl der in der Norm geforderten Wechsel wurde von 500 auf 5000 erhöht. Die Eintauchzeit betrug 25 Sekunden; die Transferzeit wurde zwischen den Wasserbädern auf 5 Sekunden geregelt.

6.1.5 Scherversuch

Im Mund treten bei Kaubewegungen vorwiegend Druck- und Scherkräfte auf. *Tiller* zufolge

besitzt die Scherfestigkeitsprüfung die größte praktische Relevanz hinsichtlich der Simulation der Kaubelastungen im Mund (Tiller et al. 1988).

Der in einen Acrylzyylinder eingebettete Kompositkörper (Füllung) mit dem darauf befestigten Kompositmaterialzyylinder (Reparaturfüllung) wurde fest in die Einspannvorrichtung eingespannt, dass es zu keinerlei Verwindung oder Bewegung während des Abscherens kommen konnte.

Um unerwünschte Drehmomente zu minimieren, erfolgte der Kraftangriff so nah wie möglich am Verbund zwischen Füllung und Reparaturfüllung mit konstantem Abstand parallel zur Füllungsoberfläche.

Auch bei einer gezielten Krafteinwirkung auf die Verbundfläche zwischen Füllungskörper und Reparaturfüllung besteht die Möglichkeit, dass gegensätzliche Kraftvektoren innerhalb des applizierten Materials auftreten. Während im fugennahen Bereich keilförmig abscherende Kräfte auftreten, kommt es am ansatzfernen Ende zu entgegengesetzten Kraftvektoren in Richtung der Verbundfläche. Hier besteht die Gefahr, dass durch die Verwindung des Materialzyinders (Reparaturfüllung) aus der reinen, parallelgerichteten Scherkraft eine Biege- oder Druckkraft wird (Oilo, 1993). Eine im ISO CD TR Dokument 11405 vorgesehene zirkuläre Scherklinge soll zusätzlich helfen, diesen unerwünschten Kraftvektoren vorzubeugen. Durch die Rundklinge kommt es an den Verbundflächen zur perpendicularen, 90° zur Füllungsoberfläche gerichteten Kraftvektoren, die wiederum stark an Zugbelastungen erinnern. Es ist nicht realistisch, dass ausschließlich reine Scherkräfte während des Kauvorganges an den Verbundflächen zwischen Schmelz und Komposit auftreten. Die möglichen Drehmomente und Biegekräfte in diesem Versuchsaufbau sind somit nicht größer, als sie auch in-vivo auftreten würden und damit tolerierbar.

6.1.6 Versuchsdurchführung

Die Vorschubgeschwindigkeit lag bei 0,5 mm/min. Dieser Wert wird in zahlreichen Studien

zur Prüfung der Scherhaftfestigkeit von Kompositen, teils auf Zahnhartsubstanz (Thiele, 2002), teils auf Komposit im Sinne einer Kompositreparatur (Schaller et al. 1993), benutzt.

Eliades et al. fanden 2004 anhand eines Schertests mit durch Schmelzadhäsiv an Zahnschmelz befestigte Brackets heraus, dass die Anwendung einer größere Vorschubgeschwindigkeit von 200 mm/min zu geringerer Scherhaftfestigkeit führt als eine Vorschubgeschwindigkeit von 1mm/min. *Eliades et al.* vermuten, dass durch die hohe Geschwindigkeit mit der die Abschervorrichtung auf die Probe auftrifft, die viskoelastischen Eigenschaften der Komposite eliminiert sind (Eliades et al. 2004). *Lindemuth* und *Hagge* kommen in ihren Untersuchungen zum Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit bei Scherversuchen zur Haftfestigkeitsbestimmung am Schmelz und Dentin zu dem Ergebnis, dass bei Versuchen am Schmelz kein signifikanter Unterschied zwischen den Geschwindigkeiten 0,1, 0,5, 1,0 und 5,0 mm/min besteht (Lindemuth und Hagge, 2000). Auch Veränderungen des Bruchmodus sind mit unterschiedlicher Geschwindigkeit nicht festzustellen (Thiele, 2002).

6.1.7 Analyse des Bruchmodus

Um mögliche Ursachen des Versagens eines Haftverbundes aufzuspüren sollten dem Schertest eine Bruchmodusanalyse folgen.

Bei adhäsiven Frakturen liegen die Bruchflächen zwischen den Schichten; in diesem Fall zwischen Füllung oder Reparaturfüllung und Haftvermittler. Es kann eine Verbesserung der Benetzbarkeit der Materialien oder Änderung der chemischen Zusammensetzung notwendig sein, um den Haftverbund zu verbessern.

Ein kohäsiver Bruch, bei dem die Bruchflächen innerhalb eines Materials liegen, zeigt, dass die physikalischen Eigenschaften des Materials die Schwachstelle im Haftverbund darstellen (Oilo, 1993).

Lichtmikroskopische Analysen sind in der Literatur weit verbreitet (Yap et al. 1998) (Schaller

et al. 1993). Demgegenüber gibt es auch Studien, in denen eine elektronenmikroskopische Oberflächenbetrachtung stattfand (Swift et al. 1992) (Papacchini et al. 2008).

Zur Übersichtlichkeit der Bruchmodusanalyse und deren Auswertung wurde zwischen kohäsiven, adhäsiven und gemischten Bruchtypen unterschieden. Die gewählte Einteilung findet sich auch in anderen Studien, in denen eine fraktographische Analyse durchgeführt wurde (Papacchini et al. 2007) (Papacchini et al. 2008).

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Teil I: Einfluss der Alterung auf Reparaturen mit siloranbasierendem Komposit

In Teil eins der Studie konnte gezeigt werden, dass siloranbasierende Komposite erfolgreich repariert werden können, wenn ein Reparaturprotokoll, wie bei den Methacrylaten üblich, eingehalten wird. Unter Verwendung des dem Silorane Systems zugehörigen Adhäsivs können Haftwerte erreicht werden (31,8 MPa), vergleichbar mit denen des verwendeten etablierten methacrylatbasierenden Komposits Tetric Evo Ceram und dessen zugehörigen Adhäsivs (31,9 MPa). Ein siloranbasierendes Komposit kann auch mit einem methacrylatbasierenden Komposit repariert werden, hierbei ist jedoch das verwendete Adhäsiv ausschlaggebend für die Haftfestigkeit. Die Applikation eines Adhäsivs basierend auf traditionellen Methacrylaten, wie das in der Studie benutzte Heliobond, führte zu reduzierter Scherhaftfestigkeit der Proben (maximal 17,6 MPa), die signifikant geringer war als die der Reparaturen M+M+HB und S+S+SB. Wird anstelle von Heliobond das Adhäsiv aus dem Silorane System Adhesive System aufgetragen, welches auf Phosphat-Methacrylat basiert, sind die Haftwerte vergleichbar mit den Gruppen M+M+HB und S+S+SB (26,2 MPa). Hervorzuheben ist, dass das Silorane System Adhesive Bond nicht auf Silorane-Chemie basiert. Möglicherweise führt die geringere Hydrophobizität des Phosphat-Methacrylats zu einer Verbesserung der Ankopplung von methacrylatbasierenden Komposit an siloranbasierendes Komposit. *Tezveril-Mutluay et al.* vermuten, dass der Phosphatrest mit

dem Oxiranrest des Siloranes und die Acrylatgruppe mit dem Methacrylat reagieren (Tezveril-Mutluay et al. 2008). Auch in deren Studie konnte ein Anstieg der Scherhaftfestigkeit zwischen siloranbasierendem Komposit und einem methacrylatbasierendem Komposit gefunden werden, als ein auf Phosphat-Methacrylat basierendes Adhäsiv statt eines auf traditionellem Methacrylat basierenden Adhäsivs benutzt wurde.

Den stärksten Effekt auf die Scherhaftfestigkeit der Proben hatte, noch vor der Art des Haftvermittlers und vor der Art des Füllungsmaterials, die Lagerung des Verbunds, das heißt die Lagerung der Füllung mit aufgeklebter Reparaturfüllung. Die Haftfestigkeit war bei allen Gruppen am größten, wenn der Verbund für eine Woche oder einen Monat gelagert wurde. Unterschiede zwischen der Lagerung des Verbunds für eine Woche oder einen Monat sind nicht signifikant. Vermutlich findet eine Nachpolymerisation der Reparaturfüllung und des Haftvermittlers statt, welche die Festigkeit im Vergleich zu den Proben, die direkt nach dem Kleben im Scherversuch belastet wurden deutlich verbessern. Tendenziell ist eine Abnahme der Haftfestigkeit zu vermerken, wenn die Füllungsoberfläche vor der Reparatur einem Alterungsprozess unterzogen wird. Bei Lagerung von methacrylatbasierendem Komposit in feuchtem Milieu kommt es durch Diffusion und Wasseraufnahme in die organische Matrix zu einer hygroskopischen Expansion des Werkstoffes, was zu Veränderung der Materialeigenschaften führt. Der Gehalt an nicht umgesetzten Doppelbindungen wird bei den methacrylatbasierenden Kompositen nach Alterung durch Nachpolymerisation und Auslaugung des Werkstoffes deutlich geringer (Vanckerhoven et al. 1982). Studien, wie die von *Tezvergil et al. 2003* zur Reparatur von methacrylatbasierenden Kompositen, bestätigen, dass durch die Abnahme der zur Verfügung stehenden Doppelbindungen die Reparatur einer solchen gealterten Kompositfüllung ohne Vorbehandlung der Kompositoberfläche verringerte Haftfestigkeit besitzt. Durch den Siloxan-Baustein sind siloranbasierende Komposite hydrophober als methacrylatbasierende Komposite (Weinmann et al. 2005).

Wasserabsorption und Löslichkeit sind verringert (Palin et al. 2005), was erwarten lässt, dass die Änderung der Materialeigenschaften bei Lagerung gering ausfällt. In der Studie von *Ilie* und *Hickel* 2009 wird diese Vermutung bestätigt. Sie lagerten verschiedene auf Methacrylat basierende Komposites und ein auf Silorane basierendes Komposit für vier Wochen in unterschiedlichen Medien (Wasser, Alkohol und künstlicher Speichel) und setzten sie zusätzlich Thermowechselbelastung aus. Bezüglich der gemessenen mechanischen Eigenschaften nach Lagerung zeigte sich das Silorane vergleichbar mit den etablierten Methacrylaten; nach Lagerung in Alkohol und zusätzlicher Thermowechselbelastung sogar stabiler als die Vergleichswerkstoffe.

Bezüglich der Verbundfestigkeit zeigt die Lagerung der Füllung aus siloranbasierendem Komposit vor der Reparatur jedoch die gleiche Tendenz wie das Methacrylat: eine Abnahme der Haftfestigkeit nach Reparatur. Der kationische Initiator des siloranbasierenden Komposits neigt grundsätzlich zu Inaktivierung in Anwesenheit von Wasser (O dian, 1991) was die Verbundeigenschaften der Füllung nach Lagerung in Wasser möglicherweise verändert.

Die Sauerstoffinhibitionsschicht beider Werkstoffe wurde im Versuch immer durch das Anrauen der Proben entfernt. *Shawkat et al.* die die Scherhaftfestigkeit von Inkrementen aus methacrylatbasierendem und siloranbasierendem Komposit mit und ohne Sauerstoffinhibitionsschicht untersuchten, fanden heraus, dass eine Sauerstoffinhibitionsschicht ($9.0 \pm 6.6 \mu\text{m}$ bei siloranbasierendem Komposit) keine signifikante Verbesserung der Scherhaftfestigkeit produziert (*Shawkat et al.* 2009).

6.2.2 Teil II: Einfluss unterschiedlicher Haftvermittler auf die Scherhaftfestigkeit von Reparaturen mit siloranbasierendem Komposit

Teil 1 der Studie zeigte, dass es keinen signifikanten Unterschied gibt zwischen der Lagerung des Verbunds für eine Woche oder einen Monat. Daher wurden in diesem Teil die Füllungen für eine Woche gealtert und die reparierten Proben wiederum für eine Woche gelagert.

Im zweiten Teil der Studie konnten die höchsten Haftwerte für die Reparatur von siloranbasierendem Komposit gefunden werden, wenn ein Silan zusätzlich zu einem Adhäsiv verwendet wird, wie der Porcelaine Bond Activator des Clearfil Repair Set der S+M+CR Gruppe (38,6 MPa) und Espe Sil der S+M+ES/HB Gruppe (37,8 MPa). Die alleinige Anwendung von einem auf Methacrylat basierenden Adhäsiv vor Applikation von Tetric Evo Ceram als Reparaturfüllung führt wie in Teil 1 der Studie bereits gezeigt zu sehr geringen Haftwerten. Das Silan muss also der entscheidende Faktor sein für die Adhäsion zwischen gealterter, von der ohnehin minimalen Sauerstoffinhibitionschicht befreiten Oberfläche des siloranbasierenden Komposits und dem auf Methacrylat basierenden Adhäsiv. Das Silan benetzt die Füllkörper des siloranbasierenden Komposits und bindet somit an den anorganischen Teil des Komposites, das ein Volumenanteil von über 55% darstellt. Im Kontrast dazu steht der Einsatz von Silan bei der Reparatur von Metacrylat-Komposit, wo der tatsächliche Nutzen des Silans immer noch nicht eindeutig geklärt ist. Teils fanden Studien heraus, dass Silan alleine die Scherhaftfestigkeit von Reparaturen nicht signifikant verbesserte im Vergleich zur Applikation eines Adhäsivs allein (Brosh et al. 1997), (Swift et al. 1994), während auf eine positive Korrelation zwischen dem Einsatz von Silan und der Reparaturhaftfestigkeit bei *Bouschlicher et al. 1997* und *Tezvergil et al. 2003* hingedeutet wird, wobei in diesen Studien zusätzlich ein Adhäsiv eingesetzt wurde.

Die Werte der S+M+CR (Silorane+Methacrylat+ClearfilRepair) und S+M+ES/HB (Silorane +Methacrylat+EspeSil+Heliobond) Gruppe sind statistisch vergleichbar mit der M+M+TF (Methacrylat + Methacrylat +TetricEvoFlow) Gruppe, die als Referenzgruppe fungierte, da Studien zeigen konnten, dass die Reparatur von auf Methacrylat basierendem Komposit derselben Zusammensetzung durch Applikation eines methacrylatbasierenden fließfähigen Komposits als Haftvermittler zu hohen Reparaturhaftwerten führt (Frankenberger et al. 2003) (Papacchini et al. 2008)

Zusätzlich zum Silan wurde bei der S+M+ES/HB Gruppe Heliobond benutzt, ein ungefülltes

auf Methacrylat basierendes Adhäsiv. Ein auf Phosphat-Methacrylat basierendes Adhäsiv wurde nach dem Auftrag der Silan Komponente der S+M+CR Gruppe benutzt. Obwohl eine chemische Haftung der Phosphatgruppe zur Silanmatrix vermutet wird (Tezvergil et al. 2008), zeigt die S+M+CR keine höheren Haftwerte als S+M+ES/HB. Dass das Silan den ausschlaggebenden chemischen Verbund erzeugt, zeigt auch der Vergleich zur S+M+SB (Silorane+Methacrylat+SiloraneSystemAdhesiveBond) Gruppe. Hier wurde das auf Phosphat-Methacrylat basierende Adhäsiv ohne vorhergehenden Silanauftrag benutzt. Die Scherhaftfestigkeit dieser Proben ist signifikant geringer als die Silangruppen. Auch die S+M+HB (Silorane+Methacrylat+Heliobond) Proben, die sehr geringe Werte zeigen und die sich von S+M+ES/HB nur durch Fehlen des Silans unterscheiden, unterstreichen die Bedeutung des Silans.

Es wurde angenommen, dass die Reparatur von siloranbasierendem Komposit mit einem siloranbasierendem fließfähigen Komposit und appliziertem frischem siloranbasierendem Komposit zu hohen Scherhaftfestigkeitwerten führen würde, vergleichbar mit Reparaturen von auf Metacrylat basierendem Komposit unter Benutzung eines auf Metacrylat basierenden fließfähigen Komposits. Diese Hypothese wird bestätigt, da die Siloranegruppe S+S+SF (Silorane+Silorane+siloranbasierendes HermesFlow) Werte zeigt, die sich statistisch nicht signifikant unterscheiden von M+M+TF. Daraus kann geschlossen werden, dass Reparaturen mit fließfähigem Komposit basierend auf derselben chemischen Zusammensetzung wie gealtertes und frisch appliziertes Material zu zuverlässigen Resultaten führen.

Die Werte der S+S+SF Gruppen unterscheiden sich statistisch nicht von den gemischten Silangruppen. Die Reparatur von siloranbasierendem Komposit mit siloranbasierendem fließfähigen Komposit produziert keine höheren Haftwerte als gemischte Reparaturen zwischen siloranbasierendem Komposit und metacrylatbasierendem Komposit.

Die Reparatur von siloranbasierendem Komposit mit siloranbasierendem fließfähigen

Komposit zeigt auch höhere Werte als die Reparatur von siloranbasierendem Komposit mit dem Silorane System Adhesive Bond. Der Effekt des siloranbasierendem fließfähigen Komposits könnte ähnlich sein wie die stressabsorbierende Fähigkeit der methacrylatbasierenden fließfähigen Komposite für die Reparatur der methacrylatbasierenden Komposite, dank ihrer höheren Elastizität und Bruchzähigkeit. Gefüllte Adhäsive weisen eine höhere Festigkeit auf als fließfähige Komposite, was sehr wahrscheinlich ihr Potenzial Stress abzufangen beeinflusst. Dies könnte den großen Unterschied der Scherhaftfestigkeit zwischen S+S+SF und S+S+SB erklären. Der chemische Verbund zwischen den siloranbasierenden Kompositen ist dazu wahrscheinlich größer als der angenommene chemische Verbund des Phosphatmethacrylats zum siloranbasierendem Komposit (Tezvergil et al. 2008).

Wenn man das siloranbasierende fließfähige Komposit als Haftvermittler zwischen siloranbasierendem Komposit und methacrylatbasierendem Komposit einsetzt, nimmt die Scherhaftfestigkeit im Vergleich dramatisch ab. Die Fraktographische Analyse zeigt ausschließlich adhäsive Frakturmuster. Der Verbund zwischen dem methacrylatbasierenden Komposit und dem siloranbasierenden fließfähigen Komposit ist die Schwachstelle dieser Reparaturen. Deutlich bessere Werte wurden bei Proben gemessen, bei denen methacrylatbasierende fließfähige Komposite zwischen siloranbasierendem Komposit und methacrylatbasierendem Komposit benutzt wurden. Die Konsistenz ist weniger viskös und benetzt vermutlich die angeraute Oberfläche des siloranbasierenden Komposits besser. Der Verbund vom fließfähigen Komposit zur Reparaturfüllung aus methacrylatbasierendem Komposit stellt hier keine Schwachstelle dar. Beide benutzten methacrylatbasierenden fließfähigen Komposite wurden einmal per Druckluft auf der Füllung verteilt und einmal mit einem Spatel dünn ausgestrichen. Die Druckluftgruppen haben etwas geringere Haftwerte. Wahrscheinlich produziert die Druckluft zu geringe Schichtdicken, welche nicht ausreichend stressabsorbierend wirken können. Die Gruppen S+M+GF1 (Silorane+Methacrylat+Grandioflow) und GF2 und auch S+M+TF1 (Silorane+

Methacrylat+TetricEvoFlow) und TF2 sind, obwohl kein chemischer Verbund zur Kompositmatrix vorliegt, statistisch vergleichbar zur S+M+SB Gruppe, wo ein chemischer Verbund über die Phosphatgruppen vermutet wird. Eine adäquate Technik und die richtige Fließfähigkeit des Adhäsivs scheinen dies bis zu einem gewissen Grad ausgleichen zu können.

Die Gruppen M+M+TF (Methacrylat+Methacrylat+TetricEvoFlow und S+M+CR (Silorane+Methacrylat+ClearfilRepair) erzielten als einzige Gruppen ausschließlich kohäsive und gemischte Bruchtypen. Trotz hoher Haftfestigkeitswerte und ähnlicher Materialzusammensetzung wie S+M+CR, konnte bei S+M+ES/HB ein hoher Anteil adhäsiver Brüche gefunden werden. Möglicherweise stellt das verwendete rein auf Methacrylat basierende ungefüllte Adhäsiv Heliobond trotz chemischen Verbunds durch Silan den schwächsten Teil dieser Reparatur dar. Bei allen Reparaturen mit geringem Anteil adhäsiver Frakturen wurden gefüllte Adhäsive oder auf Phosphat-Methacrylat basierende Adhäsive benutzt.

In Bezug auf die Reparaturverfahren bei Kompositen stellt sich die Frage, welche Haftwerte als klinisch akzeptabel gelten können und was die Referenz ist.

Die Variationen der Testmethoden in Studie zur Reparatur von Kompositen ergeben so unterschiedliche Haftwerte, dass diese somit nicht miteinander vergleichbar sind.

In der Stellungnahme der DGZMK für moderne Füllungswerkstoffe (Hickel, 2000) wird die Schmelzhaftung für Hybridkomposite mit Werten zwischen 20 und 28 MPa angegeben.

Die Vergleichsgruppen vorliegender Studie zeigen ähnliche Haftwerte. Vergleichsgruppe eins – siloranbasierendes Komposit mittels Silorane System Adhesive mit Dentin verbunden – ergibt 21.4 MPa; Vergleichsgruppe zwei – Tetric Evo Ceram mit Syntac classic an Dentin gebunden – 31.6 MPa. Alle Versuchsgruppen, ausgenommen S+M+SF, die Gruppe mit fließfähigem siloranbasierendem Komposit als Haftvermittler, sind vergleichbar mit den Haftwerten der Vergleichsgruppen.

7 Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen ergaben folgendes:

- Es ist möglich siloranbasierende Komposite mit den Methoden der Reparatur von methacrylatbasierenden Kompositen erfolgreich zu reparieren.
- Die Applikation eines siloranbasierenden fließfähigen Komposits ist eine zuverlässige Methode um siloranbasierendes Komposit mit demselben Material zu reparieren. Damit können hohe Reparaturhaftfestigkeitswerte erreicht werden, die mit denen von Reparaturen aus methacrylatbasierendem Komposit und methacrylatbasierendem fließfähigem Komposit als Haftvermittler vergleichbar sind. Diese Methode führt zu besseren Haftwerten als die Reparatur von siloranbasierendem Komposit unter Anwendung von Silorane System Adhesive Bond.
- Die Anwendung von Silan zusätzlich zu einem auf Phosphat-Methacrylat oder Methacrylat basierendem Adhäsiv als Haftvermittler verbessert den Verbund zwischen methacrylatbasierendem Komposit auf siloranbasierendem Komposit.
- Für die klinische Situation ist es wichtig hervorzuheben, dass falls das vorliegende Füllungsmaterial nicht bekannt sein sollte, kein siloranbasierendes fließfähiges Komposit als Haftvermittler benutzt werden soll. Sicherheitshalber sollte dann ein Silan zusätzlich zu einem Adhäsiv appliziert werden.
- Bis auf die Reparatur von siloranbasierendem Komposit mit siloranbasierendem fließfähigem Komposit und methacrylatbasierendem Komposit führen Reparaturen mit siloranbasierendem Komposit zu guten Haftwerten, die vergleichbar sind mit den Haftwerten der verwendeten Komposite an Dentin mit Dentinadhäsiven.
- Mit Zunahme der Liegedauer der zu reparierenden siloranbasierendem Komposit- oder methacrylatbasierenden Kompositfüllung nimmt die Haftfestigkeit der Reparatur ab. Je früher eine Füllung repariert wird, desto besser die Haftung.

- Die Haftfestigkeit von Reparaturen aus methacrylatbasierendem Komposit und siloranbasierendem Komposit nimmt im Verlauf eines Monats zu. Klinisch bedeutet das: Die Belastung einer reparierten Füllung sollte in den ersten Stunden bis Tagen gering sein.

8 Zusammenfassung

Die Füllungsreparatur bietet für den Fall des Scheiterns oder der Fraktur einer Füllung eine minimalinvasive Alternative zum kompletten Füllungsaustausch. Das Spektrum der Kompositmaterialien ist groß und bisher ist wenig bekannt über die Kompatibilität unter den Materialien, die sich in der Zusammensetzung der Matrix und der Füllpartikel unterscheiden können. Wenn Komposite mit unterschiedlicher chemischer Formulierung für Reparaturzwecke kombiniert werden sollen, ist es ein wichtiges Anliegen, die Kompatibilität der verschiedenen Materialien zu untersuchen und sicher zu gehen, dass etablierte Reparaturmethoden auch hier funktionieren.

Verschiedene mechanische und chemische Prozeduren wurden bereits untersucht, um die Reparaturhaftfestigkeit der methacrylatbasierenden Komposite zu steigern. Ein Anrauen der Substratoberflächen und die zusätzliche Applikation eines niedrigviskösen Adhäsivs oder Komposites führt bei den methacrylatbasierenden Kompositen zu erheblicher Verbesserung der Scherhaftfestigkeit. Ziel der Studie war es, die Reparaturfähigkeit der siloranbasierenden Kompositen und deren Kombinierbarkeit mit methacrylatbasierenden Kompositen zu Reparaturzwecken mittels Scherversuch zu untersuchen. Im ersten Teil der Studie wurden Proben aus siloranbasierendem Komposit und methacrylatbasierendem Komposit polymerisiert, teils gealtert durch Lagerung in Aqua dest. bei 37°C für eine Woche oder für einen Monat inklusive Thermowechselbad (5000 Zyklen zwischen 5° und 55°C), teils ohne Alterung repariert. Die Proben wurden vor der Reparatur angeraut (Silikonkarbidpapier), angeätzt (37% Phosphorsäure), gründlich mit Wasser gespült und getrocknet. Das Adhäsiv (Heliobond oder Silorane System Adhesive Bond) wurde aufgetragen und polymerisiert, dann wurde die Reparaturfüllung (siloranbasierendes Komposit oder methacrylatbasierendes Komposit) aufgetragen. Die Reparaturen wurden wieder teils der Alterungsprozedur

unterzogen. In Teil zwei wurden die Füllungsproben (siloranbasierendes Komposit und methacrylatbasierendes Komposit) für eine Woche in Aqua dest. bei 37°C gelagert und vor der Reparatur wieder wie in Teil eins angeraut und gereinigt. Als Haftvermittler wurden verschiedene Materialien getestet, darunter ein experimentelles siloranbasierendes fließfähiges Komposit, zwei methacrylatbasierende fließfähige Komposite, die beiden auf Methacrylat basierenden Adhäsive Silorane System Adhesive Bond und Heliobond, ein Silan in Kombination mit einem Adhäsiv und ein Reparaturset für methacrylatbasierendes Komposit. Als Reparaturfüllung wurde siloranbasierendes Komposit und methacrylatbasierendes Komposit benutzt. Die reparierten Proben wurden wiederum für eine Woche gelagert und dann im Scherversuch bis zum Bruch belastet.

Die Reparaturen von siloranbasierendem Komposit mit demselben Material unter Anwendung eines siloranbasierenden fließfähigen Komposits resultierten in einer sehr guten Haftfestigkeit, vergleichbar mit der Haftfestigkeit von Reparaturen mit methacrylatbasierendem Komposit und methacrylatbasierendem fließfähigem Komposit und der Haftfestigkeit von methacrylatbasierendem Komposit an Dentin. Die Reparatur von siloranbasierendem Komposit mit methacrylatbasierendem Komposit unter Applikation eines Silans und eines Adhäsivs zeigt Haftfestigkeitswerte, die ebenfalls statistisch nicht signifikant geringer waren als die Werte der Reparaturen mit methacrylatbasierendem Komposit und methacrylatbasierendem fließfähigem Komposit, welche als Referenz dienten. Die Kombination von siloranbasierendem Komposit mit methacrylatbasierendem fließfähigem Komposit oder Phosphat-Methacrylat-Adhäsiv zur Reparatur mit methacrylatbasierendem Komposit führt zu Scherhaftfestigkeit, die sich statistisch nicht signifikant unterscheidet von der Haftfestigkeit von methacrylatbasierendem Komposit an Dentin.

Die Reparaturhaftfestigkeit von siloranbasierendem Komposit mit siloranbasierendem fließfähigem Komposit zu methacrylatbasierendem Komposit erweist sich als sehr gering, gefolgt von siloranbasierendem Komposit mit methacrylatbasierendem Adhäsiv an

methacrylatbasierendem Komposit. Beide unterscheiden sich signifikant von der Methacrylat-Kontrollgruppe M+M+TF (Methacrylat+Methacrylat+TetricEvoFlow).

Die Reparaturhaftfestigkeit der Proben steigt mit der Alterung des Verbunds und verringert sich mit Alterung der Füllungsoberfläche.

Es kann geschlussfolgert werden, dass siloranbasierendes Komposit mit gängigen, für die Reparatur methacrylatbasierender Komposite üblichen Methoden repariert werden kann. Ebenso können siloranbasierende Komposite für Reparaturzwecke mit methacrylatbasierendem Komposit kombiniert werden. Hierfür sollte um zuverlässige Resultate zu erzielen ein Silan vor der Applikation eines Adhäsivs benutzt werden. Ein siloranbasierendes fließfähiges Komposit sollte ausschliesslich zur Reparatur von siloranbasierendem Komposit mit siloranbasierendem Komposit verwendet werden, hierfür können gute Haftwerte erzielt werden. Reparierte Füllungen sollten in den ersten Stunden nach der Reparatur wenig belastet werden.

9 Literaturverzeichnis

- Ahlers, MO: Intraorale Reparatur zahnfarbener Restaurationen aus Komposit-Füllungswerkstoff. Schlütersche 2006 S. 46
- Bonstein T, Garlapo D, Donarummo J Jr, Bush PJ: Evaluation of varied repair protocols applied to aged composite resin. *J Adhes Dent* 2005;7:41-9
- Bouschlicher M R, Reinhardt J W, Vargas M A: Surface treatment techniques for resin composite repair. *Am J Dent* 1997;10:279-83
- Bowen RL: Compatibility of various materials with oral tissues.I: The components in composite restorations. *J Dent Res* 1979;58:1493-503
- Bowen RL, Marjenhoff WA: Adhesion of composite to dentin and enamel. *J Calif Dent Assoc* 1993;21: 19-22
- Bowen RL: Properties of a silica-reinforced polymer for dental restorations. *J Am Dent Assoc* 1963;66:57-64
- Boyer DB, Chan KC, Reinhardt JW: Build-up and repair of light-cured composites: Bond strength and clinical techniques. *J Dent Res* 1984;63:1241-4
- Braden M: Polymeric dental materials. Springer Verlag, Heidelberg (1997)
- Brendeke J, Ozcan M: Effect of physicochemical aging conditions on the composite-composite repair bond strength. *J Adhes Dent* 2007;9: 399-406
- Brosh, T, Pilo R, Bichacho N, Blutstein R: Effect of combinations of surface treatments and bonding agents on the bond strength of repaired composite. *J Prosthet Dent* 1997;77:122-6
- Brunthaler A, König F, Lucas T, Sperr W, Schedle A. Longevity of direct resin composite restorations in posterior teeth. *Clin Oral Invest* 2003;7:63-70
- Buonocore MG. A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res* 1955;34:849-853.
- Chan KC, Boyer DB: Repair of conventional and microfilled composite resins. *J Prosthet Dent* 1983;50:345-50
- Cahn R W, Haasen P, Kramer E J: Medical and dental materials. Materials science and technology, Volume 14, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim, D 1992
- Chiba K, Hosoda H, Fusayama T: The addition of an adhesive composite resin to the same material: bond strength and clinical techniques. *J Prosthet Dent* 1989;61:669-75
- Cvar J, Ryge G. Criteria for the clinical evaluation of dental restorative materials. San Francisco: US Government Printing Office 1971. USPHS publ. No 790-240

Dhuru VB, Lloyd CH: The fracture toughness of repaired composite. *J Oral Rehabilitation* 1985;12:413-421

Downer MC, Azli NA, Bedi R, Moles DR, Setchell DJ. How long do routine dental restorations last? A systematic review. *Br Dent J* 1999;187:432-439

El-Araby AM, Talic YF: The effect of thermocycling on the adhesion of self-etching adhesives on dental enamel and dentin. *J Contemp Dent Pract* 2007;8:17-24

Elderton RJ: Clinical studies concerning re-restoration of teeth. *Adv Dent Res* 1990;4: 4-9

Eliades T, Katsavrias E, Zinelis S, Eliades G: Effect of Loading Rate on Bond Strength. *J Orofac Orthop* 2004;65:336-42

Ernst C-P, Willershausen B: Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite. *ZM* 2003;7:30-40

Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL: Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res* 1987;66:1636-9

Ferracane JL: Correlation between hardness and degree of conversion during the setting reaction of unfilled dental restorative resins. *Dent Mater* 1985;1: 11-4

Ferracane JL: Elution of leachable components from composites. *J Oral Rehabil* 1994; 21: 441-452

Ferracane JL, Greener E H: The effect of resin formulation on the degree of conversion and mechanical properties of dental restorative resins. *J Biomed Mater Res* 1986;20, 121-131

Finer Y, Santerre JP: The influence of resin chemistry on a dental composite's biodegradation. *J Biomed Mater Res A* 2004;69:233-46

Forss H, Widstrom E. Reasons for restorative therapy and the longevity of restorations in adults. *Acta Odontol Scand* 2004;62:82-86

Frankenberger R, Kramer N, Ebert J, Lohbauer U, Kappel S, ten Weges S, Petschelt, A: Fatigue behavior of the resin-resin bond of partially replaced resin-based composite restorations. *Am J Dent* 2003;16:17-22

Frankenberger R, Kramer N, Petschelt A: Technique sensitivity of dentin bonding: effect of application mistakes on bond strength and marginal adaptation. *Oper Dent* 2000;25:324-30

Gängler P, Arnold WH: *Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie*. Georg Thieme Verlag 2005

Gängler P, Kamann W: Assessment of long-term performing posterior composite restorations using CPM-Index. *J Dent Res* 1999;78: 531

Geurtsen, W.: *Klinik der Kompositfüllung*, Hanser, München 1989

Gordan V V: In vitro evaluation of margins of replaced resin-based composite restorations. *J Esthet Dent* 2000;12:209-15

Gregory WA, Bery S, Duke E, Dennison JB: Physical properties and repair bond strength of direct composite resin. *J Prosthet Dent* 1992;68:406-11

Gregory WA, Pounder B, Bakus E: Bond strengths of chemically dissimilar repaired composite resins. *J Prosthet Dent* 1990;64:664-8

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

Hannig C, Laubach S, Hahn P, Attin T: Shear bond strength of repaired adhesive filling materials using different repair procedures. *J Adhes Dent* 2006;8:35-40.

Hellwig E, Klimek J, Attin T: Einführung in die Zahnerhaltung. Urban & Fischer, München, Jena 2003

Heidemann D: Kariologie und Füllungstherapie. Urban & Schwarzenberg, München, Wien 1999

Hickel R, Heid M, Kunzelmann KH, Petschelt A: Durchhärtiefe von lighthärtenden Kompositen unter Keramik. *Dtsch Zahnärztl Z* 1992;47:182-185

Hickel R, Manhart J. Longevity of restorations in posterior teeth and reasons for failure. *J Adhes Dent* 2001;3:45-64

Hotz P: Die Anpolymerisation von Kompositmaterial. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1975;85:608-614

Ilie N, Hickel R: Macro-, micro- and nano-mechanical investigations on silorane and methacrylate-based composite. *Dent Mater* 2009;25:810-9

Ilie N, Hickel R: Silorane-based dental composite: behavior and abilities. *Dent Mater J* 2006;25:445-54

Ilie N, Jelen E, Clementino-Luedemann T, Hickel R: Low-shrinkage composite for dental application. *Dent Mater J* 2007;26:149-55

Ilie N, Kunzelmann KH, Visvanathan A, Hickel R: Curing behavior of a nanocomposite as a function of polymerization procedure. *Dent Mater J* 2005;24:469-77

Janda R: Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe (I-III). *Quintessenz* 1988;39: 1067-1073, 1243-1253, 1393-1398

Rodrigues SA Jr, Ferracane JL, Bona AD: Influence of surface treatments on the bond strength of repaired resin composite restorative materials. *Dent Mater* 2009;25:442-51

Kamann WK, Gängler P: Füllungsreparatur und Reparaturfüllung. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 2000;110:1055-1065

Kilian RJ und Müller TJ: Light cured composites: Dependence of test results on test apparatus. AADR 1980; Progr & Abs 59: No. 203

Körber K, Ludwig K: Zahnärztliche Werkstoffkunde und Technologie. Thieme Verlag, Stuttgart, 1982

Kramer N, García-Godoy F, Frankenberger R. Evaluation of resin composite materials. Part II: in vivo investigations. Am J Dent 2005;18:75-81

Kramer N, Lohbauer U, Garcia-Godoy F, Frankenberger R: Light curing of resin-based composites in the LED era. Am J Dent 2008;21:135-42

Krejci I, Lieber C M, Lutz, F: Time required to remove totally bonded tooth-colored posterior restorations and related tooth substance loss. Dent Mater 1995;Jan;1:34-40.

Kullmann W: Zur Frage der Reparatur-Möglichkeit von Kunststoff-Füllungsmaterialien. Dtsch Zahnärztl Z 1986;41:200-3

Lien W, Vandewalle KS: Physical properties of a new silorane-based restorative system. Dent Mater 2010;26:337-44

Lindemuth JS, Hagge MS: Effect of universal testing machine crosshead speed on the shear bond strength and bonding failure mode of composite resin to enamel and dentin. Mil Med 2000;165:742-6

Lucena-Martin C, Gonzalez-Lopez S, Navajas-Rodriguez de Mondelo JM: The effect of various surface treatments and bonding agents on the repaired strength of heat-treated composites. J Prosthet Dent 2001;86:481-8

Lutz F, Krejci I, Barbakow F: The importance of proximal curing in posterior composite resin restorations. Quintessence Int 1992;23:605-7

Lutz F, Krejci I, Frischknecht A: Light polymerization. The principles and practical tips for its correct use. Schweiz Monatsschr Zahnmed 1992;102:574-88

Lutz F, Lüscher B, Ochsenbein H, Mühlemann HR: Adhäsive Zahnheilkunde. Juris Druck Verlag, Zürich 1976 S. 249

Lutz F, Phillips RW, Roulet J-F, Imfeld T: Komposite- Klassifikation und Wertung. Schweizerische Monatszeitschrift für Zahnheilkunde 1983;93:914-29

Manhart J, Chen H, Hamm G, Hickel, R: Buonocore Memorial Lecture. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. Oper Dent 2004;29:481-508

Matsumura H, Hisamatsu N, Atsuta M: Effect of unfilled resins and a silane primer on bonding between layers of a light-activated composite resin veneering material. J Prosthet Dent 1995;73:386-91

Mc Lean JW: Limitation of posterior composite resins and extending their use with glass ionomer cements. *Quintess Int* 1987;18:517-29

Mitsaki-Matsou H, Karanika-Kouma A, Papadoyiannis Y, Theodoridou-Pahine S: An in vitro study of the tensile strength of composite resins repaired with the same or another composite resin. *Quintessence Int* 1991;22:475-81

Mjör IA: Placement and replacement of restorations. *Oper Dent* 1981;6: 49-54

Mjor IA, Gordan VV: A review of atraumatic restorative treatment. *Int Dent J* 1999;49:127-31

Moad G, Chiefari J, Mayadunne R: Initiating free radical polymerization. *Macromol Sympos* 2002;182:65-80

Naughton, William T and Latta, Mark A: Bond strength of composite to dentin using self-etching adhesive systems. *Quintessence Int* 2005;36:259-62

Odian G: Principles of polymerization. 3rd ed. New York: Willey-Inerscience 1991;P.541-4

Oilo G: Bond strength testing - what does it mean? *Int Dent J* 1993;43:492-8

Opdam NJ, Bronkhorst EM, Roeters JM, Loomans BA: A retrospective clinical study on longevity of posterior composite and amalgam restorations. *Dent Mater* 2007;23:2-8

Opdam NJ, Loomans BA, Roeters FJ, Bronkhorst EM. Five-year clinical performance of posterior resin composite restorations placed by dental students. *J Dent* 2004;32:379-83

Ortengren U, Wellendorf H, Karlsson S, Ruyter IE: Water sorption and solubility of dental composites and identification of monomers released in an aqueous environment. *J Oral Rehabil* 2001;28:1106-15

Palin WM, Fleming GJ, Burke FJ, Marquis PM, Randall RC: The influence of short and medium-term water immersion on the hydrolytic stability of novel low-shrink dental compositse. *Dent Mater* 2005;21:852-63

Papacchini F, Dall'Oca S, Chieffi N, Goracci C, Sadek FT, Suh BI, Tay FR, Ferrari M: composite-to-composite microtensile bond strength in the repair of a microfilled hybrid resin: effect of surface treatment and oxygen inhibition. *J Adhes Dent* 2007;9:25-31

Papacchini F, Magni E, Radovic I, Mazzitelli C, Monticellia F, Goracci C, Polimeni A, Ferrari M: Effect of intermediate agents and pre-heating of repairing resin on composite-repair bonds. *Oper Dent* 2007;32:363-71

Papacchini F, Monticelli F, Hasa I, Radovic I, Fabianelli A, Polimeni A, Ferrari M: Effect of air-drying temperature on the effectiveness of silane primers and coupling blends in the repair of a microhybrid resin composite. *J Adhes Dent* 2007;9:391-7

Papacchini F, Monticelli F, Radovic I, Chieffi N, Goracci C, Tay FR, Polimeni A, Ferrari M: The application of hydrogen peroxide in composite repair. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2007;82:298-304

- Papacchini F, Radovic I, Magni E, Goracci C, Monticelli F, Chieffi N, Polimeni A, Ferrari M: Flowable composites as intermediate agents without adhesive application in resin composite repair. *Am J Dent* 2008;21:53-8
- Papacchini F, Toledano M, Monticelli F, Osorio R, Radovic I, Polimeni A, Garcia-Godoy F, Ferrari M: Hydrolytic stability of composite repair bond. *Eur J Oral Sci* 2007;115:417-24
- Qvist V, Thylstrup A, Mjör IA: Restorative treatment pattern and longevity of resin restorations in Denmark. *Acta Odontol Scand* 1986;44: 351-356
- Rathke A, Tymina Y, Haller B: Effect of different surface treatments on the composite-composite repair bond strength. *Clin Oral Investig* 2008;13:317-23
- Redman CDJ, Hemmings KW, Good JA. The survival and clinical performance of resin-based composite restorations used to treat localized anterior tooth wear. *Br Dent J* 2003;194:566-72
- Reinhardt KJ, Vahl J: Das Polymerisationsverhalten von Kompositen im Kontakt mit Hochpolymeren als Folien- bzw. Formmaterial. *Dtsch Zahnärztl Z* 1981;36: 811-15
- Roulet JF: A materials scientist's view: assessment of wear and marginal integrity. *Quintessence Int* 1987;18: 543-52
- Roulet JF: Degradation in dental polymers. Karger Verlag, Basel/New York 1987
- Roulet JF, Benefits and disadvantages of tooth-coloured alternatives to amalgam. *J Dent* 1997;25:459-73
- Roulet JF, Seewaldt A, Noack MJ: Margin quality of Class III and IV composites in vitro. *Dent Mater* 1991;7:179-85
- Ryge G, Snyder MA. Evaluating the clinical quality of restorations. *J Am Dent Ass* 1972;87:369-377.
- Sarrett DC. Clinical challenges and the relevance of materials testing for posterior composite restorations. *Dent Mater* 2005;21:9-20.
- Sau CW, Oh GS, Koh H, Chee CS, Lim CC: Shear bond strength of repaired composite resins using a hybrid composite resin. *Oper Dent* 1999;24:156-61
- Schaller HG, Menner T, Hahn P, Götze W: Die Reparaturfestigkeit von Kompositen nach unterschiedlicher Konditionierung der Reparaturfläche. *Stomatol* 1993;92: 17-23
- Schweikl H, Schmalz G, Weinmann W: The induction of gene mutations and micronuclei by oxiranes and siloranes in mammalian cells in vitro. *J Dent Res* 2004;83:17-21
- Shawkat ES, Shortall AC, Addison O, Palin WM: Oxygen inhibition and incremental layer bond strengths of resin composites. *Dent Mater* 2009 Nov;25:1338-46
- Shen C, Mondragon E, Gordan VV, Mjor IA: The effect of mechanical undercuts on the

strength of composite repair. *J Am Dent Assoc* 2004;135:1406-12

Sideridou T, Achilias DS: Elution study of unreacted Bis-GMA, TEGDMA, UDMA, and Bis-EMA from light-cured dental resins and resin composites using HPLC. *Biomater* 2004;74:617-26

Sideridou I, Tserki V, Papanastasiou G: Effect of chemical structure on degree of conversion in light-cured dimethacrylate-based dental resins. *Biomater* 2002;23:1819-29

Söderholm KJ, Zigan M, Ragan M, Fischlschweiger W, Bergman, M: Hydrolytic degradation of dental composites. *J Dent Res* 1984;63:1248-54

Swift EJ, Cloe BC, Boyer DB: Effect of a silane coupling agent on composite repair strengths. *Am J Dent* 1994;7:200-2

Swift EJ, Le Valley BD, Boyer DB: Evaluation of new methods for composite repair. *Dent Mater* 1992;8:362-5

Tabassian M, Moon P C: Filler particle characterization in flowable and condensable composite resins. *J Dent Res* 1999;78:483

Teixeira EC, Bayne SC, Thompson JY, Ritter AV, Swift EJ: Shear bond strength of self-etching bonding systems in combination with various composites used for repairing aged composites. *J Adhes Dent* 2005;7:159-64

Tezvergil A, Lassila LV, Vallittu PK: composite-composite repair bond strength: effect of different adhesion primers. *J Dent* 2003;3:521-5

Tezvergil-Mutluay A, Lassila LV, Vallittu PK: Incremental layers bonding of silorane composite: the initial bonding properties. *J Dent* 2008;36:560-3

Thiele PP: Reparaturmöglichkeit von Kompositen / Kompomeren unter Berücksichtigung der Kontamination der Schmelzoberfläche mit Reparaturmaterialien . Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Mediz. Fakultät, Diss., 2002

Tiller HJ, Eichler D, Musil R: Examinations of synthetic resin-metal bonding. Significance and problems of use. *Dent Labor* 1988;36: 1425-30

Tyas M J, Anusavice K J, Frencken J E, Mount G J: Minimal intervention dentistry--a review. FDI Commission Project 1-97. *Int Dent J* 2000;50:1-12

Van Dijken JWV. Durability of new restorative materials in Class III cavities. *J Adhes Dent* 2001;3:65-70

Van Dijken JWV, Sunnegardh-Gronberg K. A four-year clinical evaluation of a highly filled hybrid resin composite in posterior cavities. *J Adhes Dent* 2005;7:343-349

Vankerckhoven H, Lambrechts P, Van Beylen M, Davidson CL, Vanherle G: Unreacted methacrylate groups on the surfaces of composite resin 1982;61:791-5

Van Nieuwenhuysen JP, D'Hoore W, Carvalho J, Qvist J. Long-term evaluation of extensive

restorations in permanent teeth. *J Dent* 2003;31:395-405

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

Willems G, Lambrechts P, Braem M, Vanherle G: composite resins in the 21st century. *Quintessence Int* 1993;24:641-58

Yap AU, Quek CE, Kau CH: Repair of new-generation tooth-colored restoratives: methods of surface conditioning to achieve bonding. *Oper Dent* 1998;23:173-8

Youngson, CC Barclay, CW: A pilot study of intraoral temperature changes. *Clin Oral Invest* 2000;4:183-9

10 Abbildungsverzeichnis

- 1+2 aus: Weinmann W, Thalacker C, Guggenberger R
Siloranes in dental composite.
Dent Mater. 2005;21:68-74
- 3-9 eigenes Bildmaterial
-

Tabellen 1 - 9: eigenes Bildmaterial

11 Curriculum Vitae

Name: Sarah Ivanovas

Geburtsdatum: 30. September 1978

Geburtsort: Tübingen

Familienstand: verheiratet

Schulische Ausbildung

1985-1989	Grundschule Döchtbühl Bad Waldsee
1989-1995	Gymnasium Bad Waldsee
1995-1998	Berufliches Gymnasium der Edith-Stein-Schule Ravensburg
Juni 1998	Erreichen der Allgemeinen Hochschulreife

Studium

1998	Zulassung zum Studium der Zahnmedizin an der FSU Jena und Aufnahme des Studiums
2000	Naturwissenschaftliche Vorprüfung
2002	Zahnärztliche Vorprüfung
2005	Zahnärztliche Prüfung Approbation als Zahnärztin

Beruf

September 2006- Oktober 2008	Assistenz Zahnärztin in Praxis in München
Seit Januar 2009	angestellte Zahnärztin in Praxis in Donauwörth

12 Danksagung

Ich möchte all denen danken, die das Zustandekommen dieser Arbeit ermöglicht haben.

Mein besonderer Dank gilt Frau PD Dr. Nicoleta Ilie für die Überlassung des interessanten Themas, die umfassende Betreuung und das mir entgegengebrachte Vertrauen.

Ohne ihre vielfältige Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.