

Aus der
Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Klinik und Poliklinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten
der Universität Würzburg
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Bernd Klaiber

Der Einfluss von Kavitätenvolumen,
Polymerisationsschrumpfung und Schichttechnik
auf die Randschlussqualität von Klasse-II-Kompositfüllungen

Dissertation
zur Erlangung der Doktorwürde der
Medizinischen Fakultät der
Julius-Maximilians-Universität zu Würzburg

vorgelegt von
Christian Zentgraf
aus Fulda

Würzburg, Oktober 2008

Referent: Prof. Dr. med. dent. Bernd Klaiber

Korreferent: Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Uwe Gbureck

Dekan: Prof. Dr. med. Matthias Frosch

Tag der mündlichen Prüfung: 20.01.2009

Der Promovend ist Zahnarzt.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung und Problemstellung.....	1
1.1 Komposite.....	1
1.2 Beeinflussende Faktoren.....	1
1.2.1 Polymerisationskontraktion.....	1
1.2.2 Elastizitätsmodul (E-Modul).....	2
1.2.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient.....	3
1.2.4 Konfigurationsfaktor (C-Faktor).....	3
1.2.5 Füllungstechnik.....	3
1.2.6 Kavitätenausdehnung.....	4
1.3 In-vitro-Beurteilung von Füllungen.....	4
1.3.1 Randadaptation.....	4
1.3.2 Probenalterung.....	4
1.4 Problemstellung.....	5
2 Material und Methoden.....	6
2.1 Vorbereitung der Zähne.....	6
2.1.1 Lagerung und Reinigung der Zähne.....	6
2.1.2 Präparation der Kavität.....	6
2.2 Herstellung der Füllungen.....	8
2.2.1 Approximalkontaktpunktsimulator.....	8
2.2.2 Vorbereitung der Kavität.....	8
2.2.3 Füllung der Kavität.....	9
2.2.4 Ausarbeitung der Füllungen.....	11
2.3 Alterung der Proben.....	11
2.3.1 Wasserlagerung.....	11
2.3.2 Temperaturwechselbelastung.....	12
2.4 Randanalyse im Rasterelektronenmikroskop (REM).....	12
2.4.1 Abformung der Kompositfüllungen.....	12
2.4.2 Herstellung der Kunstharzreplikate.....	12
2.4.3 Bewertung der Randadaptation.....	13

2.5 Farbstoffpenetrationstest.....	16
2.5.1 Abdichten der Zähne.....	16
2.5.2 Penetrationsuntersuchung.....	16
2.5.3 Vorbereitung der Testzähne für die Auswertung.....	17
2.5.4 Bestimmung der Penetrationstiefe.....	17
2.6 Statistische Auswertung.....	17
3 Ergebnisse.....	18
3.1 Randanalyse im Rasterelektronenmikroskop (REM).....	18
3.2 Farbstoffpenetrationsuntersuchung.....	23
4 Diskussion.....	25
4.1 Bewertung der Methoden.....	25
4.1.1 Problematik von In-vitro-Studien und ihre Relevanz für die Praxis. .	25
4.1.2 Herstellung der Proben.....	26
4.1.3 Alterung der Proben.....	28
4.1.4 Auswertung der Proben.....	29
4.2 Diskussion der Ergebnisse.....	31
4.2.1 Einfluss der Kavitätenausdehnung auf die Randadaptation.....	31
4.2.2 Einfluss der Schichttechnik auf die Randadaptation.....	31
4.2.3 Einfluss des Komposits auf die Randadaptation.....	32
4.3 Schlussfolgerung.....	33
5 Zusammenfassung.....	35
6 Literaturverzeichnis.....	37
7 Anhang.....	45
7.1 Materialverzeichnis.....	45
Danksagung.....	
Lebenslauf.....	

1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Komposite

Komposite als Füllungs- und Aufbaumaterialien stellen heute durch ihre hervorragenden mechanischen Eigenschaften das Restaurationsmaterial der Wahl dar (WILLEMS et al. 1993). Sie werden dem Patientenwunsch nach zahnfarbenen Füllungen gerecht und bieten dem Zahnarzt die Möglichkeit der minimalinvasiven (Karies-)Therapie (RITTER 1998). Komposite sind zusammengesetzte Werkstoffe, deren Hauptbestandteile die organische Matrixphase, die Verbundphase und die anorganisch disperse Füllstoffphase sind. Ergänzt werden Stabilisatoren, Farbstoffe, Pigmente und andere Additiva, um verbesserte Werkstoffeigenschaften zu erreichen (ASMUSSEN 1985). Als organische Matrixphase werden hauptsächlich Bisphenol-glycidylmethacrylat (Bis-GMA), Urethandimethacrylat (UDMA) und Triethylenglycoldimethacrylat (TEGDMA) benutzt (RUYTER & OYSAED 1987). Die meisten handelsüblichen Komposite enthalten Füller auf Silikatbasis sowie Silane in der Verbundphase. Die Materialeigenschaften der Komposite sind seit ihrer Einführung durch Bowen im Jahr 1962 stets verbessert worden. Das Hauptproblem der Komposite, die Polymerisationskontraktion, konnte zwar durch Variationen in der Zusammensetzung der Matrix (ELLAKWA et al. 2007) sowie durch Veränderungen in der Füllstoffphase verringert (KLEVERLAAN & FEILZER 2005), aber nicht beseitigt werden (GIACHETTI et al. 2006, ALOMARI et al. 2007, BRYANT & MAHLER 2007).

1.2 Beeinflussende Faktoren

1.2.1 Polymerisationskontraktion

Bei der Aushärtungsreaktion der Komposite kommt es unweigerlich zu einer Dimensionsänderung, die als Polymerisationskontraktion bezeichnet wird (SILIKAS et al. 2000, ALOMARI et al. 2007). Dieser Schrumpfungsprozess und die sich daraus ergebende Kontraktionsspannung wird für zahlreiche klinische Probleme der adhäsiven Füllungstechnik verantwortlich gemacht (DAVIDSON & FEILZER 1997). Die Volumenänderung beruht auf einer Verkleinerung der inter-

molekularen Abstände der Monomerbausteine bei der Verkettung durch kovalente Bindungen (PATEL et al. 1987, VENHOVEN et al. 1993, DAVIDSON & FEILZER 1997). Das Ausmaß der Schrumpfung ist sowohl von der Anzahl der kovalenten Bindungen als auch von der Größe der Monomere (FLOYD & DICKENS 2006) abhängig. Da nur die Matrixphase schrumpft, die Füllkörper hingegen volumenstabil bleiben, haben letztere einen entscheidenden Einfluss auf die effektive Polymerisationsschrumpfung (MUNKSGAARD et al. 1987, CHUNG & GREENER 1990, CONDON & FERRACANE 1997, CONDON & FERRACANE 2000, KLEVERLAAN & FEILZER 2005). Die heute auf dem Markt befindlichen Komposite haben ein Schrumpfungsvolumen von 1,5 – 3 Volumenprozent (LABELLA et al. 1999, BRYANT & MAHLER 2007). Die gesamte Volumenkontraktion kann in zwei Phasen eingeteilt werden: die Prägel- und die Postgel-Phase (SAKAGUCHI et al. 1992). Während der Prägel-Phase ist das Komposit noch fließfähig und kann durch Nachfließen die Kontraktionsspannung verringern (DAVIDSON et al. 1984). Der Punkt, an dem das Komposit aufgrund der fortgeschrittenen Polymerisation nicht mehr nachfließen kann, ist als Gel-Phase definiert (DAVIDSON & FEILZER 1997). Bei voranschreitender Polymerisation entsteht in der folgenden Postgel-Phase eine Stresssituation für den Verbund zwischen Zahn und Komposit (DAVIDSON et al. 1984). Mögliche Folgen sind: Randspaltbildung, Kompositrandfrakturen und Schmelzrandfrakturen (DAVIDSON et al. 1984, LAI & JOHNSON 1993, SULIMAN et al. 1994, MEREDITH & SETCHELL 1997). Diese treten auf, wenn das Komposit zu starr ist, um die Volumenverringering auszugleichen (FEILZER et al. 1990b) und die an das Material gebundenen (Zahn-)Strukturen nicht genügend nachgeben können (SULIMAN et al. 1994). Die genannten Verbundfehler können zu Randverfärbungen, postoperativer Hypersensibilität (PASHLEY 1990), Sekundärkaries und Pulpaschädigungen (PASHLEY & PASHLEY 1991) führen.

1.2.2 Elastizitätsmodul (E-Modul)

Das E-Modul ist ein Materialkennwert, der die Steifigkeit eines Werkstoffes beschreibt. Es besteht folgende Beziehung zwischen E-Modul und Kontraktionss-

pannung: je größer das E-Modul (die Steifigkeit) des Komposits, desto höher die Spannungsentwicklung (FEILZER et al. 1990b, ILIE et al. 2006, KAHLER et al. 2006, BORKOWSKI et al. 2007). Zudem besteht eine Abhängigkeit des E-Moduls vom Füllstoffgehalt: Eine Erhöhung des Füllstoffgehalts eines Komposits führt zu einem höheren E-Modul (MASOURAS et al. 2008). Demnach führt eine Verringerung der Polymerisationsschrumpfung durch Erhöhung des Füllstoffgehalts durch das dadurch ansteigende E-Modul nicht zwingend zu einer Verringerung der Polymerisationsspannung.

1.2.3 Thermischer Ausdehnungskoeffizient

Während des klinischen Gebrauchs sind Füllungen nicht nur chemischen und mechanischen, sondern auch thermischen Belastungen (z.B.: heiße und kalte Speisen) ausgesetzt. Dabei kommt es aufgrund unterschiedlicher thermischer Ausdehnungskoeffizienten von Komposit und Zahn zu einer Spannungsentwicklung und somit zu Belastungen des Verbundes zwischen Komposit und Zahn (JONES et al. 1979, RETIEF 1994).

1.2.4 Konfigurationsfaktor (C-Faktor)

Der C-Faktor wird als Quotient aus gebundener und freier Oberfläche definiert. Es besteht eine Beziehung zwischen Spannungsentwicklung und Konfigurationsfaktor (NIKOLAENKO et al. 2004, WATTS & SATTERTHWAITTE 2008): je kleiner der C-Faktor desto kleiner die auftretenden Kontraktionsspannungen (DAVIDSON et al. 1984, FEILZER et al. 1987). Der Grund dafür wird darin gesehen, dass mit steigendem C-Faktor die Möglichkeit des Nachfließens während der Prägel-Phase vermindert wird (FEILZER et al. 1987).

1.2.5 Füllungstechnik

Einige Autoren zeigen, dass die Füllungstechnik keinen oder keinen signifikanten Einfluss auf die Randqualität hat (ST GEORGES et al. 2002, LOGUERCIO et al. 2004). Für andere Autoren jedoch hat sie sehr wohl einen signifikanten Einfluss auf die Randqualität (DE WET et al. 1991, TJAN et al. 1992,

YAMAZAKI et al. 2006, IDRISSE et al. 2007). Dabei wird der Aufbau einer Füllung in mehreren Schichten von vielen Autoren empfohlen (LUTZ et al. 1986, MCCULLOCK & SMITH 1986, SEGURA & DONLY 1993, SULIMAN et al. 1993, FIGUEIREDO REIS et al. 2003, YAMAZAKI et al. 2006). Zahlreiche Schichttechniken, die einen mehr oder minder verringerten C-Faktor ausnutzen, wurden beschrieben und diskutiert (LUTZ et al. 1986, WEAVER et al. 1988, LUTZ et al. 1992, TJAN et al. 1992, BICHACHO 1994, LIEBENBERG 1996, KLAFF 2001, DELIPERI & BARDWELL 2002).

1.2.6 Kavitätenausdehnung

Es gibt keinen eindeutig nachweisbaren Zusammenhang zwischen Kavitätenausdehnung und Randqualität (BRAGA et al. 2006, COSTA PFEIFER et al. 2006, DA SILVA et al. 2006). Jedoch weisen große Kavitäten tendenziell eine schlechtere Randadaptation auf als kleine (BRAGA et al. 2006, COSTA PFEIFER et al. 2006).

1.3 *In-vitro*-Beurteilung von Füllungen

1.3.1 Randadaptation

Randundichtigkeiten durch Randspaltbildung, Kompositrandfrakturen und Schmelzrandfrakturen sind mögliche Folgen der Polymerisationsschrumpfung. Zur Untersuchung dieser Randundichtigkeiten wurden im Laufe der Zeit verschiedene Methoden entwickelt. In der vorliegenden Arbeit kamen die Randanalyse im Rasterelektronenmikroskop (siehe Kapitel 2.4) und der Farbstoffpenetrationstest (siehe Kapitel 2.5) zur Anwendung.

1.3.2 Probenalterung

Temperaturwechselbelastung (Thermocycling) als technisches Verfahren dient der Simulation einer physikalischen Belastung, die permanent auf den Verbund zwischen Zahn und Komposit im Mund einwirkt. Aufgrund der durch die Nahrungsaufnahme bedingten Temperaturschwankungen in der Mundhöhle kommt es durch die unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten von

Komposit und Zahnschicht (JONES et al. 1979) zu Spannungen innerhalb der Verbundschicht (RETIEF 1994). Wegen der einfachen Realisierbarkeit im Labor hat die Wechselbelastung in Form von zyklischen Temperaturänderungen weite Verbreitung als Standardverfahren zur künstlichen Alterung gefunden. Die Lagerung der Proben in physiologischer Kochsalzlösung bei 37°C über 30 Tage dient der Simulation oxidativer Depolymerisationsprozesse (SÖDERHOLM 1991) sowie hydrolytischer Aufspaltung chemischer Bindungen (HALLER et al. 1993).

1.4 Problemstellung

Ziel der vorliegenden Untersuchung ist die *in vitro* Evaluation der Randadaptation von Klasse-II-Kompositfüllungen nach künstlicher Alterung in Abhängigkeit von Kavitätentiefe, Komposit und Schichttechnik. Zur Beurteilung der Randadaptation wurden die Proben mittels Farbstoffpenetration sowie unter dem Rasterelektronenmikroskop qualitativ und quantitativ bewertet. Folgende Fragen sollen beantwortet werden:

- Hat die Kavitätenausdehnung Auswirkungen auf die Randqualität von Kompositfüllungen der Klasse II?
- Führt eine geringere Volumenschrumpfung zu einem besseren Randschluss?
- Welchen Einfluss hat das E-Modul auf die Randqualität?
- Haben die Schichttechnik und damit verbunden der C-Faktor Einfluss auf die Randqualität?

2 Material und Methoden

2.1 Vorbereitung der Zähne

2.1.1 Lagerung und Reinigung der Zähne

Zur Verwendung kamen 48 extrahierte kariesfreie menschliche Weisheitszähne mit weitgehend oder vollständig abgeschlossenem Wurzelwachstum. Die Zähne wurden mit Scaler und rotierendem Bürstchen mechanisch gereinigt und bis zum Versuchsbeginn in 0,1% Chloramin-T-Lösung, danach in physiologischer Kochsalzlösung aufbewahrt.

2.1.2 Präparation der Kavität

Die okklusale und proximale Grundpräparation der Kavität wurde mit einem roten Winkelstück (KaVo) unter Wasserkühlung (~50 ml/min) mit einer variablen Drehzahl von ca. 60 000-120 000 U/min durchgeführt. Die Grundpräparation erfolgte in zwei Schritten:

1. Schritt: Zylindrischer Diamantschleifer mittlerer Körnung (mittlere Korngröße 100 µm); 1,2 mm Durchmesser und abgerundete Kanten (Nr. 806314835-KR012, Komet).
2. Schritt: Zylindrischer Diamantfinierer extrafeine Körnung (mittlere Korngröße 15 µm); 1,2 mm Durchmesser und abgerundete Kanten (Nr. 806314835-KREF012, Komet).

Die proximale Präparation zur Standardisierung der Kavitäten erfolgte ebenfalls in zwei Schritten:

1. Schritt: Schall getriebenes Formpräparationsinstrument (Größe 4, mittlere Korngröße 46 µm) betrieben am SonicSys-Handstück (Sonicflex 2000N, KaVo).
2. Schritt: oszillierende Feile feiner Körnung (mittlere Korngröße 10 µm) betrieben am blauen Winkelstück (KaVo) mit Eva-Kopf.

Die standardisierten Abmessungen des proximalen Kastens betragen 3,5 mm innere Breite, 5,5 mm äußere Breite und 4,5 mm innere Höhe, 5,5 mm äußere Höhe, sodass zirkulär eine mindestens 1 mm große Anschrägung gegeben war. Okklusal wurden zwei verschiedene Kavitätengrößen präpariert.

Flache Kavität

Die Dimensionen der „flachen“ Kavität betragen im okklusalen Kasten 3,5 mm in der Breite und 3 mm in der Tiefe (Abbildung 1).

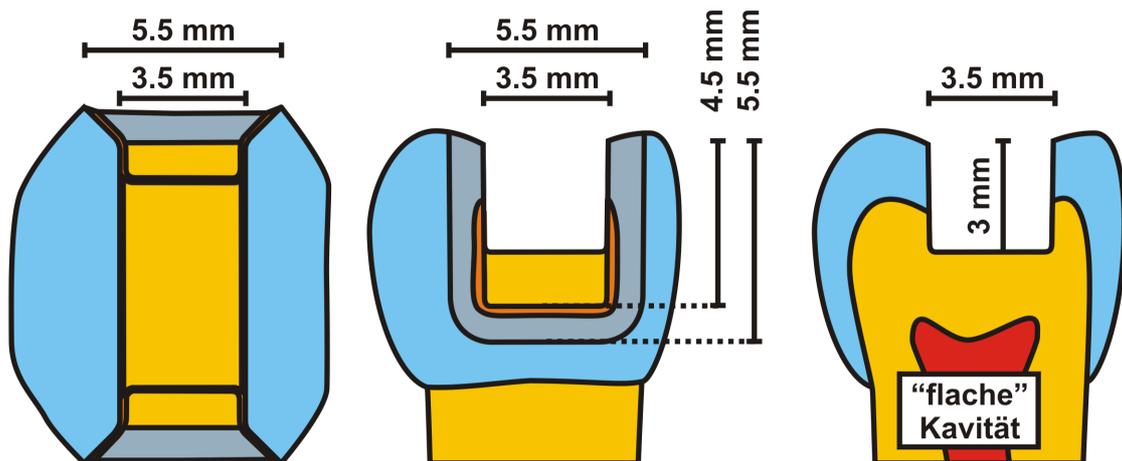


Abbildung 1. Kavitätdimension "flache" Kavität.- links: Aufsicht von okklusal; mitte: Aufsicht von approximal; rechts: Schnitt bukko-lingual

Tiefe Kavität

Die Dimensionen der „tiefen“ Kavität betragen im okklusalen Kasten 3,5 mm in der Breite und 4,5 mm in der Tiefe (Abbildung 2).

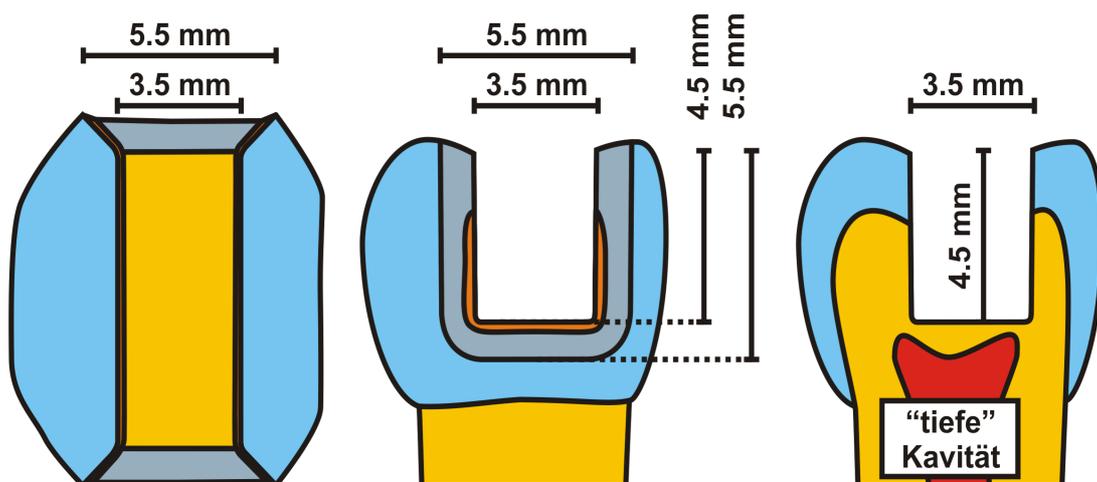


Abbildung 2. Kavitätdimension "tiefe" Kavität.- links: Aufsicht von okklusal; mitte: Aufsicht von approximal; rechts: Schnitt bukko-lingual

2.2 Herstellung der Füllungen

2.2.1 Approximalkontaktpunktsimulator

Mit Hilfe dieser Apparatur war es möglich beim Füllen der Klasse-II-Kavitäten praxisnahe Bedingungen zu schaffen. Die Testzähne wurden mit einem Kaltpolymerisat (Palatur transparent, Heraeus Kulzer) gesockelt. Mit diesem Sockel konnten die Proben im Simulator fixiert werden. Seitlich ließen sich nun die zwei am Simulator beweglich befestigten Kunststoffzähne (Frasacozahn, Franz Sachs & Co GmbH) auf Kontakt heranschieben und über eine Schraube fixieren, sodass eine adäquate Kontaktpunktgestaltung im oberen Kronendrittel mit Hilfe von transparenten Segmentmatrizen (HaweAdapt SectionalMatix, Kerr) und Holzkeilen (Sycamore Interdental Wedges, Hawe Neos Dental) zu realisieren war.

2.2.2 Vorbereitung der Kavität

Die Kavität wurde im Total-Etch-Verfahren (Schmelz 30s, Dentin 15s) mit 35% Phosphorsäuregel (Ultra-Etch, Ultradent) konditioniert. Anschließend wurde die Kavität 30 Sekunden mit Wasserspray vom Konditionierer gereinigt und mit leichtem ölfreiem Luftstrom getrocknet. Das Adhäsiv-Bonding-System (Opti-Bond FL, Kerr; siehe Tabelle 1) wurde mittels Applikationstips nach Herstellerangaben wie folgt aufgetragen: Zuerst wurde der Primer 30 Sekunden einmassiert und anschließend 5 Sekunden mit leichtem Luftstrom verblasen; es folgte das Auftragen des Adhäsivs, das nach Verblasen der Überschüsse 30 Sekunden lichtgehärtet wurde.

Tabelle 1. Zusammensetzung des verarbeiteten Dentinadhäsiv-Systems

Komponente	Zusammensetzung (Herstellerangaben)
OptiBond FL Primer [Chargen-Nr.: 400350]	30% HEMA, 10% GPDM, 15% PAMA, 1% KC, 22% Ethanol, 22% Wasser
OptiBond FL Adhesive [Chargen-Nr.: 401995]	25,7% Bis-GMA, 19,2% HEMA, 6,5% GDMA, 42,2% Ba-Al-Borsilikat-Glas, 2,6% Silikatglas, 1,9% Na ₂ SiF ₆ , 0,3% KC

Bis-GMA Bisphenol-glycidylmethacrylat; GPDM Glycerolphosphatdimetacrylat; GDMA Glycerol-dimethacrylat; HEMA 2-Hydroxyethylmethacrylat; KC Kampferchinon; MMPAA Methacrylat-modifizierte Polyakrylsäure PAMA Phtalsäure-monomethacrylat;

Tabelle 2. Verwendete Komposite und ihre physikalischen Eigenschaften (nach Herstellerangaben)

	Tetric Ceram (Ivoclar)	Grandio (Voco)
Schrumpfung	2,39 Vol.-%	1,57 Vol.-%
E-Modul	9,4 GPa	17,1 GPa
Füllstoffgehalt	79 Gew.-% 60 Vol.-%	87 Gew.-% 71,4 Vol.-%

2.2.3 Füllung der Kavität

Die Kavitäten wurden bei Zimmertemperatur mit den zu vergleichenden Kompositen (Tabelle 2) mittels Mehrschichttechnik gefüllt und jede Schicht für 20 Sekunden mit der Polymerisationslampe (Translux CL, Kulzer) von okklusal gehärtet. Hierbei wurden die folgenden Schichttechniken verwendet:

konventionelle Drei-Schicht-Technik

Bei der konventionellen Drei-Schicht-Technik wird die Kavität in mehreren Schichten von unten nach oben gefüllt (Abbildung 3), wobei jede Schicht am äußeren approximalen Füllungsrand beteiligt ist und ein ungünstiges Verhältnis zwischen freier und gebundener Oberfläche aufweist.

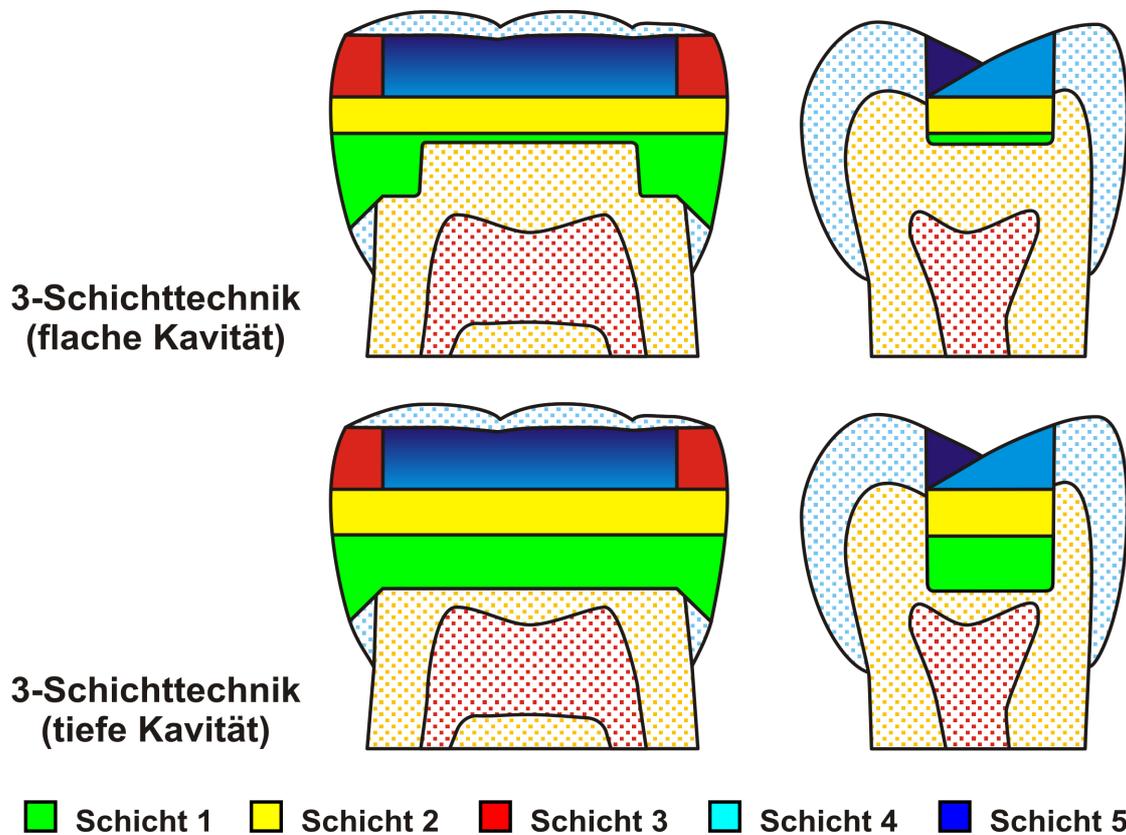


Abbildung 3. Drei-Schicht-Technik.- Schnitte: links: mesio-distal; rechts: bukkal-lingual

Schalentechnik

Bei der Schalentechnik wird die Kavität zuerst approximal durch je eine Schicht (approximale Schale) geschlossen. Anschließend wird die Kavität wie eine Klasse-I-Kavität gefüllt (Abbildung 4). Die approximale Schale hat ein günstiges Verhältnis zwischen freier und gebundener Oberfläche; außerdem ist sie die einzige Schicht, die am äußeren approximalen Füllungsrand beteiligt ist.

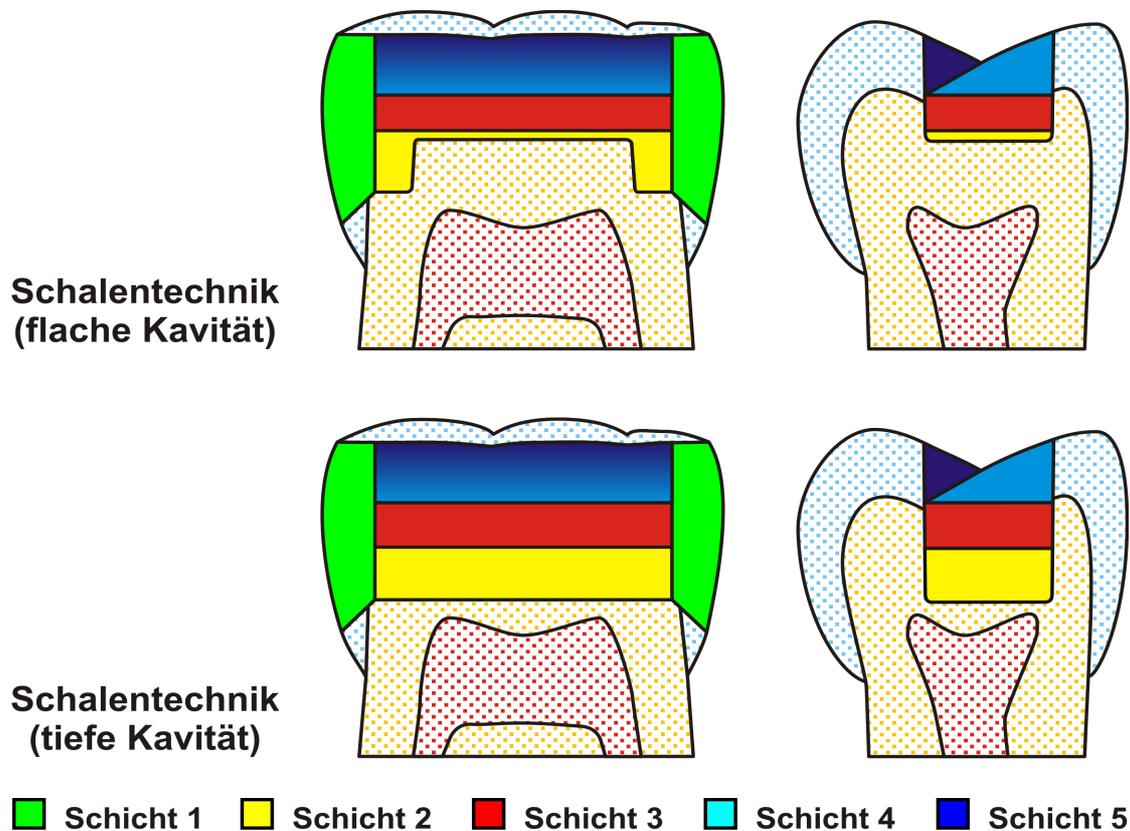


Abbildung 4. Schalentechnik.- Schnitte: links: mesio-distal; rechts: bucco-lingual

2.2.4 Ausarbeitung der Füllungen

Eventuell vorhandene Überschüsse wurden nach Entnahme des Probenzahns aus dem Kontaktpunktsimulator entfernt und der Übergang zwischen Zahn und Füllung mit Hilfe von rotierenden braunen (Nr. 9608204030, Komet) und grünen (Nr. 9618204030, Komet) Silikonpolierern unter Wasserkühlung geglättet.

2.3 Alterung der Proben

2.3.1 Wasserlagerung

Zur künstlichen Alterung wurden die gefüllten Zähne in physiologischer Kochsalzlösung (Fresenius) im Wärmeschrank (Memmert) bei 37°C für insgesamt zweimal 15 Tage aufbewahrt.

2.3.2 Temperaturwechselbelastung

Nach 15 Tagen im Wärmeschrank wurde eine Temperaturwechselbelastung (Thermocycling) durchgeführt. Durch eine individuell angefertigte Vorrichtung wurden die Proben in einem Siebgefäß für jeweils 30 Sekunden abwechselnd in ein Kaltwasserbad mit 5°C (UKT 600, Lauda) und ein Warmwasserbad mit 55°C (MT, Lauda) getaucht. Nach 2500 Zyklen war das Thermocycling beendet und die Proben wurden für weitere 15 Tage im Wärmeschrank gelagert.

2.4 Randanalyse im Rasterelektronenmikroskop (REM)

2.4.1 Abformung der Kompositfüllungen

Zur Untersuchung der Randschlussqualität wurden die Approximalflächen nach der Probenalterung mit einer Präzisionsabformmasse auf Silikonbasis (President Light Body, Coltène) abgeformt. Zunächst wurden die Proben mittels Wasserspray von eventuellen Salzrückständen gereinigt und anschließend getrocknet. Eine kleine Menge der additionsvernetzenden Silikonabformmasse wurde aufgebracht und mittels feinem Luftstrahl zu einem dünnen Film verblasen, um Ungenauigkeiten durch Blasenbildung zu vermeiden. Anschließend wurde zur Stabilisierung weiteres Abformmaterial aufgebracht. Nach dem Aushärten wurde der Abdruck bis zum Ausgießen in einem staubfrei verschlossenen Behälter aufbewahrt.

2.4.2 Herstellung der Kunstharzreplikate

Zum Ausgießen der fett- und staubfreien Abformungen wurde ein Kunstharz (Araldit, Härter HR, Ciba-Geigy) verwendet. Hierzu wurde das Kunstharz im Verhältnis der Gewichtsanteile Harz : Härter von 5 : 1 durch langsames Ausstreichen zu einer homogenen Masse vermischt, blasenfrei in die Abformungen eingebracht und anschließend 24 Stunden im Wärmeofen (Mettler) ausgehärtet. Im Anschluss wurden die getrimmten Replikate leitend mittels Kohlenstoffkleber (Leit C, Neubauer Chemikalien) auf die REM-Probenteller geklebt und nach sorgfältigem Entfetten im Vakuum unter einer Xenonschutzwolke mit Gold bedampft (K550, Emitech).

2.4.3 Bewertung der Randadaptation

Zur Bewertung der Randschlussqualität und deren quantitativem Anteil an der Gesamtlänge des Füllungsrandes wurde ein Rasterelektronenmikroskop (DSM 940, Zeiss) verwendet. Bei einem Arbeitsabstand von 16 mm und einer Beschleunigungsspannung von 5 kV wurde der gesamte approximale Füllungsrand bei 100-1000 facher Vergrößerung untersucht und folgenden Kriterien zugeordnet:

- A kontinuierlicher Rand (Abbildung 5)
- B Haarriss (Randspalt $< 1 \mu\text{m}$) (Abbildung 6)
- C Spalt (Randspalt $> 1 \mu\text{m}$) (Abbildung 7)
- D Schmelzrandfraktur (Abbildung 8)
- E Kompositrandfraktur (Abbildung 9)
- F Überschuss
- G Nicht auswertbarer Rand

Die Bilder des REMs wurden bei 200 facher Vergrößerung digitalisiert. Mit Hilfe einer Bildbearbeitungssoftware erfolgte nun die Zuordnung zu A bis G sowie die Messung und Aufsummierung der zugehörigen Abschnittslängen.

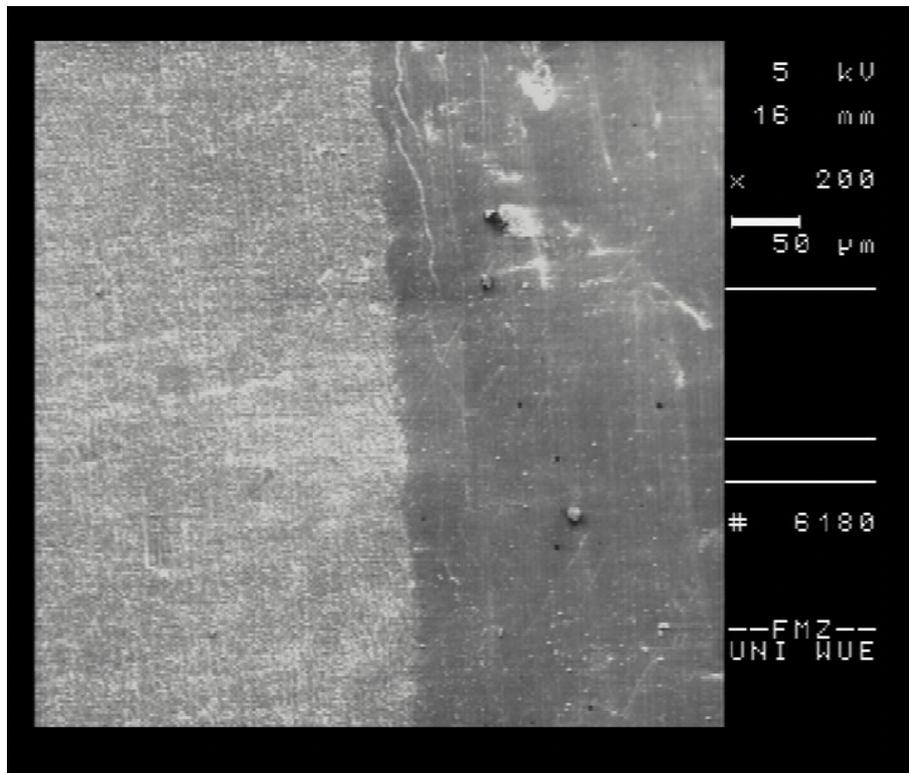


Abbildung 5. Kriterium kontinuierlicher Rand

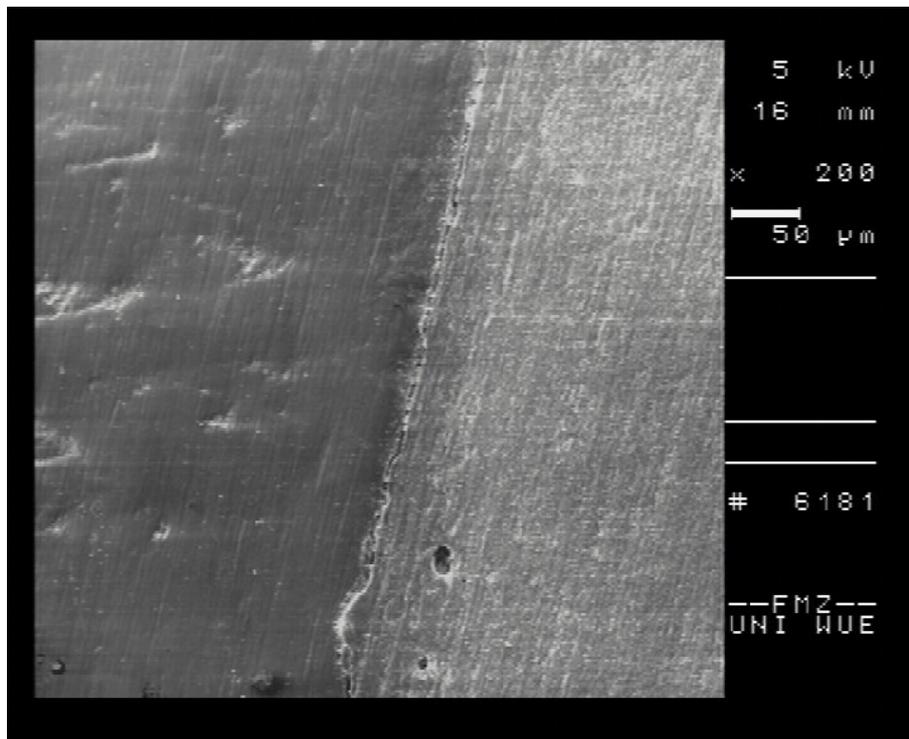


Abbildung 6. Kriterium Haarriss

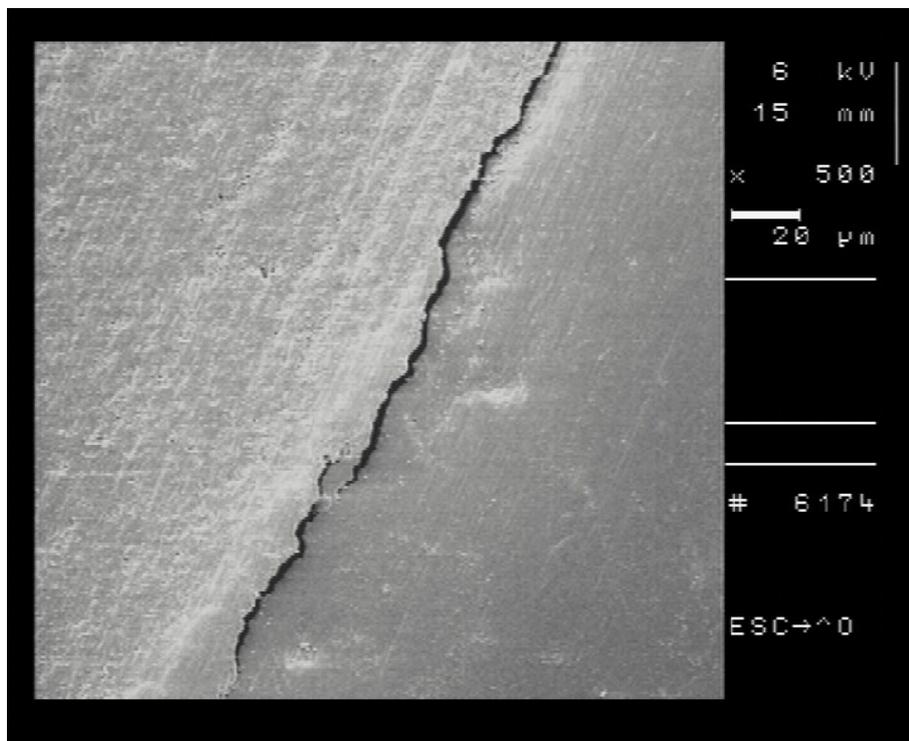


Abbildung 7. Kriterium Spalt

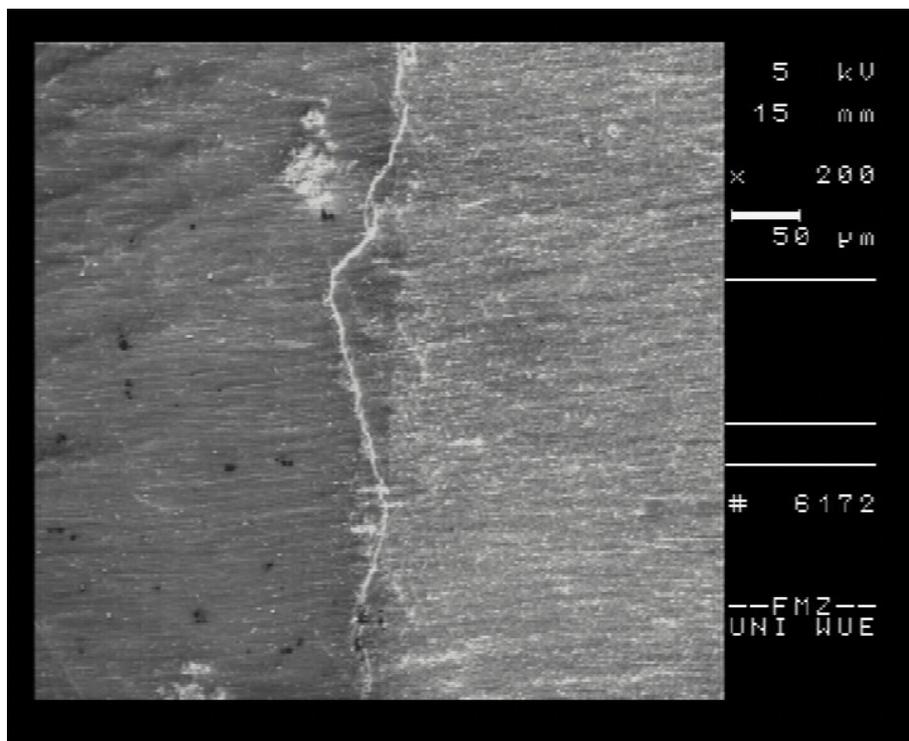


Abbildung 8. Kriterium Schmelzrandfraktur

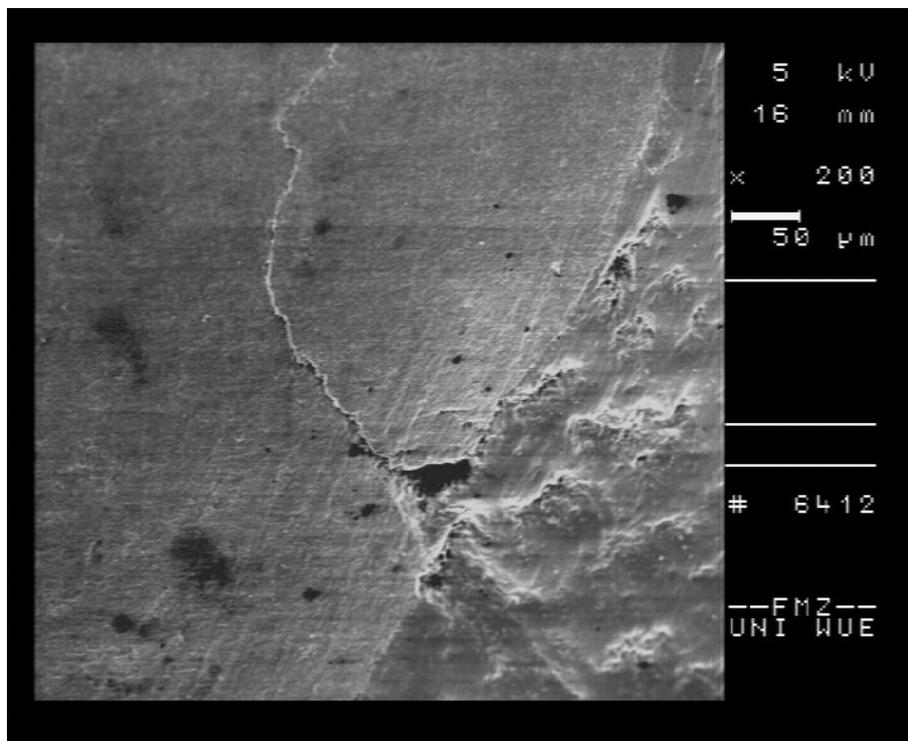


Abbildung 9. Kriterium Kompositrandfraktur

2.5 Farbstoffpenetrationstest

2.5.1 Abdichten der Zähne

Die Zähne wurden mit in 80%iger Ethanol-Lösung getränkten Wattepellets von etwaigen Fettrückständen gereinigt und anschließend mit rotem Nagellack zweimal lackiert. Zum Kavitätenrand hin wurde im Abstand von ca. 1 mm kein Nagellack aufgetragen. Die Lackierung erfolgte 24 Stunden vor der Penetrationsuntersuchung. Die Abdichtung der Wurzelspitze war durch die Sockelung für den Approximalkontaktpunktsimulator gegeben.

2.5.2 Penetrationsuntersuchung

Die so vorbereiteten Proben wurden für 2 Stunden bei 37°C und absoluter Dunkelheit in eine 50 Gew.-% AgNO₃-Lösung eingelegt. Anschließend wurden die Proben mittels entmineralisiertem Wasser gründlich gereinigt und in einer Lösung aus Röntgenfilmentwickler (Periomat Intra, Dürr Dental) und entmineralisiertem Wasser im Verhältnis 1:1 für 6 Stunden auf einem Diabetrachter belichtet.

2.5.3 Vorbereitung der Testzähne für die Auswertung

Nach Entnahme der Proben aus der Lösung und anschließender Reinigung unter fließendem Wasser wurden die Zähne mit einem Luftbläser getrocknet. Anschließend wurden die Proben mit Hilfe des Sockels in der Halterung einer Trennschleifmaschine (WOCO 50/Med, Conrad) fixiert und mit einer diamantierten Trennscheibe (WOCO 93/6, Conrad) unter Wasserkühlung durchtrennt. Die Schnittebene verlief mittig längs durch den okklusalen Kasten und trennte den Zahn in seine bukkale und orale Hälfte. Es entstanden demnach zwei Schnittflächen mit je zwei zervikalen Rändern auf jeder Fläche und somit insgesamt vier auszuwertende Randabschnitte.

2.5.4 Bestimmung der Penetrationstiefe

Zur Bestimmung des Ausmaßes der Farbstoffpenetration wurde das Bild des Mikroskops (Tessovar, Zeiss) mit einer digitalen Mikroskopkamera (PDMC-2, Polaroid) digitalisiert und mit einer Bildbearbeitungssoftware vermessen. Bestimmt wurde die Eindringtiefe des Farbstoffes an der zervikalen Ansträngung entlang des Bodens des approximalen Kasten. Die Eindringtiefe in das Dentin selbst - in Richtung Pulpa – blieb dabei aufgrund der unterschiedlichen Dentindurchlässigkeit unberücksichtigt.

2.6 Statistische Auswertung

Die acht Untersuchungsgruppen hatten eine Gruppengröße von $n = 6$. Die Zuteilung zu den Gruppen erfolgte randomisiert. Für die einzelnen Gruppen wurden jeweils Mittelwert und Standardabweichung der Ergebnisse aus der REM-Analyse und der Farbstoffpenetrationsuntersuchung berechnet. Die Mittelwerte wurden mittels dreifaktorieller Varianzanalyse auf statistische Signifikanz untersucht. Dazu wurde das Softwareprogramm SPSS (Version 12) verwendet.

3 Ergebnisse

3.1 Randanalyse im Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die Abbildungen 10 bis 14 zeigen die Anteile der Kriterien A bis E (siehe 2.4.3) am gesamten Rand aufgeteilt in horizontale und vertikale Randabschnitte und zugeordnet zu den Versuchsgruppen.

kontinuierlicher Rand:

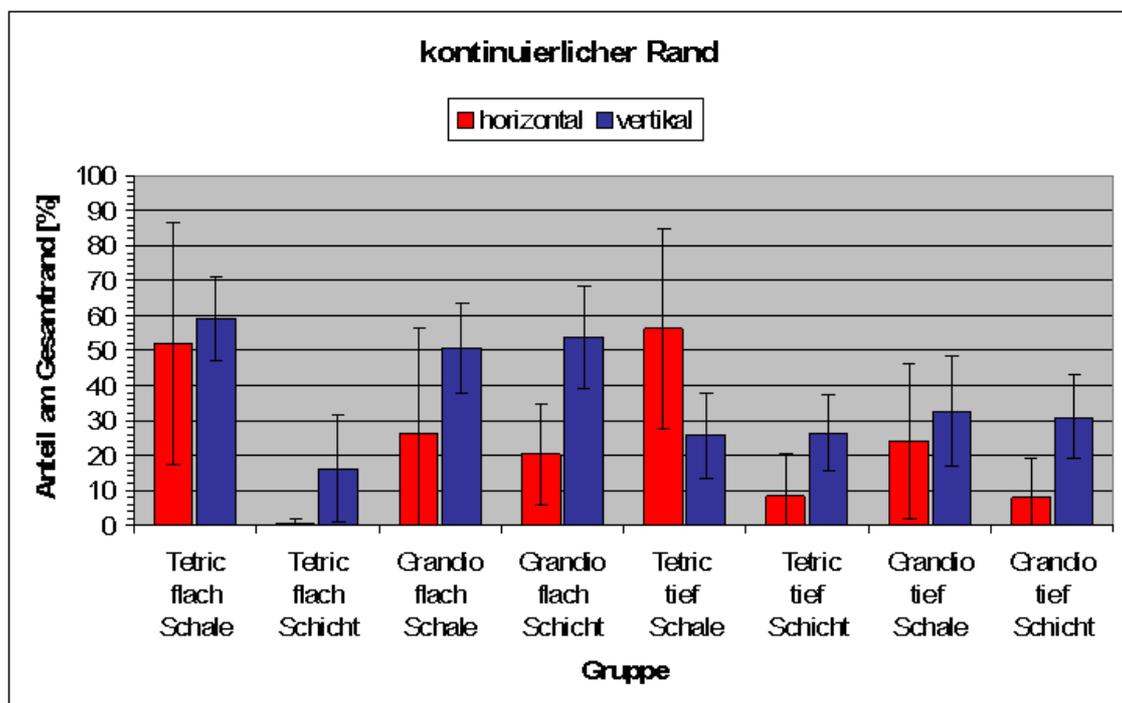


Abbildung 10. Mittelwerte mit Standardabweichungen der Anteile des kontinuierlichen Randes am gesamten Rand

Die Anteile des kontinuierlichen Randes zeigt Abbildung 10. Hier zeigt sich am horizontalen Rand ein Unterschied in Bezug auf den Untersuchungsparameter Schichttechnik zugunsten „Schale“ in allen Gruppen. Die statistische Auswertung mittels Varianzanalyse ergibt, dass dieser Unterschied signifikant ($p < 0,001$) ist. Für die beiden anderen Haupteffekte Komposit und Kavität ergeben sich keine signifikanten Unterschiede. Des weiteren zeigt die Varianzanalyse eine signifikante ($p < 0,01$) Wechselwirkung zwischen Komposit und Schichttechnik, die sich wie folgt darstellt: während bei der Schalenteknik „Tetric“ bes-

sere Ergebnisse als „Grandio“ erzielt, zeigt bei der Drei-Schicht-Technik „Grandio“ die bessere Randadaptation.

Die statistische Auswertung am vertikalen Rand zeigt einen signifikant größeren Anteil an kontinuierlichem Rand und somit bessere Ergebnisse für „Grandio“ beim Haupteffekt Komposit ($p < 0,05$), für „flach“ beim Haupteffekt Kavität ($p < 0,001$) und für „Schale“ beim Haupteffekt Schichttechnik ($p < 0,05$). Zusätzlich zeigt sich auch eine signifikante ($p < 0,01$) Wechselwirkung zwischen Komposit und Schichttechnik: bei „Tetric“ zeigt die Schalenteknik bessere Ergebnisse, wohingegen bei „Grandio“ die Schichttechnik besser abschneidet. Eine weitere signifikante ($p < 0,05$) Wechselwirkung zeigt sich zwischen Kavität und Schichttechnik: der Vorteil der Schalenteknik ist in flachen Kavitäten ausgeprägter als in tiefen Kavitäten. Zusätzlich zeigt sich eine signifikante Wechselwirkung zwischen Komposit, Kavität und Schichttechnik ($p < 0,01$), sodass sich keine eindeutigen Schlüsse ziehen lassen.

Rand mit Haarriss:

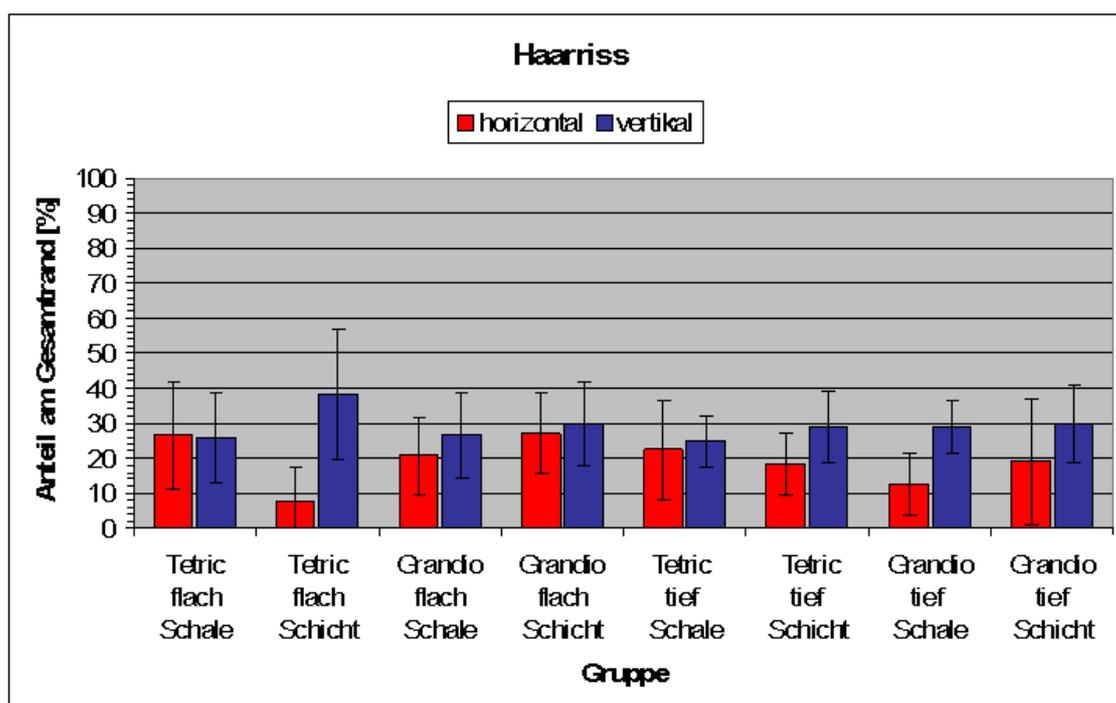


Abbildung 11. Mittelwerte mit Standardabweichungen der Anteile des Randes mit Haarriss am gesamten Rand

Abbildung 11 zeigt die Anteile des Randes mit Haarriss. Die statistische Analyse am horizontalen Rand zeigt keine signifikanten Unterschiede im Blick auf die drei Haupteffekte Komposit, Schichttechnik und Kavität. Es zeigt sich jedoch eine signifikante ($p < 0,05$) Wechselwirkung zwischen den Parametern Komposit und Schichttechnik: während bei „Tetric“ die Schalentechnik mehr Haarrisse aufweist, zeigt bei „Grandio“ die Schalentechnik bessere Ergebnisse. Am vertikalen Rand sind die Mittelwerte in allen acht Gruppen sehr ähnlich. Die statistische Analyse zeigt keinerlei signifikante Unterschiede.

Rand mit Spalt:

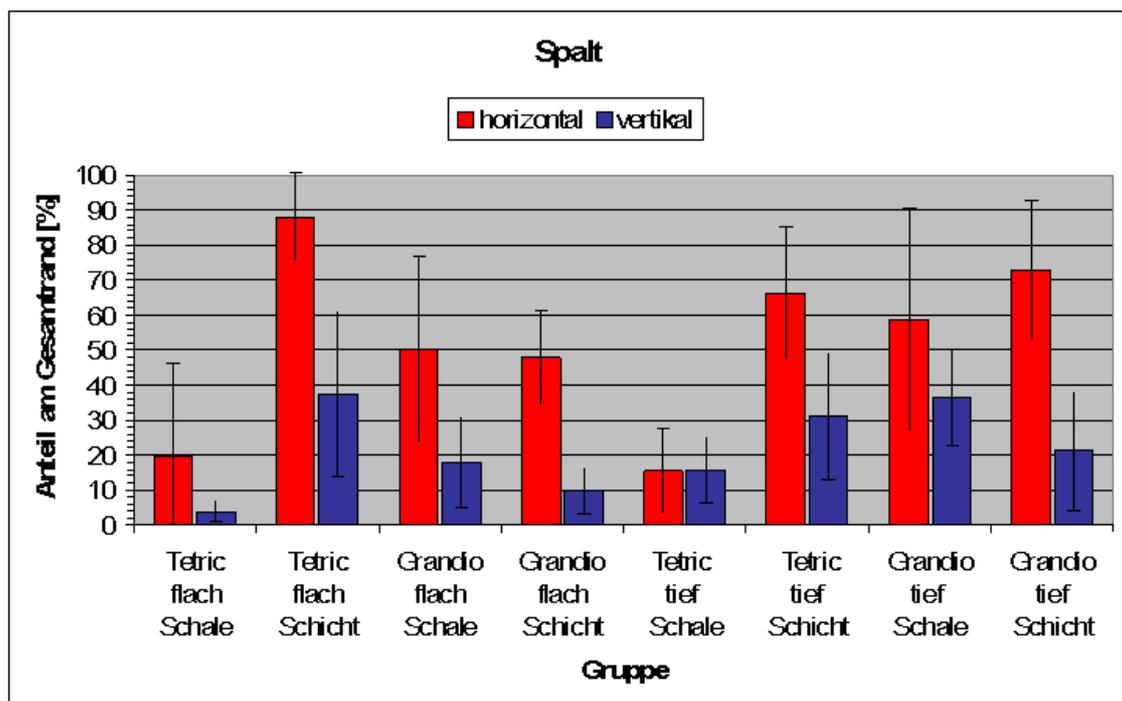


Abbildung 12. Mittelwerte mit Standardabweichungen der Anteile des Randes mit Spalt am gesamten Rand

In Abbildung 12 sind die Anteile des Randes mit Spalt dargestellt. Die statistische Analyse am horizontalen Rand zeigt signifikant ($p < 0,001$) geringere Spaltanteile bei der Schalentechnik. Für die beiden anderen Untersuchungsparameter Komposit und Kavität sind keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Des Weiteren zeigt sich eine signifikante ($p < 0,001$) Wechselwirkung zwischen Kom-

posit und Schicht: wiederum schneidet „Tetric“ gegenüber „Grandio“ bei der Schalenteknik besser ab, wohingegen „Grandio“ bei der Drei-Schicht-Technik überlegen ist. Eine weitere signifikante ($p < 0,05$) Wechselwirkung besteht zwischen Komposit und Kavität: während sich in Kavität „flach“ ein besseres Ergebnis für „Grandio“ zeigt, weist „Tetric“ in der Kavität „tief“ geringere Spaltanteile auf. Die Analyse am vertikalen Rand zeigt signifikant ($p < 0,05$) geringer Spaltanteile bei der flachen Kavität. Außerdem zeigt sich wiederum die bekannte signifikante ($p < 0,001$) Wechselwirkung zwischen Komposit und Schichttechnik: für „Tetric“ zeigt die Schalenteknik weniger Randspalt, wohingegen für „Grandio“ die Drei-Schicht-Technik die besseren Ergebnisse erzielt.

Rand mit Schmelzrandfraktur:

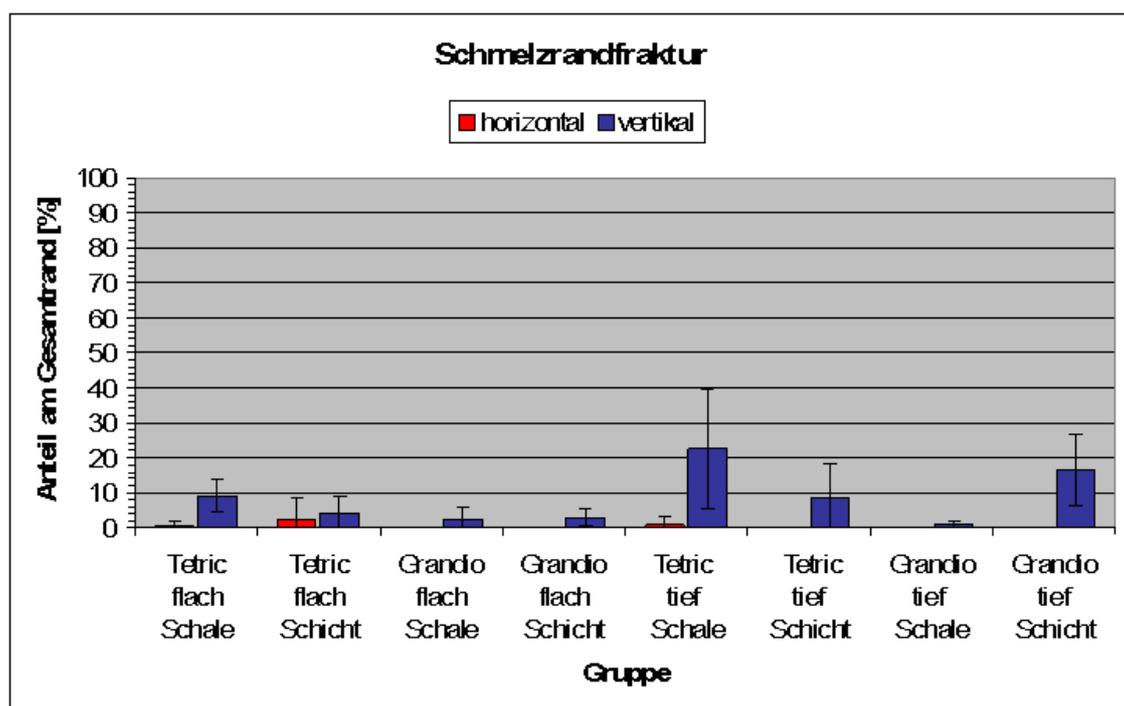


Abbildung 13. Mittelwerte mit Standardabweichungen der Anteile des Randes mit Schmelzrandfraktur am gesamten Rand

Abbildung 13 zeigt die Anteile des Randes mit Schmelzrandfraktur. Die Anteile beim horizontalen Rand sind äußerst gering. Eine Analyse ergibt für den horizontalen Rand keinerlei signifikante Unterschiede. Beim vertikalen Rand zeigen

die Gruppen „Tetric tief Schale“, „Tetric tief Schicht“ und „Grandio tief Schicht“ leicht erhöhte Werte. Die Varianzanalyse ergibt für den Untersuchungsparameter Komposit signifikant ($p < 0,05$) bessere Ergebnisse für „Grandio“ und für den Untersuchungsparameter Kavität einen signifikanten ($p < 0,01$) Vorteil für „flach“. Des weiteren zeigt die Analyse eine signifikante ($p < 0,001$) Wechselwirkung zwischen Komposit und Schichttechnik: bei „Tetric“ erzielt die Dreischicht-Technik die besseren Ergebnisse, wohingegen bei „Grandio“ die Schalenteknik überlegen ist. Es ergibt sich aber auch eine signifikante ($p < 0,05$) Wechselwirkung aller drei Untersuchungsparameter.

Rand mit Kompositrandfraktur:

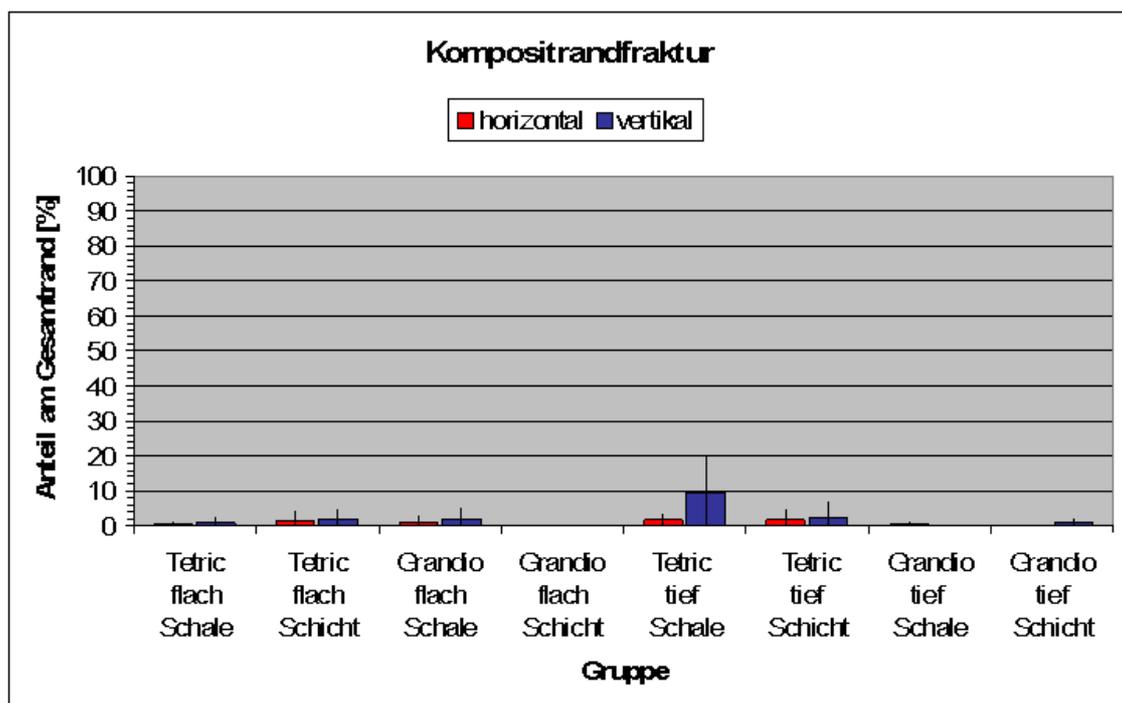


Abbildung 14. Mittelwerte mit Standardabweichungen der Anteile des Randes mit Kompositrandfraktur am gesamten Rand

Abbildung 14 zeigt die Anteile des Randes mit Kompositrandfraktur. Sowohl die Anteile des horizontalen als auch die des vertikalen Randes sind in den Gruppen sehr gering. Lediglich die Gruppe „Tetric tief Schale“ zeigt beim vertikalen Rand leicht erhöhte Werte. Eine Analyse ergibt für den horizontalen Rand bei

allen drei Untersuchungsparametern keine signifikanten Unterschiede. Für den vertikalen Rand zeigt die Varianzanalyse für den Parameter Komposit einen signifikanten ($p < 0,05$) Vorteil für „Grandio“, aber auch eine signifikante ($p < 0,05$) Wechselwirkung für alle drei Parameter.

3.2 Farbstoffpenetrationsuntersuchung

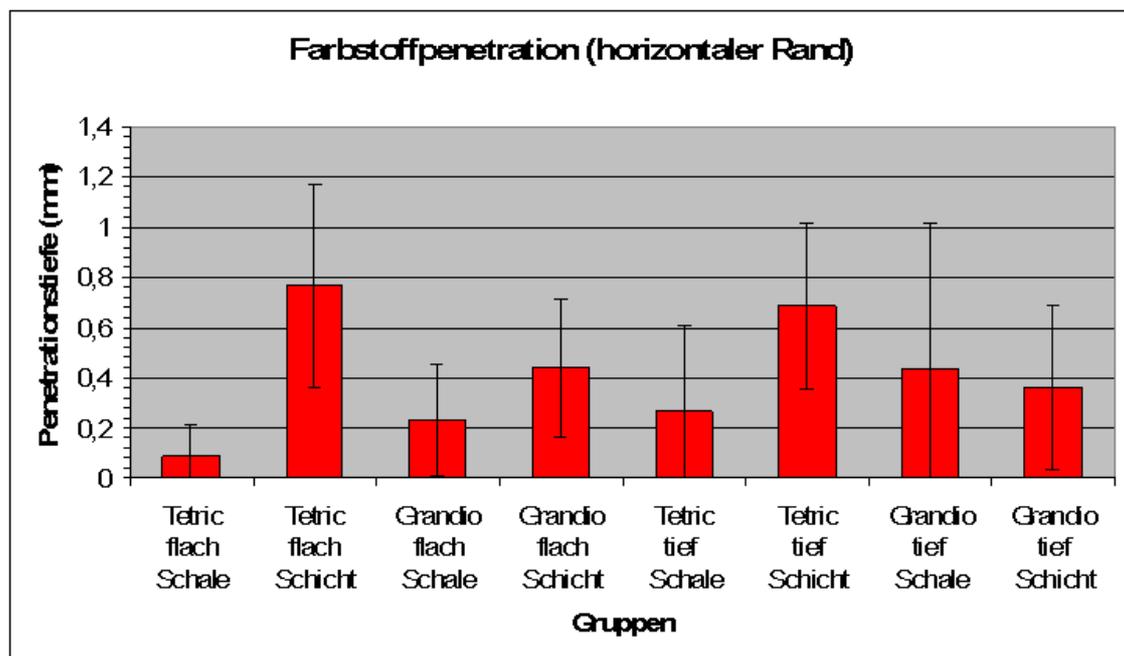


Abbildung 15. Mittelwerte mit Standardabweichungen der Penetrationstiefe

Abbildung 15 zeigt die Mittelwerte der Farbstoffeindringtiefe zugeordnet zu den Versuchsgruppen. Die statistische Analyse zeigt eine signifikant ($p < 0,01$) geringere Farbstoffpenetration bei der Schalenteknik. Für die beiden anderen Untersuchungsparameter Komposit und Kavität sind keine signifikanten Unterschiede feststellbar. Des weiteren zeigt sich auch hier die signifikante ($p < 0,05$) Wechselwirkung zwischen Komposit und Schichttechnik: bei der Schalenteknik zeigt „Tetric“ die besseren Ergebnisse, wohingegen bei der Drei-Schicht-Technik „Grandio“ eine geringere Penetrationstiefe aufweist.

Zur besseren Übersicht zeigt Tabelle 3 eine Zusammenstellung der Signifikanzen am horizontalen Rand aus der Randanalyse im REM und der Farbstoffpenetrationsuntersuchung; Tabelle 4 zeigt die Signifikanzen am vertikalen Rand.

Tabelle 3. Signifikanzen der Randanalyse und Farbstoffpenetration am horizontalen Rand

Parameter	Signifikanz			
	Farbstoffpenetration	Randanalyse im REM		
		kontinuierl.	Riss	Spalt
Komposit	-	-	-	-
Technik	p < 0,01	p < 0,001	-	p < 0,001
Kavität	-	-	-	-
Komposit-Technik	p < 0,05	p < 0,01	p < 0,05	p < 0,001
Komposit-Kavität	-	-	-	p < 0,05
Kavität-Technik	-	-	-	-
Komp.-Kav.-Tech.	-	-	-	-

Tabelle 4. Signifikanzen der Randanalyse am vertikalen Rand

Parameter	Signifikanz		
	Randanalyse im REM		
	kontinuierl.	Riss	Spalt
Komposit	p < 0,05	-	-
Technik	p < 0,05	-	-
Kavität	p < 0,001	-	p < 0,05
Komposit-Technik	p < 0,01	-	p < 0,001
Komposit-Kavität	-	-	-
Kavität-Technik	p < 0,05	-	-
Komp.-Kav.-Tech.	p < 0,01	-	-

4 Diskussion

4.1 Bewertung der Methoden

4.1.1 Problematik von *In-vitro*-Studien und ihre Relevanz für die Praxis

Auch wenn die in dieser Studie genutzten Untersuchungsmethoden zur Beurteilung von Füllungsrandqualitäten heutzutage als etablierte Methode gelten (ROULET et al. 1989), so können Ergebnisse von *In-vitro*-Randspaltanalysen generell nur eingeschränkt zur Vorhersage von Randspaltbildung bei klinisch gelegten Klasse-II-Kompositrestaurationen herangezogen werden (ABDALLA & DAVIDSON 1993). Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass unter klinischen Bedingungen individuelle Fehlerquellen wie z.B. eingeschränktes Sicht- und Arbeitsfeld, absolute Trockenlegung der Kavität und Compliance des Patienten einen großen Einfluss auf die Qualität der Füllung haben. Diese Fehlerquellen können unter Laborbedingungen minimiert werden. Auf diese Weise wird ein standardisiertes Vorgehen ermöglicht, wodurch Material- und Technikunterschiede deutlicher zum Tragen kommen. Ein weiterer wichtiger Punkt, der die klinische Relevanz von *In-vitro*-Studien schmälert, sind die Probenzähne. Zur Verwendung kommen meist, wie auch in dieser Studie, extrahierte Weisheitszähne. Dieser Umstand bedingt, dass - anders als bei vitalen Zähnen - kein Liquor aus den Dentinkanälchen ausströmt. Dieser Flüssigkeitsaustritt führt bei vitalen Zähnen zu einer verminderten Adaptation hydrophober Monomere (QVIST & QVIST 1987). Des Weiteren weisen Probenzähne Kariesfreiheit sowie meist ein junges Alter auf. Im Gegensatz zum sklerosierten Dentin am Boden einer kariesbedingten Kavität (PASHLEY & PASHLEY 1991) findet man hier vornehmlich weite Tubuli ohne Sklerosierungen und wenig intertubuläre Hartschubstanz. Beides führt zu veränderten Bedingungen im Vergleich zur klinischen Situation.

4.1.2 Herstellung der Proben

4.1.2.1 Vorbereitung der Zähne

Die Auswahl der Zähne erfolgte mit größter Sorgfalt. Trotzdem sind neben den bereits genannten Fehlerquellen weitere, für die *In-vitro*-Studie relevante Unterschiede nicht auszuschließen. Dazu zählen vor allem Makro- und Mikromorphologie sowie das „Alter“ der Probenzähne. Bei den geringen Gruppengrößen ($n = 6$) ist es trotz randomisierter Aufteilung der Probenzähne schwierig, Effekte auf die Ergebnisse durch diese Unterschiede auszuschließen (DIETSCHI et al. 1995, DIETSCHI & HERZFELD 1998, GLOCKNER K et al. 1998). Da individuelle Abweichungen bei der manuellen Präparation mit rotierenden Instrumenten nicht zu vermeiden sind (DIETSCHI et al. 1995, GLOCKNER K et al. 1998), wurde im entscheidenden approximalen Bereich ein schallgetriebenes Formpräparationsinstrument benutzt. Diese oszillierende Präparationstechnik wurde erstmals in den 50er Jahren beschrieben (OMAN & APPLEBAUM 1955). Da der oszillierende Präparationsansatz einen Negativabdruck seiner selbst in der Zahnhartsubstanz hinterlässt, ist eine standardisierte, mit hoher Genauigkeit reproduzierbare Kavität mit konstantem Volumen und Randwinkel auf einfache Art möglich (HUGO et al. 1996).

4.1.2.2 Herstellung der Füllungen

Vor der Füllung der Probenzähne wurden die Kavitäten mittels Drei-Schritt-Etch-&-Rinse Dentinhartvermittler vorbereitet. Dies wird in der Literatur als „Goldstandard“ betrachtet (SWIFT 1998, SWIFT 2001, STRASSLER 2003, KIREMITÇI et al. 2004, PERDIGÃO 2007). Die Füllung der Kavitäten erfolgte mit zwei unterschiedlichen Mehrschichttechniken. Bei beiden Methoden wird das Komposit in geringen Schichtstärken eingebracht und jede Schicht einzeln ausgehärtet. Dies führt zu einer Verringerung der Spannungsentwicklung (LUTZ et al. 1986b). Es ist jedoch zu beachten, dass nur 70-85% der Polymerisations-schrumpfung sofort nach Lichtaktivierung stattfindet (SAKAGUCHI et al. 1992). Dies führt dazu, dass sich trotz Mehrschichttechnik die Schrumpfungsprozesse

der einzelnen Schichten überlagern können (VERSLUIS et al. 1996, WINKLER et al. 1996). Außerdem deformieren spät eingebrachte Schichten durch ihre Polymerisation wiederum die vorherigen Schichten und können so zur Vergrößerung des Randspalts beitragen (LOGUERCIO et al. 2004). Ein weiteres Ziel der Mehrschichttechnik ist es, den C-Faktor für die einzelnen Schichten zu verbessern. Dies führt ebenfalls zu einer Verringerung der Kontraktionsspannung (DAVIDSON et al. 1984, FEILZER et al. 1987), welche für die Entstehung von Randspalten verantwortlich ist (FEILZER et al. 1990a, WILSON et al. 1991). Dabei sollte die Schalenteknik (BICHACHO 1994) gegenüber der konventionellen Drei-Schicht-Technik (LUTZ et al. 1986a) deutlich überlegen sein. Mit der Schalenteknik wird eine Klasse-II-Kavität in eine Klasse-I-Kavität verwandelt, indem man zuerst die approximale Wand mit einer Schicht Komposit aufbaut. Diese Schicht erfüllt die drei Hauptanforderungen, um die Kontraktionsspannungen zu minimieren: geringe Menge an Material, kleiner C-Faktor, wenig Kontakt zu gegenüberliegenden Kavitätenrändern (GIACHETTI et al. 2006). Außerdem ist diese erste Schicht bei dieser Methode die einzige, die am äußeren approximalen Füllungsrand beteiligt ist. Der sehr gute C-Faktor bei der approximalen Schicht geht jedoch zu Lasten des C-Faktors für die folgenden „inneren“ Schichten, welche - wie oben beschrieben - ebenfalls einen geringen Einfluss auf die Gesamtfüllung haben.

Die Kavitäten wurden entweder mit einem Hybridkomposit (Tetric Ceram, Ivoclar) oder mit einem Nano-Hybridkomposit (Grandio, Voco) gefüllt. Die verwendeten Materialien zeigen die typischen Materialeigenschaften ihrer Kompositfamilie. Das Nano-Hybridkomposit zeigt aufgrund seines höheren Füllstoffgehalts und des somit geringeren Anteils an schrumpfender Matrix im Vergleich zum Hybridkomposit eine deutlich geringere Polymerisationsschrumpfung (KLEVERLAAN & FEILZER 2005). Der hohe Füllstoffgehalt geht einher mit einem höheren E-Modul (MASOURAS et al. 2008). Ein hohes E-Modul hat einen positiven Einfluss auf die Beständigkeit der Füllung bei okklusaler Belastung (ASMUSSEN & PEUTZFELDT 2008) und einen negativen Einfluss auf die

Spannungsentwicklung während der Polymerisation (ILIE et al. 2006). Der Einfluss auf die Füllung durch Spannungsentwicklung während der Polymerisationsschrumpfung ist höher als der durch okklusale Belastung (BORKOWSKI et al. 2007).

4.1.3 Alterung der Proben

Temperaturwechselbelastung (Thermocycling) und Wasserlagerung gehören zu den Routineverfahren bei *In-vitro*-Studien zur Simulation physiologischer Belastungen (AMARAL et al. 2007). Diese Verfahren simulieren die üblicherweise im Mund vorkommenden Belastungen zwar nur ansatzweise, stellen allerdings einen guten Kompromiss in Hinblick auf die einfachere Realisierbarkeit dar (AMARAL et al. 2007). Die thermische Belastung während des Thermocyclings übt aufgrund des unterschiedlichen Ausdehnungsverhaltens von Komposit, Schmelz und Dentin (JONES et al. 1979) eine mechanische Belastung auf den Komposit-Zahn-Verbund aus. Diese führt zu Ermüdungserscheinungen an der Verbundgrenze (FEILZER et al. 1990a, FEILZER et al. 1990b, MOMOI & MCCABE 1994), wodurch eine Randspaltbildung und somit eine Verschlechterung der Randqualität erfolgen kann. Ursprünglich kontinuierliche Ränder können nach der Belastung Spaltbildungen aufweisen (TORSTENSON & BRÄNNSTRÖM 1988, KOYUTURK et al. 2006). Die Relevanz des thermischen Ausdehnungskoeffizienten für die klinische Bewertung eines Komposits wird allerdings von einigen Autoren in Frage gestellt (WENDT et al. 1992, ROSSOMANDO & WENDT 1995, PAZINATTO et al. 2003). Die Parameter des in dieser Studie durchgeführten Thermocyclings (Anzahl der Zyklen, Verweildauer, Temperaturdifferenz) entsprechen denen zahlreicher Studien (AIROLDI et al. 1992, HALLER et al. 1993). Die Wasserlagerung dient der Simulation von Depolymerisationsprozessen durch Sauerstoff (SÖDERHOLM 1991) sowie von hydrolytischen Spaltungen chemischer Bindungen (HALLER et al. 1993), die durch Diffusionsprozesse im Grenzflächenbereich hervorgerufen werden (KULLMANN 1990). Dies führt bei wochen- bis monatelanger Wasserlagerung

zur Zunahme von Randspalten (HALLER et al. 1993, MEHL et al. 1994, YAP et al. 1998).

4.1.4 Auswertung der Proben

4.1.4.1 Randanalyse im Rasterelektronenmikroskop (REM)

Die qualitative und quantitative Beurteilung des Füllungsrandes im REM gilt als Standarduntersuchungsmethode, um die Qualität einer Füllung zu beurteilen (HANSEN 1984, FINGER & OHSAWA 1987, ROULET et al. 1989, TORSTENSON & ODEN 1989, BLUNCK & ROULET 1989, KREJCI & LUTZ 1991, AIROLDI et al. 1992). Ein defekter Füllungsrand stellt eine Schwachstelle für den klinischen Langzeiterfolg der Füllung dar und kann zu Randverfärbungen, postoperativer Hypersensibilität (PASHLEY 1990), Sekundärkaries und Pulpaschädigungen (PASHLEY & PASHLEY 1991) führen. In dieser Evaluation wurden Kunstharzreplika zur Oberflächenanalyse im REM genutzt, da sich diese in der Literatur bewährt haben (BLUNCK & ROULET 1989, KREJCI & LUTZ 1991). Im Gegensatz zu natürlichen Zähnen, die bei Untersuchung im Hochvakuum durch Deformation und Rissbildung Untersuchungsergebnisse verfälschen, unterliegen die Replika bei der Untersuchung keinen Veränderungen. Auch kann durch die Nutzung von Replika eine gegenseitige Beeinflussung der Randanalyse im REM und der Farbstoffpenetration ausgeschlossen werden. Die dreidimensionale Ausdehnung eines Randdefektes ist sicherlich für die Randschlussqualität entscheidend. Diese kann jedoch im REM leider nicht bestimmt werden, da nur die Oberflächenausdehnung und nicht die Spalttiefe gemessen werden kann. Es finden sich unterschiedliche Auffassungen in der Literatur, welche Ausdehnung nun anstatt dieser als Maß für die Randschlussqualität herangezogen werden soll. Einige Autoren bevorzugen dabei die mittlere (TORSTENSON & ODEN 1989), andere die maximale Randspaltbreite (HANSEN 1984, HANSEN 1986a, HANSEN 1986b, FINGER & OHSAWA 1987). Die meisten Autoren berechnen jedoch, wie auch in dieser Evaluation getan, zur Beurteilung der Randschlussqualität das Verhältnis von Randspalt-

länge zur Gesamtlänge (BLUNCK & ROULET 1989, KREJCI & LUTZ 1991, AIROLDI et al. 1992, KREJCI et al. 1993), da dies für die Beurteilung des klinischen Langzeiterfolgs besser geeignet zu sein scheint.

4.1.4.2 Farbstoffpenetrationsuntersuchung

Der Farbstoffpenetrationstest ist ein Standardverfahren zur Untersuchung der Randdichtheit adhäsiver Restaurationen. Als Penetrationsmedium steht neben basischer Fuchsinlösung und Methylenblau auch das in dieser Evaluation verwendete Silbernitrat (AgNO_3) zur Verfügung. Letzteres hat sich in der Vergangenheit bewährt, da sich nach Belichtung und Behandlung mit Filmentwickler die Silberkristalle beim Sägen aus dem Randspalt nicht auswaschen (KANCA 1989, BARKHORDAR & STARK 1990, BARKHORDAR et al. 1992, PRATI et al. 1994). Noch ungeklärt ist, ob das Penetrationsvermögen von Silbernitrat vergleichbar mit dem von Speichel oder anderen im Mund vorkommenden Flüssigkeiten ist. Auch konnte ein direkter Zusammenhang zwischen Penetrationstiefe und Randspaltdimension nicht nachgewiesen werden (ROULET 1987, SÖDERHOLM 1991). Ergebnisse der Farbstoffpenetration sind daher wohl nur bedingt für die klinische Bewertung von Füllungen von Bedeutung.

Neben der in dieser Evaluation genutzten zweidimensionalen Auswertung einfacher Schnittebenen, kann die Farbstoffpenetration auch dreidimensional ausgewertet werden. Dies ist durch die computergestützte Auswertung von digitalisierten Serienschnittbildern (GALE et al. 1994) möglich oder durch stereomikroskopische Auswertung von Probenzähnen, die zuvor durch Chemikalien transparent gemacht wurden (MARINELLI & EICHMILLER 1993). Eine Studie sieht die dreidimensionale Methode als überlegen an (GWINNETT et al. 1995), während eine andere Studie zu dem Schluss kommt, dass die konventionelle zweidimensionale Methode ebenso präzise ist wie die dreidimensionalen Techniken (MARINELLI & EICHMILLER 1993).

4.2 Diskussion der Ergebnisse

4.2.1 Einfluss der Kavitätenausdehnung auf die Randadaptation

Ein Einfluss des Kavitätenvolumens auf die Randadaptation konnte in dieser Studie nicht eindeutig nachgewiesen werden. Es zeigte sich jedoch am vertikalen Rand eine signifikant schlechtere Randadaptation aufgrund häufigerer Ausbildung eines Spalts bei großem Kavitätenvolumen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den wenigen Veröffentlichungen zu diesem Thema (BRAGA et al. 2006, COSTA PFEIFER et al. 2006, DA SILVA et al. 2006). Zu beachten ist jedoch, dass in der vorliegenden Studie die Vergrößerung des Kavitätenvolumens nur durch Vertiefung des okklusalen Kastens vorgenommen wurde, sodass die approximalen Kästen bei allen Versuchsgruppen die gleiche Größe aufwiesen. Da die Auswertung der Randadaptation jedoch ausschließlich am approximalen Rand erfolgte, könnte dies eine Begründung dafür sein, dass am horizontalen Rand der Einfluss des Kavitätenvolumens auf die Randadaptation nicht signifikant war.

4.2.2 Einfluss der Schichttechnik auf die Randadaptation

In der Literatur wird der Einfluss der Füllungstechnik auf die Randadaptation kontrovers diskutiert. Je nach Versuchsaufbau konnte kein (LOGUERCIO et al. 2004), ein geringer (ST GEORGES et al. 2002), aber auch ein signifikanter Einfluss (DE WET et al. 1991, TJAN et al. 1992, YAMAZAKI et al. 2006, IDRISSE et al. 2007) der Füllungstechnik auf die Randadaptation nachgewiesen werden. Dabei ist zu beachten, dass beide Studien, die keinen signifikanten Einfluss der Füllungstechnik zum Ergebnis hatten, Klasse-V-Kavitäten, während die anderen Arbeiten so wie die vorliegende Studie Klasse-II-Kavitäten untersuchten. Im Unterschied zu den aufgeführten Klasse-II-Kavitäten-Studien (DE WET et al. 1991, TJAN et al. 1992, YAMAZAKI et al. 2006, IDRISSE et al. 2007) wurden in der vorliegenden Arbeit nicht Einschicht- und Mehrschicht-Technik, sondern zwei mehrschichtige Füllungstechniken miteinander verglichen. Hierbei war die Schalen-technik vor allem am horizontalen Rand signifikant überlegen. Die Ergebnisse

unterstützen demnach die Auffassung, dass die Randadaptation bei Klasse-II-Kavitäten von der Füllungstechnik abhängig ist. Es konnte aber auch gezeigt werden, dass die beiden verwendeten mehrschichtigen Füllungstechniken sich je nach verwendetem Komposit unterschiedlich stark auf die Randqualität auswirken. Die Füllungstechnik sollte demnach stets zusammen mit den Materialeigenschaften des verwendeten Komposits betrachtet und bewertet werden.

4.2.3 Einfluss des Komposits auf die Randadaptation

Der Einfluss des Komposits auf die Randadaptation ist unbestritten. Volumenschrumpfung (KLEVERLAAN & FEILZER 2005) und E-Modul (ILIE et al. 2006, BORKOWSKI et al. 2007, MOREIRA DA SILVA et al. 2007) kristallisieren sich in der Literatur als entscheidende Materialkennwerte heraus. Durch Erhöhung des Füllstoffgehalts mittels vorpolymerisierten Partikeln kann die Volumenschrumpfung vermindert werden (KLEVERLAAN & FEILZER 2005). Da ein höherer Füllstoffgehalt zu einem höheren E-Modul führt (MASOURAS et al. 2008), sollten beide Materialkennwerte jedoch nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Ein erhöhtes E-Modul ist verantwortlich für eine Verschlechterung der Randschlussqualität (BORKOWSKI et al. 2007, MOREIRA DA SILVA et al. 2007). Gleichzeitig bedeutet ein niedriges E-Modul nicht automatisch eine bessere Randadaptation (ILIE et al. 2006), was die Abhängigkeit von einem weiteren Parameter nahe legt. In Übereinstimmung mit der Literatur konnte diese Studie einen Einfluss des Komposits auf die Randadaptation nachweisen. Keines der beiden getesteten Komposite war aber generell überlegen, es zeigte sich vielmehr eine signifikante Abhängigkeit von Komposit und Schichttechnik. Das Hybridkomposit zeigte gegenüber dem Nano-Hybridkomposit bessere Randqualitäten bei den mit Hilfe der Schalentechnik gefüllten Kavitäten. Bei den mittels Drei-Schicht-Technik gefüllten Kavitäten schnitt hingegen das Nano-Hybridkomposit besser ab. Da sich die beiden Schichttechniken vor allem beim C-Faktor der ersten Schicht unterscheiden, kann man den Einfluss der Schichttechnik auf eben diesen Unterschied zurückführen. Der Einfluss des C-Faktors auf die Spannungsentwicklung und damit auf die Randqualität wird in der Literatur seit

langem diskutiert (DAVIDSON et al. 1984, FEILZER et al. 1987, NIKOLAENKO et al. 2004, MOREIRA DA SILVA et al. 2007, WATTS & SATTERTHWAITE 2008). In diesem Zusammenhang lassen sich die Ergebnisse der vorliegenden Studie so interpretieren, dass das Hybridkomposit seine größere Volumenschrumpfung in Schichten mit kleinem C-Faktor durch seine Fähigkeit zum Nachfließen während der Polymerisation mehr als ausgleichen kann. Bei Schichtungen mit großem C-Faktor hingegen ist die Möglichkeit des Nachfließens eingeschränkt und das Nano-Hybridkomposit zeigt bessere Randadaptation aufgrund seiner niedrigeren Volumenschrumpfung. Oder mit Bezug auf das E-Modul formuliert: Ein Komposit mit niedrigem E-Modul ist in Schichten mit geringem C-Faktor in der Lage, die Spannungsentwicklung aufgrund der Polymerisationskontraktion durch Nachfließen auszugleichen und so ihre negativen Folgen abzumildern. Ein größerer C-Faktor und/oder ein größeres E-Modul vermindern diese Möglichkeit und können so zu schlechterer Randadaptation führen. Diese Studie bestätigt somit die gemeinsame Abhängigkeit von Material (Volumenkontraktion und E-Modul) und Füllungstechnik (C-Faktor) auf die Spannungsentwicklung und damit auf die Randqualität (FEILZER et al. 1990b, IDRISSE et al. 2007).

4.3 Schlussfolgerung

Zusammenfassend können aus der Studie folgende Punkte herausgestellt werden:

- Sowohl Materialeigenschaften wie Volumenschrumpfung und E-Modul als auch der C-Faktor - und damit verbunden die Füllungstechnik – haben entscheidenden Einfluss auf die Randadaptation von *in vitro* gelegten Füllungen in standardisierten Klasse-II-Kavitäten.
- Die drei Faktoren (Volumenschrumpfung, E-Modul und C-Faktor) sollten nicht getrennt voneinander betrachtet werden, da sie sich gegenseitig beeinflussen: Mit steigendem E-Modul (und somit geringerer Nachfließfähigkeit des Komposits während der Polymerisation) nimmt der Einfluss des C-Faktors (und somit der Füllungstechnik) auf die Randadaptation

ab und umgekehrt. Geringere Volumenschrumpfung eines Komposits bedeutet nicht automatisch bessere Randadaptation.

- Für Klasse-II-Kavitäten stellt sich die Schalenteknik als signifikant überlegen in Bezug auf die Randschlussqualität dar; dies gilt insbesondere für das Hybridkomposit „Tetric Ceram“.
- Kleinvolumige Kavitäten zeigen nicht generell einen besseren Randschluss als großvolumige Kavitäten.

5 Zusammenfassung

Die Randspaltbildung adhäsiver Restaurationen stellt bis heute ein grundlegendes Problem dar. Ziel dieser Untersuchung war die *In-vitro*-Evaluation der Randadaptation von Klasse-II-Kompositfüllungen nach künstlicher Alterung in Abhängigkeit von Kavitätentiefe, Komposit und Schichttechnik.

Zu diesem Zweck wurden an 48 extrahierten Weisheitszähnen mittels sonoabrasiven Präparationsinstrumenten zwei unterschiedlich standardisierte Klasse-II-Kavitäten (flache Kavität bzw. tiefe Kavität) hergestellt. Diese wurden mit Hilfe zweier Schichttechniken (Drei-Schicht-Technik bzw. Schalentechnik) und zweier Komposite (Hybridkomposit (Tetric Ceram, Ivoclar) bzw. Nano-Hybridkomposit (Grandio, Voco)) gefüllt. Nach künstlicher Alterung mittels Thermocycling und Wasserlagerung wurden die Proben zur Beurteilung der Randadaptation mittels Farbstoffpenetration und unter dem Rasterelektronenmikroskop qualitativ und quantitativ bewertet. Die Ergebnisse wurden mittels dreifaktorieller Varianzanalyse auf statistische Signifikanz untersucht.

Ein Einfluss des Kavitätenvolumens auf die Randadaptation konnte in dieser Studie nicht eindeutig nachgewiesen werden. Es zeigte sich jedoch am vertikalen Rand eine signifikant schlechtere Randadaptation aufgrund der häufigeren Ausbildung eines Spalts bei großem Kavitätenvolumen. Bezüglich der Schichttechnik konnte ein Einfluss auf die Randqualität gezeigt werden: Bei beiden Auswertungsmethoden war die Schalentechnik signifikant gegenüber der Drei-Schicht-Technik überlegen. Ebenfalls konnte ein Einfluss des Komposits auf die Randadaptation nachgewiesen werden: Keines der beiden getesteten Komposite war generell überlegen; es zeigte sich vielmehr eine signifikante Abhängigkeit von Komposit und Schichttechnik. Das Hybridkomposit zeigte gegenüber dem Nano-Hybridkomposit bessere Randqualitäten bei den mit Hilfe der Schalentechnik gefüllten Kavitäten. Bei den mittels Drei-Schicht-Technik gefüllten Kavitäten schnitt hingegen das Nano-Hybridkomposit besser ab.

Dies ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass das Hybridkomposit seine Fähigkeit zum Nachfließen während der Polymerisation, welche auf sein gerin-

ges E-Moduls zurückzuführen ist, in Schichten mit kleinem C-Faktor ausnutzen und so seine größere Volumenschrumpfung ausgleichen kann. Schichtungen mit großem C-Faktor verringern die Möglichkeit des Nachfließens und das Nano-Hybridkomposit zeigt dort bessere Randadaptation aufgrund seiner niedrigeren Volumenschrumpfung.

Diese Studie konnte zeigen, dass sowohl Materialeigenschaften wie Volumenschrumpfung und E-Modul als auch der C-Faktor - und damit verbunden die Füllungstechnik - entscheidenden Einfluss auf die Randadaptation von *in vitro* gelegten Füllungen in standardisierten Klasse-II-Kavitäten haben. Die Studie stellte heraus, dass diese drei Faktoren (Volumenschrumpfung, E-Modul und C-Faktor) nicht getrennt voneinander betrachtet werden sollten. Es zeigte sich, dass für Klasse-II-Kavitäten die Schalenteknik signifikant überlegen in Bezug auf die Randschlussqualität ist; dies gilt insbesondere für das Hybridkomposit „Tetric Ceram“.

6 Literaturverzeichnis

Abdalla, A.I., Davidson, C.L.: Comparison of the marginal integrity of in vivo and in vitro Class II composite restorations. *J Dent* 21, 158-162 (1993).

Airoldi, R.L., Krejci, I., Lutz, F.: In vitro evaluation of dentinal bonding agents in mixed Class V cavity preparations. *Quintessence Int* 23, 355-362 (1992).

Alomari, Q., Ajlouni, R., Omar, R.: Managing the polymerization shrinkage of resin composite restorations: a review. *SADJ* 62, 12, 14, 16 passim (2007).

Amaral, F.L.B., Colucci, V., Palma-Dibb, R.G., Corona, S.A.M.: Assessment of in vitro methods used to promote adhesive interface degradation: a critical review. *J Esthet Restor Dent* 19, 340-353 (2007).

Asmussen, E.: Clinical relevance of physical, chemical, and bonding properties of composite resins. *Oper Dent* 10, 61-73 (1985).

Asmussen, E., Peutzfeldt, A.: Class I and Class II restorations of resin composite: An FE analysis of the influence of modulus of elasticity on stresses generated by occlusal loading. *Dent Mater* 24, 600-5 (2008).

Barkhordar, R.A., Stark, M.M.: Sealing ability of intermediate restorations and cavity design used in endodontics. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol* 69, 99-101 (1990).

Barkhordar, R.A., Stark, M.M., Soelberg, K.: Evaluation of the apical sealing ability of apatite root canal sealer. *Quintessence Int* 23, 515-518 (1992).

Bichacho, N.: The centripetal build-up for composite resin posterior restorations. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 6, 17-23, quiz 24 (1994).

Blunck, U., Roulet, J.F.: In vitro marginal quality of dentin-bonded composite resins in Class V cavities. *Quintessence Int* 20, 407-412 (1989).

Borkowski, K., Kotousov, A., Kahler, B.: Effect of material properties of composite restoration on the strength of the restoration-dentine interface due to polymerization shrinkage, thermal and occlusal loading. *Med Eng Phys* 29, 671-676 (2007).

Braga, R.R., Boaro, L.C.C., Kuroe, T., Azevedo, C.L.N., Singer, J.M.: Influence of cavity dimensions and their derivatives (volume and 'C' factor) on shrinkage stress development and microleakage of composite restorations. *Dent Mater* 22, 818-823 (2006).

Bryant, R.W., Mahler, D.B.: Volumetric contraction in some tooth-coloured restorative materials. *Aust Dent J* 52, 112-117 (2007).

Chung, K.H., Greener, E.H.: Correlation between degree of conversion, filler concentration and mechanical properties of posterior composite resins. *J Oral Rehabil* 17, 487-494 (1990).

Condon, J.R., Ferracane, J.L.: In vitro wear of composite with varied cure, filler level, and filler treatment. *J Dent Res* 76, 1405-1411 (1997).

Condon, J.R., Ferracane, J.L.: Assessing the effect of composite formulation on polymerization stress. *J Am Dent Assoc* 131, 497-503 (2000).

Costa Pfeifer, C.S., Braga, R.R., Cardoso, P.E.C.: Influence of cavity dimensions, insertion technique and adhesive system on microleakage of Class V restorations. *J Am Dent Assoc* 137, 197-202 (2006).

da Silva, A.F., Piva, E., Demarco, F.F., Correr Sobrinho, L., Osinga, P.W.R.: Microleakage in conventional and bonded amalgam restorations: influence of cavity volume. *Oper Dent* 31, 377-383 (2006).

Davidson, C.L., de Gee, A.J., Feilzer, A.: The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. *J Dent Res* 63, 1396-1399 (1984).

Davidson, C.L., Feilzer, A.J.: Polymerization shrinkage and polymerization shrinkage stress in polymer-based restoratives. *J Dent* 25, 435-440 (1997).

de Wet, F.A., Exner, H.V., du Preez, I.C., van Niekerk, J.P.: The effect of placement technique on marginal adaptation of posterior resins. *J Dent Assoc S Afr* 46, 171-174 (1991).

Deliperi, S., Bardwell, D.N.: An alternative method to reduce polymerization shrinkage in direct posterior composite restorations. *J Am Dent Assoc* 133, 1387-1398 (2002).

Dietschi, D., De Siebenthal, G., Neveu-Rosenstand, L., Holz, J.: Influence of the restorative technique and new adhesives on the dentin marginal seal and adaptation of resin composite Class II restorations: an in vitro evaluation. *Quintessence Int* 26, 717-727 (1995).

Dietschi, D., Herzfeld, D.: In vitro evaluation of marginal and internal adaptation of class II resin composite restorations after thermal and occlusal stressing. *Eur J Oral Sci* 106, 1033-1042 (1998).

Ellakwa, A., Cho, N., Lee, I.B.: The effect of resin matrix composition on the polymerization shrinkage and rheological properties of experimental dental composites. *Dent Mater* 23, 1229-1235 (2007).

Feilzer, A.J., De Gee, A.J., Davidson, C.L.: Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res* 66, 1636-1639 (1987).

Feilzer, A.J., de Gee, A.J., Davidson, C.L.: Relaxation of polymerization contraction shear stress by hygroscopic expansion *J Dent Res* 69, 36-39 (1990 a).

Feilzer, A.J., De Gee, A.J., Davidson, C.L.: Quantitative determination of stress reduction by flow in composite restorations. *Dent Mater* 6, 167-171 (1990 b).

Figueiredo Reis, A., Giannini, M., Ambrosano, G.M.B., Chan, D.C.N.: The effects of filling techniques and a low-viscosity composite liner on bond strength to class II cavities. *J Dent* 31, 59-66 (2003).

Finger, W.J., Ohsawa, M.: Effect of bonding agents on gap formation in dentin cavities. *Oper Dent* 12, 100-104 (1987).

Floyd, C.J.E., Dickens, S.H.: Network structure of Bis-GMA- and UDMA-based resin systems. *Dent Mater* 22, 1143-1149 (2006).

Gale, M.S., Darvell, B.W., Cheung, G.S.: Three-dimensional reconstruction of microleakage pattern using a sequential grinding technique. *J Dent* 22, 370-375 (1994).

Giachetti, L., Scaminaci Russo, D., Bambi, C., Grandini, R.: A review of polymerization shrinkage stress: current techniques for posterior direct resin restorations. *J Contemp Dent Pract* 7, 79-88 (2006).

Glockner K, Reich ME, Kos S, Keil C, Ebeleseder K, Städtler P: Randadaptation von verschiedenen zahnfarbenen Klasse-II-Restaurationen Eine In-vitro-Studie mit 10 verschiedenen Materialien *Dtsch Zahnärztl Z* 53, 775-780 (1998).

Gwinnett, J.A., Tay, F.R., Pang, K.M., Wei, S.H.: Comparison of three methods of critical evaluation of microleakage along restorative interfaces. *J Prosthet Dent* 74, 575-585 (1995).

Haller B, Hofmann N, Klaiber B, Pfannkuch A: Beständigkeit des Komposit-Dentinverbundes bei künstlicher Alterung *Dtsch Zahnärztl Z* 48, 100-104 (1993).

Hansen, E.K.: Effect of Scotchbond dependent on cavity cleaning, cavity diameter and cavosurface angle. *Scand J Dent Res* 92, 141-147 (1984).

Hansen, E.K.: Effect of three dentin adhesives on marginal adaptation of two light-cured composites. *Scand J Dent Res* 94, 82-86 (1986 a).

Hansen, E.K.: Effect of cavity depth and application technique on marginal adaptation of resins in dentin cavities. *J Dent Res* 65, 1319-1321 (1986 b).

Hugo B, Stassinakis A, Hotz P, Klaiber B: Reproduzierbare Präparation standardisierter Klasse-II-Kavitäten *Dtsch Zahnärztl Z* 51, 746-750 (1996).

Idriss, S., Abduljabbar, T., Habib, C., Omar, R.: Factors associated with microleakage in Class II resin composite restorations. *Oper Dent* 32, 60-66 (2007).

Ilie, N., Kunzelmann, K., Hickel, R.: Evaluation of micro-tensile bond strengths of composite materials in comparison to their polymerization shrinkage. *Dent Mater* 22, 593-601 (2006).

Jones, J.C., Grieve, A.R., Harrington, E.: A machine for thermal cycling in the investigation of marginal leakage. Its development and use. *Br Dent J* 146, 207-211 (1979).

Kahler, B., Kotousov, A., Borkowski, K.: Effect of material properties on stresses at the restoration-dentin interface of composite restorations during polymerization. *Dent Mater* 22, 942-947 (2006).

Kanca, J.3.: Microleakage of five dentin bonding systems. *Dent Mater* 5, 415-416 (1989).

Kiremitçi, A., Yalçın, F., Gökalp, S.: Bonding to enamel and dentin using self-etching adhesive systems. *Quintessence Int* 35, 367-370 (2004).

Klaff, D.: Blending incremental and stratified layering techniques to produce an esthetic posterior composite resin restoration with a predictable prognosis. *J Esthet Restor Dent* 13, 101-113 (2001).

Kleverlaan, C.J., Feilzer, A.J.: Polymerization shrinkage and contraction stress of dental resin composites. *Dent Mater* 21, 1150-1157 (2005).

Koyuturk, A.E., Akca, T., Yucel, A.C., Yesilyurt, C.: Effect of thermal cycling on microleakage of a fissure sealant polymerized with different light sources. *Dent Mater J* 25, 713-718 (2006).

Krejci, I., Kuster, M., Lutz, F.: Influence of dentinal fluid and stress on marginal adaptation of resin composites. *J Dent Res* 72, 490-494 (1993).

Krejci, I., Lutz, F.: Marginal adaptation of Class V restorations using different restorative techniques. *J Dent* 19, 24-32 (1991).

Kullmann, W.: Sorption and solution in autopolymerizing and light-cured composite materials. *Dtsch Zahnärztl Z* 45, 286-288 (1990).

Labella, R., Lambrechts, P., Van Meerbeek, B., Vanherle, G.: Polymerization shrinkage and elasticity of flowable composites and filled adhesives. *Dent Mater* 15, 128-137 (1999).

Lai, J.H., Johnson, A.E.: Measuring polymerization shrinkage of photo-activated restorative materials by a water-filled dilatometer. *Dent Mater* 9, 139-143 (1993).

Liebenberg, W.H.: Successive cusp build-up: an improved placement technique for posterior direct resin restorations. *J Can Dent Assoc* 62, 501-507 (1996).

Loguercio, A.D., Reis, A., Ballester, R.Y.: Polymerization shrinkage: effects of constraint and filling technique in composite restorations. *Dent Mater* 20, 236-243 (2004).

Lutz, E., Krejci, I., Oldenburg, T.R.: Elimination of polymerization stresses at the margins of posterior composite resin restorations: a new restorative technique. *Quintessence Int* 17, 777-784 (1986).

Lutz, F., Krejci, I., Barbakow, F.: The importance of proximal curing in posterior composite resin restorations. *Quintessence Int* 23, 605-607 (1992).

Lutz, F., Krejci, I., Luescher, B., Oldenburg, T.R.: Improved proximal margin adaptation of Class II composite resin restorations by use of light-reflecting wedges. *Quintessence Int* 17, 659-664 (1986).

Marinelli, S., Eichmiller, F.: Comparing three dimensional vs. two dimensional evaluation of microleakage in composite restorations *J Dent Res* 72, 197 (1993).

Masouras, K., Silikas, N., Watts, D.C.: Correlation of filler content and elastic properties of resin-composites. *Dent Mater* 24, 932-9 (2008).

McCulloch, A.J., Smith, B.G.: In vitro studies of cuspal movement produced by adhesive restorative materials. *Br Dent J* 161, 405-409 (1986).

Mehl A, Hartl S, Kunzelmann K-H, Hickel R: Quantitative und qualitative Randspaltanalyse zervikaler Füllungen *Dtsch Zahnärztl Z* 49, 815-818 (1994).

Meredith, N., Setchell, D.J.: In vitro measurement of cuspal strain and displacement in composite restored teeth. *J Dent* 25, 331-337 (1997).

Momoi, Y., McCabe, J.F.: Hygroscopic expansion of resin based composites during 6 months of water storage. *Br Dent J* 176, 91-96 (1994).

Moreira da Silva, E., dos Santos, G.O., Guimarães, J.G.A., Barcellos, A.D.A.L., Sampaio, E.M.: The influence of C-factor, flexural modulus and viscous flow on gap formation in resin composite restorations. *Oper Dent* 32, 356-362 (2007).

Munksgaard, E.C., Hansen, E.K., Kato, H.: Wall-to-wall polymerization contraction of composite resins versus filler content. *Scand J Dent Res* 95, 526-531 (1987).

Nikolaenko, S.A., Lohbauer, U., Roggendorf, M., Petschelt, A., Dasch, W., Frankenberger, R.: Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin. *Dent Mater* 20, 579-585 (2004).

Oman, C.R., Applebaum, E.: Ultrasonic cavity preparation. II. Progress report. *J Am Dent Assoc* 50, 414-417 (1955).

Pashley, D.H.: Clinical considerations of microleakage. *J Endod* 16, 70-77 (1990).

Pashley, D.H., Pashley, E.L.: Dentin permeability and restorative dentistry: a status report for the American Journal of Dentistry. *Am J Dent* 4, 5-9 (1991).

Patel, M.P., Braden, M., Davy, K.W.: Polymerization shrinkage of methacrylate esters. *Biomaterials* 8, 53-56 (1987).

Pazinatto, F.B., Campos, B.B., Costa, L.C., Atta, M.T.: Effect of the number of thermocycles on microleakage of resin composite restorations. *Pesqui Odontol Bras* 17, 337-341 (2003).

Perdigão, J.: New developments in dental adhesion. *Dent Clin North Am* 51, 333-57, viii (2007).

Prati, C., Tao, L., Simpson, M., Pashley, D.H.: Permeability and microleakage of Class II resin composite restorations. *J Dent* 22, 49-56 (1994).

Qvist, V., Qvist, J.: Replica patterns on composite restorations performed in vitro with different acid-etch procedures and dentin adhesives. *Scand J Dent Res* 95, 87-93 (1987).

Retief, D.H.: Do adhesives prevent microleakage? *Int Dent J* 44, 19-26 (1994).

Ritter, R.G.: Conservative tooth-colored restorations for the 21st century. *Dent Today* 17, 50-2, 54-5 (1998).

Rossomando, K.J., Wendt, S.L.J.: Thermocycling and dwell times in microleakage evaluation for bonded restorations. *Dent Mater* 11, 47-51 (1995).

Roulet, J.F.: A materials scientist's view: assessment of wear and marginal integrity. *Quintessence Int* 18, 543-552 (1987).

Roulet, J.F., Reich, T., Blunck, U., Noack, M.: Quantitative margin analysis in the scanning electron microscope. *Scanning Microsc* 3, 147-58, discussion 158-9 (1989).

Ruyter, I.E., Oysaed, H.: Composites for use in posterior teeth: composition and conversion. *J Biomed Mater Res* 21, 11-23 (1987).

Sakaguchi, R.L., Peters, M.C., Nelson, S.R., Douglas, W.H., Poort, H.W.: Effects of polymerization contraction in composite restorations. *J Dent* 20, 178-182 (1992).

Segura, A., Donly, K.J.: In vitro posterior composite polymerization recovery following hygroscopic expansion. *J Oral Rehabil* 20, 495-499 (1993).

Silikas, N., Eliades, G., Watts, D.C.: Light intensity effects on resin-composite degree of conversion and shrinkage strain. *Dent Mater* 16, 292-296 (2000).

Söderholm, K.J.: Correlation of in vivo and in vitro performance of adhesive restorative materials: a report of the ASC MD156 Task Group on Test Methods for the Adhesion of Restorative Materials. *Dent Mater* 7, 74-83 (1991).

St Georges, A.J., Wilder, A.D.J., Perdigão, J., Swift, E.J.J.: Microleakage of Class V composites using different placement and curing techniques: an in vitro study. *Am J Dent* 15, 244-247 (2002).

Strassler, H.E.: Applications of total-etch adhesive bonding. *Compend Contin Educ Dent* 24, 427-30, 432, 434-6 passim, quiz 441 (2003).

Suliman, A.A., Boyer, D.B., Lakes, R.S.: Cusp movement in premolars resulting from composite polymerization shrinkage. *Dent Mater* 9, 6-10 (1993).

Suliman, A.H., Boyer, D.B., Lakes, R.S.: Polymerization shrinkage of composite resins: comparison with tooth deformation. *J Prosthet Dent* 71, 7-12 (1994).

Swift, E.J.J.: Bonding systems for restorative materials--a comprehensive review. *Pediatr Dent* 20, 80-84 (1998).

Swift, E.J.J.: Dentin bonding: what is the state of the art? *Compend Contin Educ Dent* 22, 4-7, quiz 18 (2001).

Tjan, A.H., Bergh, B.H., Lidner, C.: Effect of various incremental techniques on the marginal adaptation of class II composite resin restorations. *J Prosthet Dent* 67, 62-66 (1992).

Torstenson, B., Brännström, M.: Contraction gap under composite resin restorations: effect of hygroscopic expansion and thermal stress. *Oper Dent* 13, 24-31 (1988).

Torstenson, B., Oden, A.: Effects of bonding agent types and incremental techniques on minimizing contraction gaps around resin composites. *Dent Mater* 5, 218-223 (1989).

Venhoven, B.A., de Gee, A.J., Davidson, C.L.: Polymerization contraction and conversion of light-curing BisGMA-based methacrylate resins. *Biomaterials* 14, 871-875 (1993).

Versluis, A., Douglas, W.H., Cross, M., Sakaguchi, R.L.: Does an incremental filling technique reduce polymerization shrinkage stresses? *J Dent Res* 75, 871-878 (1996).

Watts, D.C., Satterthwaite, J.D.: Axial shrinkage-stress depends upon both C-factor and composite mass. *Dent Mater* 24, 1-8 (2008).

Weaver, W.S., Blank, L.W., Pelleu, G.B.J.: A visible-light-activated resin cured through tooth structure. *Gen Dent* 36, 236-237 (1988).

Wendt, S.L., McInnes, P.M., Dickinson, G.L.: The effect of thermocycling in microleakage analysis. *Dent Mater* 8, 181-184 (1992).

Willems, G., Lambrechts, P., Braem, M., Vanherle, G.: Composite resins in the 21st century. *Quintessence Int* 24, 641-658 (1993).

Wilson, N.H., Wilson, M.A., Offell, D.G., Smith, G.A.: Performance of occlusin in butt-joint and bevel-edged preparations: five-year results. *Dent Mater* 7, 92-98 (1991).

Winkler, M.M., Katona, T.R., Paydar, N.H.: Finite element stress analysis of three filling techniques for class V light-cured composite restorations. *J Dent Res* 75, 1477-1483 (1996).

Yamazaki, P.C.V., Bedran-Russo, A.K.B., Pereira, P.N.R., Wsift, E.J.J.: Microleakage evaluation of a new low-shrinkage composite restorative material. *Oper Dent* 31, 670-676 (2006).

Yap, A.U., Ho, K.S., Wong, K.M.: Comparison of marginal sealing ability of new generation bonding systems. *J Oral Rehabil* 25, 666-671 (1998).

7 Anhang

7.1 Materialverzeichnis

Auflichtmikroskop	Tessovar Zeiss Deutschland 73447 Oberkochen
Autopolymerisat	Paladur transparent Heraeus Kulzer GmbH 63450 Hanau
Dentinadhäsiv-System	OptiBond FL Primer: Chargen-Nr.: 400350 Adhäsiv: Chargen-Nr.: 401995 Kerr GmbH 76158 Karlsruhe
Diamantschleifer	#806314835KR012; #806314835KREF012 Komet Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG 32675 Lemgo
Einmal-Applikator	Kerr Applikator Tip Kerr GmbH 76158 Karlsruhe
Epoxidharz	Araldit Ciba-Geigy 4002 Basel -CH

Graphitkleber	Leit-C Conductive Carbon Cement Neubauer Chemikalien 65393 Walluf
Gummipolierer	rot: #9608204030; grün:#9618204030 Komet Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, 32675 Lemgo
Holzkeile	Sycamore Interdental Wedges Hawe-Neos-Dental Dr. Weissenfluh AG 6925 Gentilino - CH
Kältebad	UKT 600 Lauda 97922 Lauda-Königshofen
Kochsalzlösung	Isotone Kochsalzlösung 0,9% Fresenius AG 61343 Bad Homburg
Komposit	Tetric Ceram, Chargen-Nr.: F09962 Ivoclar Vivadent GmbH 73479 Ellwangen Grandio, Chargen-Nr.: 411433 VOCO GmbH 27457 Cuxhaven

Kunststoffzähne	Frasaco-Zähne Franz Sachs & Co GmbH 88069 Tettnang
Mikroskopkamera	digital PDMC-2 Polaroid Corporation Waltham, MA 02451, USA
Phosphorsäuregel	Ultra-Etch Ultradent Products Inc. South Jordan, UT 84095 USA
Polymerisationsgeräte	Translux CL Heraeus Kulzer 63450 Hanau
Rasterelektronenmikroskop	DSM 940 Zeiss Deutschland 73447 Oberkochen
Röntgenfilmentwickler	Periomat Intra Dürr Dental AG 74321 Bietigheim-Bissingen
Segmentmatrizen	HaweAdapt SectionalMatix Kerr GmbH 76158 Karlsruhe

Silikonabformmasse	President Light Body Coltène AG 9450 Altstätten - CH
Sputtergerät	K 550 Emitech GmbH 65232 Taunusstein
Trennscheibe	WOCO 93/6 Conrad GmbH 38678 Clausthal Zellerfeld
Trennschleifmaschine	WOCO 50/Med Conrad GmbH 38678 Clausthal Zellerfeld
Ultraschall-Präparationssystem	Airscaler Sonicflex 2000N; Formpräparationsinstrument Größe 4 KaVo Vertriebsgesellschaft mbH 88396 Biberach
Wärmebad	MT Lauda 97922 Lauda-Königshofen
Wärmeschrank	Memmert 91126 Schwabach
Winkelstücke	KaVo Vertriebsgesellschaft mbH 88396 Biberach

Danksagung

Herrn Prof. Dr. med. dent. Bernd Klaiber danke ich für die freundliche Überlassung des Themas und die Übernahme des Referates.

Herrn Priv.-Doz. Dr. rer. nat. Uwe Gbureck danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Priv.-Doz. Dr. med. dent. Norbert Hofmann für seine intensive Betreuung der gesamten Arbeit. Ohne seine Fachkenntnis und seine Unterstützung während der statistischen Auswertung wäre die Arbeit in dieser Form nicht möglich gewesen. Des weiteren bedanke ich mich für die freundliche Genehmigung zum Abdrucken der Abbildungen 1 bis 4.

Ich bedanke mich herzlich bei meiner Frau und meiner Familie für die Motivation, Unterstützung und das entgegengebrachte Verständnis während der gesamten Promotionszeit.

Lebenslauf

ANGABEN ZUR PERSON

Name: Christian Markus Helmut Zentgraf
Geburtstag: 22. Juni 1979
Geburtsort: Fulda
Familienstand: verheiratet
Nationalität: deutsch

SCHUL- UND BERUFSAUSBILDUNG

seit 2008 Angestellter Zahnarzt bei ZA Stephan Hahne, Werneck
2007-2008 Assistenz Zahnarzt bei ZA Stephan Hahne, Werneck
2006-2007 Assistenz Zahnarzt bei Dr. Hans-J. Mayer, Veitshöchheim
2005 Staatsexamen der Zahnmedizin und Approbation als Zahnarzt
2000-2005 Studium der Zahnmedizin, Julius-Maximilians-Universität, Würzburg
1999 Abitur an der Rabanus-Maurus Schule (Domgymnasium), Fulda
1990-1999 Rabanus-Maurus Schule (Domgymnasium), Fulda
1986-1990 Johannes-Hack Grundschule, Petersberg

