

Aus der Klinik für Zahnerhaltung, Parodontologie und Präventive Zahnheilkunde  
(Direktor: Prof. M. Hannig)  
Kliniken für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
der Medizinischen Fakultät der Universität des Saarlandes Homburg / Saar

**Untersuchung des Randschlussverhaltens von Füllungen  
aus Kompositmaterialien in approximal dentinbegrenzten  
Klasse-II-Kavitäten**

Eine *In-vitro*-Studie

***Dissertation zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnheilkunde***  
**der Medizinischen Fakultät**  
der UNIVERSITÄT DES SAARLANDES  
2006

vorgelegt von: Zahnärztin Andrea Gärtner  
geboren am: 6. Mai 1971 in Berlin

Dekan Prof. Dr. M. Montenarh

1. Gutachter Prof. Dr. M. Hannig

2. Gutachter Prof. Dr. P. Pospiech

Jahr der Promotion 2006

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>LITERATURÜBERSICHT.....</b>	<b>4</b>
2.1	STRUKTURELLER AUFBAU DER KOMPOSITE .....	4
2.2	EINTEILUNG DER KOMPOSITE NACH STOFFKLASSEN .....	5
2.2.1	<i>Einteilung nach Füllkörpergröße (LUTZ und PHILLIPS 1983) .....</i>	5
2.2.2	<i>Einteilung nach dem Füllgrad (WILLEMS et al. 1992) .....</i>	7
2.2.3	<i>Einteilung nach dem Monomersystem in der organischen Matrix (FERRACANE 1999) .....</i>	8
2.3	STRUKTURELLER AUFBAU DER DENTINADHÄSIVE UND IHRE VERBUNDMECHANISMEN..	10
2.4	EINTEILUNG DER DENTINHAFTVERMITTLER .....	12
2.4.1	<i>Erste Generation der Dentinhaftvermittler .....</i>	12
2.4.2	<i>Zweite Generation der Dentinhaftvermittler .....</i>	13
2.4.3	<i>Dritte Generation der Dentinhaftvermittler .....</i>	13
2.4.4	<i>Vierte Generation der Dentinhaftvermittler bzw. Typ 1 der Dentinadhäsive .....</i>	16
2.4.5	<i>Fünfte Generation der Dentinhaftvermittler bzw. Typ 2 und 3 der Dentinadhäsive .....</i>	17
2.4.6	<i>Sechste und siebente Generation der Dentinhaftvermittler bzw. Typ 4 der Dentinadhäsive .....</i>	19
2.5	ZAHNFARBENE FÜLLUNGSMATERIALIEN IM TREND – QUO VADIS? .....	20
2.5.1	<i>Die Kompositmaterialien .....</i>	20
2.5.2	<i>Die Dentinadhäsive .....</i>	21
<b>3</b>	<b>VERSUCHSPLANUNG .....</b>	<b>24</b>
3.1	SCHEMA ZUR VERSUCHSPLANUNG .....	24
<b>4</b>	<b>MATERIAL UND METHODE.....</b>	<b>26</b>
4.1	MATERIAL .....	26
4.1.1	<i>Probenmaterial .....</i>	26
4.1.2	<i>Restaurationsmaterialien .....</i>	26
4.1.3	<i>Dentinhaftvermittler .....</i>	27
4.2	METHODE .....	29
4.2.1	<i>Präparation der Zähne .....</i>	29
4.2.2	<i>Legen der Füllungen .....</i>	29
4.2.3	<i>Versuchsaufbau .....</i>	31
4.2.4	<i>Versuchsablauf .....</i>	32
4.2.5	<i>Mechanisch-thermischer Belastungstest der Zähne .....</i>	35
4.2.6	<i>Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen .....</i>	36
4.2.7	<i>Statistische Auswertung .....</i>	37
<b>5</b>	<b>ERGEBNISSE .....</b>	<b>38</b>
5.1	RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE FÜLLUNGSRANDANALYSE.....	38
5.1.1	<i>Randschlussverhalten im Bereich der dentinbegrenzten Restaurationsränder .....</i>	38
5.1.2	<i>Randschlussverhalten im Bereich der approximal schmelzbegrenzten Restaurationsränder .....</i>	52
5.2	STATISTISCHE AUSWERTUNG DER VERSUCHSERGEBNISSE .....	57
5.2.1	<i>Statistische Auswertung der dentinbegrenzten Restaurationsränder .....</i>	57
5.2.2	<i>Statistische Auswertung der approximal schmelzbegrenzten Restaurationsränder .....</i>	60

<b>6</b>	<b>DISKUSSION .....</b>	<b>63</b>
6.1	DISKUSSION VON MATERIAL UND METHODE.....	63
6.1.1	<i>Versuchsaufbau</i> .....	63
6.1.2	<i>Füllungstechnik</i> .....	64
6.1.3	<i>Beurteilung der marginalen Adaptation</i> .....	66
6.2	DISKUSSION DER ERGEBNISSE.....	67
6.2.1	<i>Diskussion der Ergebnisse für die dentinbegrenzten Füllungsrandareale</i> .....	67
6.2.2	<i>Diskussion der Ergebnisse für die schmelzbegrenzten Füllungsrandbereiche</i> .....	74
6.3	SCHLUSSFOLGERUNG.....	79
<b>7</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG.....</b>	<b>81</b>
<b>8</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS .....</b>	<b>82</b>
<b>9</b>	<b>ANHANG .....</b>	<b>100</b>
<b>10</b>	<b>DANKSAGUNG.....</b>	<b>107</b>
<b>11</b>	<b>LEBENS LAUF.....</b>	<b>108</b>

## 1 Einleitung

Obwohl Amalgam nach wie vor zu den dauerhaftesten und sichersten Restaurationsmaterialien zählt und gerade im okklusionstragenden Seitenzahnbereich heute noch das am häufigsten verwendete zahnärztliche Restaurationsmaterial darstellt mit jahrzehntelanger klinischer Bewährung (SCHIELE 1991), ist die Nachfrage nach zahnfarbenen plastischen Restaurationsmaterialien seit Anfang der achtziger Jahre stetig gestiegen. Einerseits bewirken die toxikologischen, allergologischen und ökologischen Nebenwirkungen des Amalgams oft eine Ablehnung des Füllungswerkstoffes (LUSSI et al. 1989, MACKERT 1991, SCHIELE 1991). Andererseits geht der Trend immer mehr hin zur Auswahl ästhetischer Füllungswerkstoffe durch den Patienten. Diese Tatsache hat zur Erforschung neuer bzw. Optimierung schon vorhandener Restaurationsmaterialien geführt (DIETSCHI 1990, HICKEL 1997). Zur Verfügung stehen zum einen zahnfarbene indirekte Inlays aus Keramik oder Komposit, deren aufwendige Herstellung allerdings relativ teuer ist. Zum anderen besteht die Möglichkeit der Versorgung mit direkten plastischen Kompositfüllungsmaterialien, deren Herstellung im Vergleich zu Inlays kostengünstiger ist und mit welchen sich auch gute ästhetische Ergebnisse erzielen lassen. Zudem kann die Kavitätenpräparation zahnhartsubstanzschonend durchgeführt und auf Retentionsformen verzichtet werden.

Das Hauptproblem bei der Verwendung von Kompositfüllungen im Seitenzahnbereich ist deren Neigung zur Randspaltbildung. In zirkulär schmelzbegrenzten Klasse-II-Kavitäten lassen sich unter sorgfältiger Anwendung der Schmelzätz- und Adhäsivtechnik (Kofferdam, Schmelzätzung mit Phosphorsäuregel, absprayen, trocknen, Bonding) fast ganz randspaltfreie Kompositfüllungen legen, die auch unter Belastungsbedingungen ein gutes Randschlussverhalten aufweisen (HALLER 1998, HANNIG et al. 1999, DIETSCHI et al. 1995, HILTON 1999, OPDAM et al. 1998). Dies lässt sich durch zahlreiche In-vitro- und In-vivo-Studien wissenschaftlich belegen. Problematisch bleiben dagegen die Ergebnisse der marginalen Adaptation von Kompositfüllungen in approximal dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten. Trotz Anwendung moderner Dentinadhäsive lassen sich, durch In-vitro- und In-vivo-Studien belegt, nach wie vor keine randspaltfreien Füllungen

erzielen (DA CUNHA MELLO et al. 1997, DIETSCHI 1998, HALLER 1998, HANNIG et al. 1995, MANHART et al. 1999, STIESCH et al. 1997, DIETSCHI 1995, HALLER 1998, HILTON 1999, HILTON 1997, SCHUCKAR 1997). Postoperative Hypersensibilitäten durch Perkolation und Sekundärkaries durch bakterielle Kontamination werden durch diese Randspaltbildung provoziert (HANNIG 2001).

Die Randspaltbildung resultiert hauptsächlich aus der Volumenschrumpfung des Kompositmaterials im Bereich von 2,5 bis 3,5 % während der Polymerisationsreaktion (SOLTESZ 1998). Aber auch Faktoren wie die adhäsive Haftkraft an der Kavitätenwand und damit die Dentinqualität, die Fließeigenschaften des Füllungswerkstoffes, das zu polymerisierende Materialvolumen, die Insertionstechnik und die Kavitätenkonfiguration spielen eine entscheidende Rolle bei der Randspaltbildung (HANNIG und FRIEDRICHS 2001, DAVIDSON et al. 1984, FEILZER et al. 1987, SOLTESZ 1998).

Weitere Fortschritte bei der Reduktion der Randspaltbildung verspricht man sich vor allem von der Entwicklung schrumpfungsreduzierter plastischer Füllungsmaterialien. In diesem Zusammenhang sind verschiedene neue Füllungsmaterialien und Adhäsive in der Entwicklung, unter anderem Kompositmaterialien auf Epoxidharzbasis, zu denen aufgrund der Labortestphase wenige Studien zur marginalen Adaptation in Klasse-II-Kavitäten existieren.

Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, das Randschlussverhalten von Kompositfüllungen aus einem Versuchsmaterial auf Epoxyharzbasis unter Verwendung des systemäquivalenten Adhäsivs in approximal dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten rasterelektronenmikroskopisch zu untersuchen. Als Referenz dienten drei moderne zahnfarbene Füllungsmaterialien mit den systemäquivalenten Adhäsiv- und Bondingmaterialien, die ebenfalls in approximal dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten appliziert und anschließend rasterelektronenmikroskopisch analysiert wurden.

In den sechs Versuchsgruppen kamen drei verschiedene marktübliche und ein in der Labortestphase befindliches Komposit und vier systemäquivalente Dentinhaftvermittler zur Anwendung.

In die Studie einbezogen wurden ein Hybridkomposit, ein Material auf Ormocerbasis und zwei schrumpfungsreduzierte Komposite. Im Mittelpunkt dieser Studie stand

dabei die Untersuchung des Randschlussverhaltens der jeweiligen Materialien und dessen Veränderung nach thermo-mechanischer Belastung. Außerdem wurden die verschiedenen Füllungswerkstoff-/Adhäsivkombinationen hinsichtlich signifikanter Unterschiede im Randschlussverhalten verglichen.

## 2 Literaturübersicht

### 2.1 Struktureller Aufbau der Komposite

Komposite sind einfach übersetzt ganz allgemein zusammengesetzte Werkstoffe. In der Zahnmedizin werden darunter zahnfarbene plastische Füllungswerkstoffe verstanden, die nach Einbringen in eine Kavität chemisch oder durch Energiezufuhr aushärten.

Sie bestehen aus folgenden drei Hauptbestandteilen:

- a) einer organischen Matrix
- b) einer dispersen Phase
- c) einer Verbundphase

Die *Kompositmatrix* besteht vor der Polymerisation vor allem aus Monomeren, aber auch Initiatoren, Stabilisatoren, Farbstoffen, Pigmenten und anderen Zusätzen.

Bei den Monomeren handelt es sich im allgemeinen um multifunktionelle Methacrylate, welche sich zusammensetzen aus einem zentralen organischen Zwischenglied, zum Beispiel einer aliphatischen Kette oder einem aromatischen Ring, und Methacrylsäureesterresten, die an das Zwischenglied angehängt sind. Sie sind für die physikalischen Eigenschaften des Komposits verantwortlich.

Das zentrale Zwischenglied bewirkt die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs wie zum Beispiel den Polymerisationsgrad, die Schrumpfung, die Viskosität und die Wasseraufnahme.

Die *disperse Phase* besteht aus anorganischen Füllerpartikeln und soll die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Kompositmatrix verbessern. So können unter anderem die Verschleißfestigkeit und die Druck- und Zugfestigkeit positiv beeinflusst werden, aber auch Parameter wie die Polymerisationsschrumpfung oder die Wasseraufnahme können zum Teil verringert werden.

Als anorganische Füllstoffe finden Quarz, Keramik und Siliziumdioxid Verwendung.

Die *Verbundphase* enthält Silane und Kopolymere. Sie sorgen für den chemischen Verbund zwischen der organischen Matrix und den Füllkörpern durch deren Silanisierung. Dadurch können die Biege- und Druckfestigkeit des Materials deutlich erhöht werden. Allerdings kann dieser chemische Verbund durch saure Hydrolyse gelöst werden und somit einen höheren Materialverschleiß durch Füllkörperverlust bewirken.

## **2.2 Einteilung der Komposite nach Stoffklassen**

Grundsätzlich kann man Komposite nach Füllkörpergröße, Füllgrad und Monomersystem strukturieren.

### **2.2.1 Einteilung nach Füllkörpergröße (LUTZ und PHILLIPS 1983)**

#### **Makrofüllerkomposite**

Makrofüllerkomposite bestehen aus Quarz, Glas oder Keramik. Es handelt sich um rein anorganische splitterförmige Partikel. Der Füllkörpergehalt liegt bei 70 -80 Gew.%. Die durchschnittliche Füllkörpergröße liegt zwischen 5 und 10  $\mu\text{m}$ . Der sehr große Härteunterschied von Füllkörpern und Matrix führt leicht zum Herausbrechen der oberflächlichen Füllkörperpartikel, wenn die Matrix zwischen benachbarten Füllkörpern abradert wurde. Aufgrund der Größe der Füllkörper kommt es zu Oberflächenrauigkeit, verstärktem Abrieb des Füllungsmaterials und schlechtem Politurverhalten.

Aus diesem Grund (Abrasion und Politureigenschaft) war man bemüht, Füllungskomposite mit kleinerer Korngröße zu entwickeln.

#### **Mikrofüllerkomposite**

Homogene Mikrofüllerkomposite enthalten kugelförmige Partikel aus Kieselsäuren (Siliziumdioxid), deren Größe unter 1  $\mu\text{m}$  liegt. Mit Hilfe der flammenpyrolytischen Herstellung entstehen sogar winzig kleine Füllkörper von 10 - 100 nm, die nicht mehr aus dem Fügeverbund herausbrechen und eine optimale Politur des Kompositmaterials gewährleisten. Durch einen allerdings recht niedrigen Füllgrad

ergibt sich eine im Vergleich zu den Makrofüllern eine deutlich höhere Polymerisationsschrumpfung.

Um die Polymerisationsschrumpfung zu verringern wurden dem homogenen Mikrofüllerkomposit splitterförmige Vorpolymerisate oder gesinterte Siliziumdioxidteilchen beigefügt. Es entstand das sogenannte inhomogene Mikrofüllerkomposit oder „Mikrofüllerkomplexkomposit“, dessen Füllkörpergehalt somit von 50 auf 70 -80 Gew. % gesteigert werden konnte, was außerdem die mechanischen Eigenschaften verbesserte. Die Polymerisationsschrumpfung konnte unter Erhalt der guten Polierbarkeit reduziert werden und durch die recht hohe Eigenelastizität des Materials sind Mikrofüllerkomposite für den Zahnhalsbereich sehr gut geeignet. Es kann allerdings an den Grenzflächen der splitterförmigen Vorpolymerisate zur Matrix während Kaubelastung oder Polymerisation zu Rissen kommen.

Im nächsten Entwicklungsschritt wollte man die guten physikalischen Eigenschaften der „Makro“-Füllkörper mit der guten Politurfähigkeit der „Mikro“-Füllkörper verbinden.

### **Hybridkomposite**

Bei den Hybridkompositen besteht die disperse Phase zu 85 -90 Gew.% aus Makrofüllkörpern und zu 10 -15 Gew.% aus Mikrofüllkörpern. Der Füllkörpergehalt des Materials lässt sich damit insgesamt auf bis zu 85% steigern und führt somit zu noch besseren physikalischen und mechanischen Eigenschaften wie guter Abriebfestigkeit, Volumenbeständigkeit, Ästhetik und Verarbeitbarkeit. Die Füllkörpergröße liegt unter 10 µm und verringert sich bei immer weiter entwickelten Materialien wie den Feinpartikel-Hybridkompositen mit einer mittleren Partikelgröße von unter 5 µm über Feinstpartikel-Hybridkomposite mit einer mittleren Partikelgröße von unter 3 µm bis hin zu den Submikrometer-Hybridkompositen mit einer mittleren Partikelgröße von unter 1 µm Durchmesser.

Heute lassen sich die Hybridkomposite als sogenannte Universalkomposite für plastische Restaurationen der Klassen I, II, III, IV und V routinemäßig verwenden.

### **Nanofüllerkomposite**

Diese neu vorgestellte Komposit-Klasse enthält Füllkörperpartikel in einer Größe zwischen 20 und 75 nm und kann damit eigentlich zu den Mikrofüllerkompositen gezählt werden.

Sie nimmt allerdings doch eine Sonderstellung zwischen Mikrofüller- und Hybridkompositen ein: Die sogenannten Nanomere sind in das Komposit eingebaute freie Mikrofüller, durch die der Füllkörpergehalt eines konventionellen Mikrofüllerkomposits deutlich erhöht werden kann, vergleichbar mit dem eines Hybridkomposits. Zusätzlich sind ein Teil dieser Nanomere zu sogenannten Nanoclustern verbunden, die durch ihre Oberflächenstruktur einen Hochglanzeffekt der Füllung bewirken. Durch den hohen Füllkörpergehalt und die nur nanometerweise Abtragung des Materials durch Abrasion oder Politur vereint diese Kompositklasse die mechanische Stabilität der Hybridkomposite mit der Ästhetik der Mikrofüllerkomposite.

#### **2.2.2 Einteilung nach dem Füllgrad (WILLEMS et al. 1992)**

Durch geringe Variationen der Füllkörpermenge oder –größe kann die Viskosität eines Komposites stark beeinflusst werden; Komposite werden somit fließfähig oder stopfbar.

### **Niedrigvisköse Komposite**

Diese fließfähigeren Derivate der konventionellen Hybridkomposite zeichnen sich durch ein sehr niedriges Elastizitätsmodul aus. Sie können Zahndeformationen durch okklusale Belastungen elastisch kompensieren. Daher eignen sie sich zum Beispiel hervorragend für minimalinvasive Restaurationen, erweiterte Fissurenversiegelungen oder als Vorlage für schlecht zugängliche Kavitätenareale, da sie gleichzeitig auch die Zahnoberfläche sehr gut benetzen.

Außerdem eignen sich diese Materialien dank ihres geringen Elastizitätsmoduls auch als Zwischenschicht zwischen Dentinadhäsiven und Kompositfüllungen (Bonding). Durch ihre sogenannte „stress breaker“-Funktion sollen Polymerisationsspannungen des Füllungskomposites elastisch ausgeglichen werden.

### **Hochvisköse Komposite**

Hochvisköse Komposite sind durch ihren wesentlich höheren Fülleranteil sehr viel verschleißresistenter und schrumpfungärmer. Sie eignen sich sehr für Füllungen mit Approximalkontaktgestaltung, also Klasse I- und II-Kavitäten.

### **Schrumpfreduzierte Komposite**

Es gibt auf dem Markt recht neu befindliche schrumpfreduzierte Komposite, die eine Schrumpfreduktion durch den Verzicht auf kurzkettige Moleküle, die einen hohen Anteil der Polymerisationsschrumpfung verursachen, bewirken oder auch Materialien, die auf dem Prinzip der Erhöhung des Füllkörpervolumens durch Hinzufügung von Vorpolymerisaten oder Nanofüllkörpern beruhen. Somit ist es gelungen, die Polymerisationsschrumpfkraft im Vergleich zu konventionellen Hybridkompositen um etwa ein Viertel zu senken.

Ein weiterer Anlauf in der Entwicklung schrumpfreduzierter Materialien besteht in der Neuentwicklung von Monomersystemen, welche über eine Ringöffnung eine Volumenkontraktion ausgleichen, wie zum Beispiel ringöffnende Epoxide. Da diese Materialien allerdings nicht mit den konventionellen Adhäsivsystemen kompatibel sind, müssen zusätzlich neue Bondingmaterialien entwickelt werden.

Oxirane sind durch ihre geringe Schrumpfreduktion von unter 1 % und durch ihre toxikologische Bedenklichkeit ins Hintertreffen geraten. Viel interessanter dagegen sind die Silorane, für die eine Polymerisationsschrumpfkraft von nur etwa der Hälfte eines konventionellen Hybridkomposites nachgewiesen werden konnte.

### **2.2.3 Einteilung nach dem Monomersystem in der organischen Matrix (FERRACANE 1999)**

Die Einteilung orientiert sich an den funktionellen Gruppen, die im Wesentlichen an der Polymerisation beteiligt sind.

#### **Reine Methacrylate**

Zu ihnen gehören die Monomere mit klassischer Dentalmatrix, zum Beispiel Bis-GMA, UDMA, TEGDMA (z.B. Tetric Ceram / Ivoclar Vivadent, Filtek Z250 / 3M Espe) und die klassischen Ormocere (z.B. Definite / Degussa).

Durch den Verzicht auf kurzkettige Moleküle kann eine Schrumpfreduktion des Kompositmaterials bewirkt werden.

### **Säuremodifizierte Methacrylate**

Sie lassen sich einteilen in Dentalmatrices mit hydrophileren Monomerbestandteilen wie zum Beispiel bei den Kompomeren (z.B. Compoglass / Ivoclar Vivadent, Dyract / Dentsply) und in Ormocere mit Carboxylfunktionen (z.B. Admira / Voco).

### **Ringöffnende Epoxide**

Es handelt sich hierbei um Monomere mit sehr geringer Schrumpfung und hoher Festigkeit, sogenannte Oxirane bzw. Silorane (Siloxane mit Oxiran-Funktion); sie sind allerdings noch nicht kommerziell verfügbar.

## 2.3 Struktureller Aufbau der Dentinadhäsive und ihre Verbundmechanismen

Aufgrund ihrer materialkundlichen Eigenschaften verbinden sich Komposite nicht ohne weiteres mit Zahnhartsubstanzen. Ihre Hydrophobie macht es unmöglich, sich mit dem hydrophilen Dentin zu verbinden. Hinzu kommen ein ungünstiger Wärmeausdehnungskoeffizient und die Polymerisationsschrumpfung, welche nach Photopolymerisation zu Spaltbildung führen würde und somit die Entstehung von Sekundärkaries zur Folge hätte.

Durch die Konzeption einer adhäsiven Verankerung der Komposite an den Zahnhartsubstanzen mit Hilfe von Adhäsivsystemen konnte die Polymerisationsschrumpfung so gut kompensiert werden, dass prinzipiell dichte und klinisch akzeptable Restaurationen hergestellt werden können.

Dentinhaftvermittler können eine chemische Bindung zu den organischen und anorganischen Bestandteilen des Dentins einerseits und zum Komposit andererseits schaffen, indem sie aus folgenden Komponenten zusammengesetzt sind: sie bestehen aus einer Methacrylatgruppe, die die Verbindung zum hydrophoben Komposit ermöglicht, einem Distanzhalter und einer funktionellen Gruppe, die mit dem hydrophilen Dentin reagieren soll.

Den Grundstein jeglicher Adhäsion in der zahnmedizinischen Füllungstherapie legte BUONOCORE (1955) mit der Einführung der Schmelz-Ätz-Technik. Das Prinzip der Schmelzätzung ist heute noch klinisch relevant. Durch die unterschiedliche Säurelöslichkeit der Schmelzprismen im Zentrum und in der Peripherie entsteht ein Ätzmuster, das zu einer innigen Verzahnung von Komposit und Zahnhartsubstanz führt.

Dabei wurde zunächst das Dentin mit einem Unterfüllungsmaterial abgedeckt, um postoperative Hypersensivitäten zu vermeiden. Die mikroretentive Verankerung der Füllung war also auf die Schmelzränder begrenzt.

Der adhäsive Verbund im Dentinbereich gestaltet sich durch die tubuläre Struktur des Dentins, den in den Tubuli enthaltenen Dentinliquor und den höheren Gehalt an organischem Material erheblich schwieriger.

Dentinhaftvermittler werden konventionell nach Generationen klassifiziert, mit der Entwicklung modernerer Adhäsivsysteme heutzutage jedoch üblicherweise nach der Anzahl an Arbeitsschritten und der Art der Interaktion des Adhäsivs mit dem Dentin.

## 2.4 Einteilung der Dentinhaftvermittler

Die Dentinhaftvermittler werden konventionell nach Generationen, Anzahl der klinischen Arbeitsschritte und Art der Interaktion mit dem Dentin als neuerer Typisierung eingeteilt.

### 2.4.1 Erste Generation der Dentinhaftvermittler

Die Entwicklung begann 1951 mit der Patentierung des ersten Dentinhaftvermittlers durch Hagger. Es handelte sich um ein einfaches Dimethacrylat, das nach Entfernung der Schmierschicht ohne Dentinvorbehandlung auf die Zahnhartsubstanz aufgetragen wurde (HAGGER 1951). Der Haftverbund war jedoch klinisch nicht ausreichend.

Später stellten BUONOCORE et al. (1956) ein weiterentwickeltes Produkt auf Methacrylatbasis vor, das mit einem Primersystem aus Glucophosphorsäure verwendet wurde. Es erlangte allerdings keine klinische Bedeutung durch die bei Wasserzutritt zu geringen Haftwerte (RETIEF 1991).

MASHUHARA et al. (1962) gelang durch die Kombination eines Methylmethacrylats mit dem Tri-n-Butylboran die Haftung des Materials am Dentin (MASHUHARA et al. 1964). Der Verbund erfolgte dabei über das Kollagen des Dentins (MASHUHARA 1969).

BOWEN (1965) konnte die Bindung zur Dentinoberfläche weiter verbessern; der Dentinhaftvermittler verlor jedoch nach kurzer Lagerzeit seine Wirkung. Auch eine Weiterentwicklung unter dem Namen Orthomite II S, Morita, Osaka, Japan erbrachte nicht die erhofften klinischen Ergebnisse (NAKABAYASHI und MASHUHARA 1978).

Ende der siebziger Jahre konnte dann das erste Produkt mit dem Namen Orthomite Super Bond/Sun-Medical, Kyoto, Japan als Weiterentwicklung des Produkts mit dem Markennamen Clearfil bonding agent, Kuraray, Osaka, Japan dank der guten klinischen Untersuchungsergebnisse auf dem Markt eingeführt werden (MASHUHARA 1982, NAKABAYASHI et al. 1992).

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Clearfil bonding agent (Kuraray, Osaka, J)
- Orthomite Super Bond (Sun-Medical, Kyoto, J)

### 2.4.2 Zweite Generation der Dentinhaftvermittler

Anfang der achtziger Jahre wurden Substanzen auf Methacrylat-Phosphatesterbasis, wie Bis-GMA oder HEMA entwickelt, die eine Bindung zu den Kalziumionen des Hydroxylapatits eingehen sollten (CAUSTON 1984). Sie wurden an die auf dem Dentin befindliche Schmierschicht angekoppelt, jedoch weiterhin ohne Vorbehandlung des Dentins. Trotz guter Infiltration der Schmierschicht wurde der Haftverbund jedoch durch eine zu geringe Haftung der Schmierschicht auf dem darunterliegenden Dentin limitiert und durch hydrolytische Zersetzungsprozesse in der nicht eliminierten Schmierschicht zu stark beeinträchtigt, um den Polymerisationsschrumpfungen des Komposits standhalten zu können (DAVIDSON et al. 1984, MUNKSGAARD et al. 1985). Die Haftvermittler konnten also keine direkte Bindung zum Dentin eingehen, sondern ihre Haftkraft war von rein kohäsiven Kräften der Schmierschicht am Dentin abhängig (TAO et al. 1988, YU et al. 1991). Es bestanden jedoch vergleichsweise höhere Haftwerte, eine verbesserte Benetzbarkeit und eine hydrophilere Natur der Materialien gegenüber der ersten Generation (EICK et al. 1992).

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Prisma Universal Bond (De Trey Dentsply)
- Dentin Adhesit (Vivadent)
- Scotchbond TM DC bzw. LC (3M Espe)

### 2.4.3 Dritte Generation der Dentinhaftvermittler

Es gelingt der eigentliche Durchbruch zum klinischen Erfolg. Die Produkte dieser Generation bestehen aus mehreren Komponenten, so dass man von Dentinhaftvermittlersystemen spricht.

Ein System besteht meistens aus einem Primer, einem Adhäsiv und einem Bonding, wobei der Schmelzrand der Kavität konventionell mit 30-40%-iger Phosphorsäure geätzt wird.

Das Dentin wird nun erstmals vorbehandelt und die Schmierschicht, je nach Produkt des Herstellers, entweder *erhalten*, *vollständig entfernt* oder *modifiziert* (VAN MEERBEEK et al. 1992).

### **Erhalt der Schmierschicht**

Bei Erhaltung der Schmierschicht wird die Dentinoberfläche mit einer dünnflüssigen Lösung aus hydrophilen Monomeren vorbehandelt. Diese sogenannten Primer infiltrieren in die Schmierschicht und verstärken diese nach ihrer Aushärtung ohne sie zu konditionieren.

Diese Verfilzung der Schmierschicht mit dem Primer wird auch als Entanglement bezeichnet (VAN MEERBEEK et al. 1992).

Vertreter dieser Gruppe sind:

- XR Bonding System (Sybron/Kerr, Karlsruhe, D)
- Probond (Sybron/Kerr, Karlsruhe, D)
- Prisma Universalbond 3 (De Trey Dentsply, Konstanz, D)

### **Modifikation der Schmierschicht**

Bei diesem Verbundmechanismus werden die Schmierschicht und das Dentin oberflächlich konditioniert mit sogenannten selbstätzenden oder selbstkonditionierenden Primern. Diesen Primern sind schwache organische Säuren, zum Beispiel Maleinsäure, zugesetzt, die die Schmierschicht auflösen und das Dentin oberflächlich demineralisieren. Es kommt zur Eröffnung der Dentintubuli und zur Freilegung von intertubulärem Kollagen. Während sich die Schmierschicht in Lösung befindet, penetrieren die hydrophilen Monomere des Primers in die Dentinkanälchen und bilden Retentionszapfen, sogenannte „tags“. Durch Trocknung der mit Primer benetzten Dentinoberfläche verdunstet dessen Lösungsmittel, bei dem es sich um Wasser, Aceton oder Ethanol handelt, und die Schmierschicht repräzipitiert partiell. So ist der Dentinhaftvermittler einerseits mit der Schmierschicht und andererseits mit dem intertubulären Dentin über das Primer infiltrierte Kollagen, die sogenannte Hybridschicht, verbunden (HELLWIG 1995).

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Syntac Classic (Ivoclar Vivadent, Ellwangen, D)
- A.R.T. Bond TM (Coltène, Altstätten, CH)
- Scotchbond 2 TM (Dental Products/3M, Loughborough, GB)

### **Vollständige Entfernung der Schmierschicht**

Hierbei wird die Dentinoberfläche mit anorganischen Säuren bzw. Komplexbildnern, sogenannten Cleansern, angeätzt und anschließend gründlich mit Wasser abgespült. Die Schmierschicht wird so vollständig entfernt und hinterlässt eine recht stark demineralisierte Dentinoberfläche mit Freilegung des inter- und auch zum Teil peritubulären Dentins und Eröffnung der Dentinkanälchen. Mit dem Auftragen des Dentinhaftvermittlers entsteht eine Hybridschicht aus mit hydrophilen Monomeren durchtränktem Kollagen. In den mit Primer angefüllten Dentintubuli entstehen Retentionszapfen, sogenannte „tags“ (VAN MEERBEEK et al. 1992). Insgesamt geht man heute davon aus, dass die Haftung der Dentinadhäsive vor allem auf einer mikromechanischen Verankerung im Bereich des intertubulären Dentins beruht.

Es ist allerdings möglich, dass die hydrophilen Monomere die Kollagenfasern nicht vollständig infiltrieren, wenn das Dentin bei der Konditionierung zu stark getrocknet wurde. Durch Austrocknung fällt das Kollagengerüst in sich zusammen und eine vollständige Infiltration ist nicht mehr möglich. Es entsteht eine Schwachstelle im Verbund (VAN MEERBEEK et al. 1993, PASHLEY et al. 1994).

Diesem Phänomen wurde durch das Einführen des „wet bondings“ begegnet. Durch den Erhalt der Feuchtigkeit wird ein Zusammenfallen der Kollagenmatrix verhindert und somit die vollständige Penetration des Dentinhaftvermittlers bzw. Infiltration des Kollagennetzwerkes gewährleistet (KANCA 1992, GWINNETT 1992).

Weiterhin ist der Verbund durch hydrolytische Zersetzungsprozesse des Kollagens gefährdet (VAN MEERBEEK 1992, NAKABAYASHI et al. 1992, HALLER 1993).

Letztendlich sind auch Hypersensibilitäten durch die aus der Öffnung der Dentinkanälchen resultierende erhöhte Dentinpermeabilität nicht auszuschließen (SCHALLER et al. 1991).

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Scotchbond Multi-Purpose (Dental Products / 3M, Loughborough, GB)
- Gluma 2000 (Bayer Dental, Leverkusen, D)
- Tenure TM Solution (Den-Mat Corporation, Santa Maria, USA)

#### **2.4.4 Vierte Generation der Dentinhaftvermittler bzw. Typ 1 der Dentinadhäsive**

Bei der Einführung der vierten Generation der Dentinhaftvermittler wollte man dem klinisch schwer umzusetzenden Arbeitsschritt des selektiven Ätzens der Schmelzränder begegnen. Eine ausschließlich auf die Schmelzränder begrenzte Applikation der Phosphorsäure war aufgrund des häufigen unbeabsichtigten Mehraustritts aus der Applikationsspritze und die oft hohe Fließfähigkeit des Materials recht diffizil.

So wurde mit dieser neuen Generation das Prinzip des sogenannten „Total – Etching“, das gleichzeitige Ätzen von Schmelz und Dentin mit Phosphorsäure, eingeführt, mit dem die Applikation deutlich erleichtert wird. Die konditionierende Funktion des Primers fällt somit weg und beschränkt sich lediglich darauf, mit Hilfe der Monomere eine Verbindung zwischen dem hydrophilen Dentin und dem hydrophoben Kunststoff herzustellen.

Nach der Säurekonditionierung wird die gesamte Kavität gründlich abgespült. Durch das nachfolgende Trocknen der Schmelzränder zur Kontrolle eines suffizienten Ätzmusters in Form einer kreidigen Opazität der angeätzten Flächen wird dem stark demineralisierten Kollagennetzwerk im Dentin Feuchtigkeit entzogen, womit die Gefahr eines Kollapses dieser Zone und damit eine reduzierte Penetration des Dentinhaftvermittlers besteht. Daraus entstand der klinische Arbeitsschritt der erneuten Anfeuchtung der Dentinoberfläche vor der Applikation des Primers. Das sogenannte „Wet Bonding“ bewirkt ein Aufquellen des kollabierten Kollagengerüsts, wodurch die Monomere besser in das demineralisierte Dentin eindringen können. Nanoskopische Undichtigkeiten durch insuffiziente Penetration und daraus gegebenenfalls resultierende postoperative Hypersensivitäten können so vermieden werden.

In der oben erwähnten aktuelleren Einteilung der Dentinhaftvermittler gehören diese Materialien zum Typ 1 mit drei klinischen Arbeitsschritten (Ätzen – Primer – Bonding), „Total - Etching“ und Entfernung der Schmierschicht. Es handelt sich um Mehr-Flaschen-Systeme.

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Gluma Solid Bond (Heraeus-Kulzer)
- OptiBond FL (Kerr)
- Adper Scotchbond MP (3M Espe)
- Syntac Classic (Ivoclar Vivadent)
- Solobond Plus (Voco)

#### **2.4.5 Fünfte Generation der Dentinhaftvermittler bzw. Typ 2 und 3 der Dentinadhäsive**

##### **Typ 2 als Ein-Flaschen-Systeme**

Mit der Einführung der „One-Bottle-Bonds“ der fünften Generation konnte die Reduktion der klinischen Arbeitsschritte von drei auf zwei Arbeitsschritte verwirklicht werden. Hier befinden sich Primer und Bonding in einer Flasche.

Nach neuerer Typisierung entsprechen diese Materialien dem Typ 2 der Dentinadhäsive mit zwei klinischen Arbeitsschritten (Ätzen – Primer / Bonding), „Total – Etching“ und Entfernung der Schmierschicht.

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Prime&Bond NT (Dentsply De Trey)
- Excite (Ivoclar Vivadent)
- Admira Bond (Voco)
- Adper Scotchbond 1 (3M Espe)

### **Typ 3 als Adhäsiv-Systeme ohne Phosphorsäure-Ätzung**

Diese als Typ 3 bezeichnete Weiterentwicklung bedient sich erstmals der Konditionierung von Schmelz und Dentin mit selbstkonditionierenden Monomerlösungen ohne separate Phosphorsäureätzung. Auch hierbei handelt es sich um zwei klinischen Arbeitsschritte (Etchant / Primer – Bonding), da das Bonding separat appliziert wird.

Man kann die einzelnen Produkte der Hersteller folgendermaßen unterscheiden:

#### *Primer zum Anmischen*

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Clearfil Liner Bond 2V (Kuraray)
- Resulcin AquaPrime & Monobond (Merz Dental)

#### *Gebrauchsfertige Primer*

Vertreter dieser Gruppe sind:

- AdheSE (Ivoclar Vivadent)
- Clearfil SE Bond (Kuraray)
- NRC + Prime & Bond NT (Dentsply DeTrey)

Die klinische vereinfachte Anwendung dieser fünften Generation führte insgesamt zu einem kommerziellen Erfolg. Aus werkstoffkundlicher Sicht bleibt allerdings zu berücksichtigen, dass die Vereinigung der Eigenschaften Penetrationsfähigkeit des Primers einerseits und die mechanische Stabilität des Bondingharzes andererseits im Vergleich zu den Generationen drei und vier einen Kompromiss darstellt, da die beiden Komponenten nicht gleichgewichtig repräsentiert sein können.

#### **2.4.6 Sechste und siebente Generation der Dentinhaftvermittler bzw. Typ 4 der Dentinadhäsive**

Hier wird die Realisierung eines einzigen klinischen Arbeitsschrittes möglich durch die Applikation eines selbstkonditionierenden Primer-Adhäsivs (Ätzen / Primer / Bonding) unter Auflösung der Schmierschicht. Diese so genannten „All-In-One“ Produkte lassen sich gemäß ihrer Anwendung wie folgt unterscheiden:

##### *Primer-Adhäsive zum Anmischen und zweimaliger Applikation*

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Etch&Prime 3.0 (Degussa)
- Futurabond (Voco)

Hier müssen Primer und Bonding vor der Applikation aus zwei separaten Flaschen zusammengeführt und angemischt werden.

##### *Primer-Adhäsive zum Anmischen und einmaliger Applikation*

Vertreter dieser Gruppe sind:

- Adper Prompt L-Pop (3M Espe)
- One Up-Bond F (Tokuyama)
- Xeno III (Dentsply DeTrey)

Alle Systemkomponenten werden in einem Folienblister getrennt aufbewahrt und werden unmittelbar vor Applikation durch Aktivierung automatisch vermischt.

##### *Gebrauchsfertige Primer-Adhäsive mit Einmalapplikation*

Vertreter dieser Gruppe sind:

- iBond (Heraeus Kulzer)
- AQ-Bond (Sun Medical)

Bei diesen Produkten befinden sich alle Komponenten in einer einzigen Flasche, so dass das Anmischen entfällt. Man spricht daher auch von der siebenten Generation der Dentinhaftvermittler.

## 2.5 Zahnfarbene Füllungsmaterialien im Trend – quo vadis?

Zweifelsohne hat die Entwicklung der Füllungsmaterialien und Dentinadhäsive in den letzten fünfzehn bis zwanzig Jahren erstaunliche Fortschritte gemacht.

### 2.5.1 Die Kompositmaterialien

Als das zurzeit universellste Füllungsmaterial für alle Black'schen Kavitätenindikationen bewährt sich seit Ende der achtziger Jahre das Hybridkomposit (z.B.: Tetric Ceram / Ivoclar Vivadent). Mit seiner Markteinführung konnte ein Meilenstein in der Entwicklung der adhäsiven Füllungstherapie gesetzt werden: Durch die Verwendung von Hybridkompositen war es – bedingt durch deren deutlich verbesserte physikalische Eigenschaften wie Biegebruchfestigkeit und Abrasionsstabilität - möglich, auch größere Frontzahnaufbauten sowie umfangreiche Klasse-II-Füllungen mit deutlich verbesserten Langzeitprognosen zu legen.

Bei den Ormoceren (z. B.: Admira / Voco) konnte inzwischen nachgewiesen werden, dass diese matrixmodifizierte Kompositmaterialien zwar das Potential zur Reduktion der Polymerisationsschrumpfung haben, dieses aber nicht in klinisch relevantem Umfang umsetzen konnten. Auch die physikalischen Eigenschaften konnten im Vergleich zu den Hybridkompositen nicht verbessert werden.

Seit einigen Jahren wird an der Entwicklung schrumpfungsreduzierter Komposite geforscht. Sie sind zum Teil schon auf dem Dentalmarkt verfügbar (z.B.: In Ten-S / Ivoclar Vivadent) oder befinden sich noch in der Laborphase des Herstellers (z.B.: Hermes / 3M Espe).

Durch Maßnahmen wie die Erhöhung des Füllkörpervolumens und die Reduktion der Anteile kurzkettiger Moleküle, konnte die Polymerisationsschrumpfkraft von einem Füllungsmaterial wie z.B. dem In Ten-S gegenüber Tetric Ceram um etwa ein Viertel reduziert werden (ERNST et al. 2004).

Weitere Anstrengungen zur Reduktion der Polymerisationsschrumpfung führten zur vollständigen Neuentwicklung von Monomersystemen, die zum Beispiel über Ringöffnungen eine Volumenkontraktion ausgleichen (Hermes). Bei diesem Füllungsmaterial handelt es sich um ein Siloran, für das eine Polymerisationsschrumpfkraft von nur etwa der Hälfte eines konventionellen Hybridkomposits nachgewiesen werden konnte (ERNST et al. 2004). Aufgrund der

Inkompatibilität solcher Materialien mit den konventionellen Adhäsivsystemen muss jedoch in einem weiteren Schritt die Entwicklung neuer Bondingmaterialien stehen, da zum Beispiel ein derartiges ringöffnendes Molekül kein Anbindungspotential an die Kohlenwasserstoffchemie der konventionellen Bondings hat.

### **2.5.2 Die Dentinadhäsive**

Die Adhäsivtechnik hat sich klinisch bewährt und ist aus der restaurativen Therapie nicht mehr wegzudenken. Seit einigen Jahren steht bei der Entwicklung der Dentinadhäsive nicht mehr die Optimierung der Dentinhaftung im Mittelpunkt, sondern die Vereinfachung der Anwendung, die Herabsetzung der Techniksensitivität und die Verkürzung der Applikationsdauer (HALLER und BLUNCK 2003).

Als eines der klinisch bestdokumentiertesten Adhäsivsysteme gilt das Mehr-Flaschen-System Syntac Classic (Ivoclar Vivadent). Es ist seit 1990 erhältlich und je nach Wunsch mit oder ohne „Total Etch“-Technik anwendbar. Mit ihm sind langjährig randspaltfreie und ästhetische Kompositrestaurationen nachweisbar (MAZER et al. 1994). Es wird daher von Prüfinstituten als „Goldstandard“ in der Kontrollgruppe bei vergleichenden Untersuchungen mit anderen Adhäsiven verwendet (FRANKENBERGER et al. 1996).

Zur Vereinfachung der Anwendung wurden Primer-Adhäsive entwickelt, die auch als Ein-Flaschen-Adhäsive in Kombination mit der Totalätztechnik bezeichnet werden, z. B.: Admira Bond (Voco). Haftfestigkeitsmessungen ergeben für die Zwei-Schritt-Totalätzsysteme geringere Haftwerte und stärkere Schwankungen der Messwerte im Vergleich zu den Drei-Schritt Systemen (BLUNCK und ROULET 2002, INOUE et al. 2001, HALLER und FRITZENSCHAFT 1999). Langzeitversuche in vitro bestätigen sowohl im Randschlussverhalten als auch in den Haftwerten schlechtere Prognosen für solche und ähnliche Zwei-Schritt-Systeme, bei denen sich Primer und Bonding in einer Flasche befinden, als für Bondingsysteme, bei denen eine getrennte Applikation von Primer und Adhäsiv erfolgt (MIYAZAKI et al. 1998, FRANKENBERGER 2002).

Eine gute Dentinhaftung ist allerdings auch ohne voraus gehende Phosphorsäure-Ätzung mit selbstkonditionierenden Bondingsystemen wie z. B. dem Self Etch Prime & Bonding (Ivoclar Vivadent) möglich. Durch die gleichzeitige Auflösung der Schmierschicht und Infiltration der Monomere kann im Gegensatz zur Totalätztechnik gar kein ungeschütztes Kollagenfasergeflecht entstehen (BLUNCK und HALLER 1999). Die Dentinhafffestigkeit von selbstkonditionierenden Systemen mit separater Applikation von Primer und Adhäsiv lag in den meisten Studien zwischen denen von Drei-Schritt- und Zwei-Schritt-Totalätzsystemen (INOUE et al. 2001, MOLLER et al. 2002, NIKAIDO et al. 2002). Durch die identische Tiefe der Demineralisation und Infiltration ist die Anwendung von selbstkonditionierenden Primern im Vergleich zur Totalätztechnik weniger techniksensitiv und die erzielte Dentinhaftung weniger behandlerabhängig (MIYAZAKI et al. 2000). Dennoch wurde auch bei selbstkonditionierenden Systemen über das Phänomen der „Nanoleakage“ berichtet (LI et al. 2002, LI et al. 2001). In vitro erzielten selbstkonditionierende Bondingsysteme mit Zwei-Schritt-Applikation einen guten Randschluss am Dentinrand von Klasse-V-Füllungen, ohne Undichtigkeiten vollständig zu verhindern (GORDAN et al. 1998, KUBO et al. 2001, PRATI et al. 1997, SANTINI et al. 2001). Auch beim Einsatz in dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten wird über eine belastungsstabile Randadaptation berichtet (HANNIG und BOTT 2000, HANNIG et al. 2001).

All-in-one-Adhäsive schneiden im Vergleich dazu weniger zuverlässig ab (CARDOSO et al. 1999, ERNST et al. 2002a, ERNST et al. 2002b, FRANKENBERGER 2002, HANNIG und BOTT 2000). Diese selbstkonditionierenden Primer-Adhäsive mit nur einer zu applizierenden Lösung schnitten in Studien in Bezug auf die Haftung am Dentin meist schlechter ab als Totalätzsysteme oder selbstkonditionierende Systeme mit Zwei-Schritt-Applikation (FRANKENBERGER et al. 2001, INOUE et al. 2001b, MOLLER et al. 2002b, ROSA und PERDAGIO 2000, SPOHR et al. 2001). Erste Hinweise auf eine optimierte Dentinhaftung von frisch auf den Markt gekommenen All-in-one-Adhäsiven müssen erst durch weitere Studien bestätigt werden, bevor eine endgültige Bewertung möglich ist.

Deutlichen Forschungsbedarf gibt es z.B. noch bei All-in-one-Adhäsiven wie dem noch in der Testphase befindlichen Hermes Bond (3M Espe) in Kombination mit dem Komposit Hermes, denn chemisch müssen beide Materialien noch auf einander abgestimmt werden.

Das Prinzip der Selbstkonditionierung ist allerdings deshalb so attraktiv, weil der Verzicht auf die Phosphorsäure-Ätzung und die verkürzten Arbeitsschritte die Adhäsivtechnik vereinfacht und gleichzeitig die Verarbeitungsfehler des Adhäsivs und den Zeitaufwand verringert.

Bei allen Versuchen, die Applikation von Bondingsystemen zu vereinfachen, muss aber immer bedacht werden, dass an den zwei sehr unterschiedlichen Substraten, nämlich Schmelz und Dentin, auch unterschiedliche Bedingungen zur Haftung erfüllt werden müssen. Die klassischen Mehr-Flaschen-Systeme sind diesbezüglich optimiert. Jede Vereinfachung der Anwendung führt zwangsläufig zu einem Kompromiss bei Beachtung der strukturellen Unterschiede zwischen Schmelz und Dentin.

### 3 Versuchsplanung

#### 3.1 Schema zur Versuchsplanung

Die Versuchsplanung dieser In-vitro-Studie in der Übersicht:

##### 1. Probenvorbereitung:

Auswahl kariesfreier, menschlicher mandibulärer Molaren (n = 46)

Präparation okkluso-approximaler Kavitäten (zerviko-approximale Kavitätenränder 1 mm unterhalb der Schmelz-Zementgrenze)



##### 2. Vorbereitung und Konditionierung der Schmelzränder

mit Schmelz- schrägung	ohne Schmelz- schrägung	mit Schmelz- schrägung	mit Schmelz- schrägung	mit Schmelz- schrägung	mit Schmelz- schrägung
selektive Schmelz- ätzung	selektive Schmelz- ätzung	selektive Schmelz- ätzung	selektive Schmelz- ätzung	„Total Etch“- Technik	„selbstkonditio- nierendes“ Adhäsiv- system
Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV	Gruppe V	Gruppe VI



##### 3. Applikation des Dentinhaftvermittlers und Legen der Füllung in Inkrementtechnik

Gruppe I	Gruppe II	Gruppe III	Gruppe IV	Gruppe V	Gruppe VI
<i>Syntac Classic/ Tetric Ceram</i>	<i>Syntac Classic/ Tetric Ceram</i>	<i>Hermes Bond/ Hermes</i>	<i>Syntac Classic/ In Ten-S</i>	<i>Admira Bond/ Admira</i>	<i>Self Etch Prime &amp; Bonding / In Ten-S</i>
n = 8	n = 8	n = 4	n = 8	n = 10	n = 8



##### 4. Ausarbeitung der Füllungen zur Vorbereitung der Replikaherstellung:

Konturierung, Politur und Reinigung der okkluso-approximalen Füllungsänder

##### 5. Herstellung der Replikamodelle:

Abformung der approximalen Kavitätenränder

Ausgießen der Abformungen mit Epoxidharz



**6. Thermische Wechselbelastung der Proben:**

5-55°C, 2.500 Zyklen

**6.1. Herstellung der Replikamodelle****7. mechanische Belastung der Proben:**

100 N, 500.000 Zyklen

**7.1. Herstellung der Replikamodelle****8. Rasterelektronenmikroskopische Auswertung der approximalen Füllungsrän­der**

Analyse des Randschlussverhaltens vor Belastung

Analyse des Randschlussverhaltens nach thermischer Belastung

Analyse des Randschlussverhaltens nach mechanischer Belastung

**9. Statistische Auswertung****Abb. 1** Schematische Darstellung des Versuchsablaufs

## 4 Material und Methode

### 4.1 Material

#### 4.1.1 Probenmaterial

Als Probenmaterial dienten 46 menschliche kariesfreie, frisch extrahierte mandibuläre Weisheitszähne, die nach der Extraktion zum Schutz vor Austrocknung in einer desinfizierenden wässrigen Alkohollösung gekühlt aufbewahrt wurden. Vor der Präparation wurden die Testzähne sorgfältig und vorsichtig von anhaftenden Geweberesten und Konkrementen mit einem Skalpell und groben Gummipolierern gereinigt.

#### 4.1.2 Restaurationsmaterialien

Es wurden insgesamt vier verschiedene Kompositmaterialien untersucht:

##### **Tetric Ceram**

*Hersteller: Ivoclar Vivadent, Ellwangen, D.*

Bei Tetric Ceram handelt es sich um ein konventionelles lichthärtendes Hybridkomposit. Die Monomere der organischen Matrix bestehen aus reinen Methacrylaten wie Bis-GMA, UDMA und TEGDMA.

##### **Admira**

*Hersteller: Voco, Cuxhaven, D.*

Admira ist ein lichthärtendes Füllungsmaterial auf Ormocer-Basis. Ormocer leitet sich ab von *organically modified ceramic*. Es enthält dreidimensional vernetzte anorganisch-organische Verbundpolymere, die Ormocere. In diese Netzwerkmatrix sind Füllerpartikel entsprechend der Komposit- Technologie inkorporiert. Additiv sind der Harzmatrix zu geringen Anteilen aliphatische und aromatische Dimethacrylate zugefügt. Die Ormocere sind bereits auspolymerisiert; aufgrund der vorgeformten Struktur und des sehr hohen Molekulargewichts ist die Schrumpfung geringer als bei konventionellen Kompositen.

## **In Ten-S**

*Hersteller: Ivoclar Vivadent, Ellwangen, D.*

In Ten-S ist ein konventionelles Hybridkomposit. Es enthält ein klassisches Komposit aus reinen Methacrylaten. Bei diesem Material konnte eine deutliche Reduktion der Polymerisationsschrumpfung um ca. 30% im Vergleich zu den konventionellen Hybridkompositen erreicht werden durch die Reduktion von hochschrumpfenden Dimethacrylaten im Monomer und durch die Verwendung eines speziellen Copolymer Füllers, der einen erhöhten Gesamtfüllergehalt erlaubt (CONDOU und FERRACANE 2002).

## **HERMES (Prototyp)**

*Hersteller: 3M Espe, Seefeld, D.*

Hermes ist ein noch nicht kommerziell verfügbares lichthärtendes Füllungsmaterial. Bei den Monomeren des Komposits handelt es sich um sogenannte Silorane, die zur chemischen Gruppe der ringöffnenden Epoxide zählen. Hier gelingt die Reduktion der Polymerisationsschrumpfung auf < 1 Vol.% durch Ringöffnung der Monomere während der Polymerisation (ERNST et al. 2004, WEINMANN et al. 2005). Durch diesen Entfaltungseffekt der Monomermoleküle wird die Volumenkontraktion kompensiert.

### **4.1.3 Dentinhaftvermittler**

Jedem der vier Kompositmaterialien wurde je ein Dentinhaftvermittlersystem zugeordnet:

#### **Syntac Classic**

*Hersteller: Ivoclar Vivadent, Ellwangen, D.*

Syntac Classic ist ein Dentinhaftvermittler der dritten Generation. Es handelt sich um ein Drei-Flaschen-Adhäsivsystem mit einem Primer, einem Adhäsiv und einem Bonding. Nach wahlweiser Ätzung der schmelzbegrenzten Flächen der Kavität („selektive“ Schmelzätzung) oder der gesamten Kavität („Total-Etch“) wird auf die Dentinoberfläche zunächst ein selbstätzender Primer und dann das Adhäsiv aufgetragen und luftgetrocknet, um dann mit einem lichthärtenden Bonding, das auf

Schmelz und Dentin aufgetragen wird, einen chemisch stabilen Verbund zwischen Kompositmaterial und Zahnhartsubstanz zu schaffen.

### **Admira Bond**

*Hersteller: Voco, Cuxhaven, D.*

Admira Bond gehört als „One-Bottle-Bond“ zur fünften Generation der Dentinhaftvermittler bzw. zum Typ 2 der Dentinadhäsive. Es enthält Primer und Bonding in einer Flasche. Nach dem „Total-Etching“ der gesamten Kavität mit Phosphorsäure erfolgt ein „Total-Bonding“, bei dem das Ein-Flaschen-Adhäsiv sowohl auf die präparierten Schmelz- als auch Dentinflächen aufgetragen und lichtgehärtet wird.

### **Self Etch Prime & Bonding (AdheSE)**

*Hersteller: Ivoclar Vivadent, Ellwangen, D.*

Es handelt sich um ein Zwei-Flaschen-Adhäsivsystem mit getrennter Applikation eines selbstätzenden Primers und eines Bondings ohne separate Phosphorsäureätzung. Damit gehört es zum Typ 3 der Dentinhaftvermittler. Sowohl Primer als auch Bonding werden auf Schmelz und Dentin aufgetragen und zu einem gleichmäßigen Film verblasen, bevor das Bonding lichtgehärtet wird.

### **HERMES-Bond (Prototyp)**

*Hersteller: 3M ESPE, Seefeld, D.*

HERMES-Bond ist ein noch nicht kommerziell verfügbares „All-In-One“ Adhäsiv der sechsten Generation bzw. des Typ 4 der Dentinhaftvermittler, bei dem Ätzen, Primern und Bonden in einem Arbeitsschritt erfolgen. Es ist speziell für die Anwendung mit dem HERMES-Komposit entwickelt und stellt den Verbund zur Zahnhartsubstanz her. HERMES-Bond darf nur mit dem Füllungsmaterial HERMES-Komposit verwendet werden.

## **4.2 Methode**

### **4.2.1 Präparation der Zähne**

In jeden Testzahn wurden mit birnenförmigen Diamantschleifern (mittlere Korngröße: 80 µm; Komet, D-Lemgo) okklusal-approximale Klasse-II-Kavitäten präpariert und anschließend mit feinkörnigen Diamantschleifern (mittlere Korngröße: 15 µm; Komet) unter Wasserkühlung finiert. Nach jeder achten präparierten Kavität wurde ein neuer grobkörniger Diamantschleifer, nach jeder vierten Kavität ein neuer feinkörniger Diamantschleifer verwendet.

Die bucco-linguale Ausdehnung der okklusalen Kavität betrug 3 mm, die mesio-distale Ausdehnung 5-6 mm. Die bucco-linguale Ausdehnung der approximalen Kavität betrug 4 mm, die Tiefe der zervikalen Stufe 1 mm. Je nach Ausmaß der klinischen Krone variierte die okklusal-zervikale Ausdehnung zwischen 4 und 5 mm. Bei allen Versuchsgruppen mit Ausnahme der Versuchsgruppe II wurden die Schmelzränder der Kavität mit einem feinkörnigen Diamantschleifer auf einer Breite von ca. 0,5 mm im Winkel von ca. 30-45 ° angeschrägt. Die approximal dentinbegrenzte Stufe der Kavität wurde rechtwinklig ohne Randschrägung präpariert.

Nach der Präparation wurden die Testzähne in 1%-Thymollösung aufbewahrt und mindestens 24 Stunden vor dem Legen der Füllung in reines Wasser gelegt. Die Politur der Füllung erfolgte frühestens nach einem Zeitraum von weiteren 24 Stunden, in dem die Testzähne weiterhin in reinem Wasser gelagert wurden.

### **4.2.2 Legen der Füllungen**

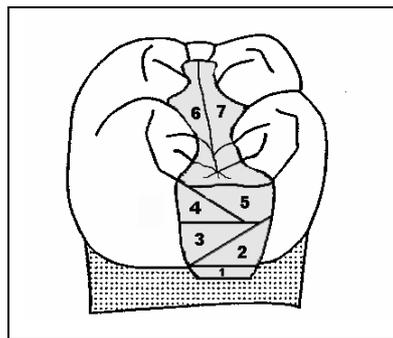
Im Anschluss an die Präparation wurde in den Versuchsgruppen I, II und IV eine selektive Schmelzätzung und in der Versuchsgruppe V die „Total-Etch“-Technik mit 37%igem Phosphorsäuregel (Total Etch; Ivoclar Vivadent) durchgeführt. Bei den Versuchsgruppen III und VI wurde der Zahnschmelz durch Applikation eines selbstkonditionierenden Dentinhaftvermittlers konditioniert (siehe Abb. 1).

Die Konditionierung des Schmelzes und des Dentins erfolgte nach Herstellerangaben - mit leichter Abweichung bei Versuchsgruppe III – und wurde mit jeweils einem der fünf Adhäsivsysteme durchgeführt (Tab. 1-1 im Anhang).

Auf das Legen einer Unterfüllung und die Verwendung eines Matrizenbandes vor der Applikation der Füllungsmaterialien wurde in allen Versuchsgruppen verzichtet.

Nach Applikation des Dentinadhäsivs folgte das schichtweise Legen des Kompositmaterials in die Kavität in Inkrementtechnik, wobei jedes Inkrement separat polymerisiert wurde.

Das erste Kompositinkrement wurde waagrecht in die proximale Stufe in einer Schichtstärke von ca. 1 mm appliziert, drei weitere Inkremente zur Auffüllung des proximalen Kavitätenbereichs in schräg-vertikaler Richtung in maximal 2 mm starken Schichten appliziert. Zur Fertigstellung der Füllungen wurden okklusal zwei bis drei weitere Inkremente appliziert.



**Abb. 2** Schematische Darstellung der Inkrementenschichttechnik in einer approximal dentinbegrenzten Klasse-II-Kavität

Die Aushärtung der proximalen Inkremente erfolgte von proximal, die der okklusalen Inkremente jeweils von okklusal bei kleinst möglichem Abstand der Lichtquelle zur Kompositoberfläche.

Nach Überschussentfernung und Konturierung der Füllungen mit fein- und feinstkörnigen Diamanten erfolgte die Politur der Füllungen mit aluminiumoxidbeschichteten flexiblen Scheibchen (Sof-Lex™, 3M Dental Products) und Silikonpolierern (Identoflex, Buchs SG, CH).

Zur Vermeidung von Füllungsüberhängen wurden die Füllungsänder abschließend im Auflichtmikroskop auf Unregelmäßigkeiten kontrolliert und die Zähne unmittelbar

vor der Abformung für die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung im Ultraschallbad gereinigt.

### **4.2.3 Versuchsaufbau**

Die 46 präparierten Testzähne wurden randomisiert auf sechs Versuchsgruppen (I-VI) verteilt. Den Versuchsgruppen I, II, IV und VI wurden je acht Zähne zugeordnet. Der Versuchsgruppe III wurden zunächst nur vier Zähne zugeordnet und erste Ergebnisse der rasterelektronenmikroskopischen Auswertung abgewartet. Die sehr schlecht ausfallenden Ergebnisse wurden als Vorversuch in die Untersuchung integriert und die Präparation bzw. Auswertung weiterer Zähne unterlassen. In der Versuchsgruppe V wurden nach einer recht weiten Streuung der Ergebnisse zwei weitere Zähne untersucht, so dass ihr zehn Zähne zugeordnet wurden.

Die Kavitäten aller Zähne, mit Ausnahme der Versuchsgruppe II, wurden im Bereich der schmelzbegrenzten Ränder angeschrägt.

Die Applikation und Lichtpolymerisation der im Versuchsablauf beschriebenen und in Tabelle 1-1 und 1-2 im Anhang aufgeführten Dentinhaftvermittler und Kompositmaterialien in den Versuchsgruppen I-VI erfolgte orientiert an den Herstellerangaben.

Die Kavitäten der Versuchsgruppen wurden mit folgenden Dentinhaftvermittlern bzw. Restaurationsmaterialien versehen:

Alle Kavitäten der Versuchsgruppen (VG) I und II wurden mit dem Komposit Tetric Ceram in Kombination mit dem Dentinhaftvermittler Syntac Classic gefüllt.

Die Kavitäten der Versuchsgruppe IV und VI wurden mit dem Komposit InTen-S gefüllt, wobei das Füllungsmaterial bei VG IV mit dem Dentinhaftvermittler Syntac Classic und bei VG VI mit dem Dentinhaftvermittler Self Etch Prime & Bonding kombiniert wurde.

Bei der Versuchsgruppe V kam das Komposit Admira in Verbindung mit dem dazugehörigen Haftvermittler Admira Bond zur Anwendung.

Die vier Kavitäten der Versuchsgruppe III wurden mit dem bisher noch nicht kommerziell verfügbaren Komposit Hermes und dem dazugehörigen Dentinadhäsiv Hermes-Bond gefüllt.

#### 4.2.4 Versuchsablauf

##### Verarbeitung der Dentinhaftvermittler und Kompositmaterialien

Das Applizieren der Dentinhaftvermittler in die Kavitäten erfolgte nach Herstellerangaben. Die Komposite aller Versuchsgruppen wurden in 2 mm dicken Schichten in oben beschriebener Inkrementschichttechnik appliziert, jedoch unterschiedlich ausgehärtet.

##### **Syntac Classic / Tetric Ceram und In Ten-S**

Phosphorsäuregel - Schmelz ätzen für 60 s  
Total Etch TM 37% - absprayen für 30 s, trocknen  
(D 13745)

Syntac Primer - in Dentin einmassieren für 30 s  
(D 58443) - 15 s einwirken lassen  
- vorsichtig verblasen für 10 s

Syntac Adhäsiv - in Dentin einmassieren für 30 s  
(D 56955) - 10 s einwirken lassen  
- vorsichtig verblasen für 10 s

Heliobond - auf Schmelz und Dentin auftragen  
(D 57302) - zu einer dünnen Schicht verblasen  
- 20 s lichthärten von approximal  
- 20 s lichthärten von okklusal  
in Kombination mit Tetric Ceram  
- 10 s lichthärten von approximal  
- 10 s lichthärten von okklusal in Kombination mit In Ten-S

Das Feinhybrid-Komposit Tetric Ceram, Farbe A2, wurde mit einer Elipar Highlight-Polymerisationslampe (3M Espe) 40 s pro Schicht ausgehärtet. Das Feinpartikel-Hybridkomposit In Ten-S, Farbe A3, wurde mit der Polymerisationslampe Astralis 10 (Ivoclar Vivadent) 10 s pro Schicht ausgehärtet.

**Hermes Bond / Hermes**

- Phosphorsäuregel - Schmelz ätzen für 30 s
- Total Etch TM 37% - absprayen für 30 s, trocknen  
(D 13745)
- Hermes Bond A - Hermes Adhäsiv liquid A, liquid B und Liquid C  
(J-173-10/01-A) im Verhältnis 2:2:1 mischen  
- in Schmelz und Dentin einmassieren für 30 s (statt 20s)
- Hermes Bond B - vorsichtig verblasen  
(J-173-10/01-B) - 10 s lichthärten
- Hermes Bond C  
(J-173-10/01-C)

Das Dentinadhäsiv Hermes Bond wurde mit 650 mW/cm<sup>2</sup> statt 800 mW/cm<sup>2</sup> lichtgehärtet. Das Komposit auf Epoxidharzbasis Hermes wurde mit der Polymerisationslampe Astralis 10 10 s pro Schicht ausgehärtet.

**Admira Bond / Admira**

- Phosphorsäuregel - Schmelz ätzen für 30 s
- Total Etch TM 37% - Dentin ätzen für 15 s  
(D 13745 und - absprayen für 20 s, trocknen  
D 58417)
- Admira Bond - Dentin nochmals befeuchten  
(15601) - Admira Bond auf Schmelz und Dentin auftragen für 30 s  
- vorsichtig verblasen  
- 20 s lichthärten

Das Ormocer Admira, Farbe A3, wurde mit einer Optilux-Polymerisationslampe (Demetron Research Corporation) 60 s pro Schicht ausgehärtet.

**Self Etch Prime & Bonding / In Ten-S**

- Self Etch Primer (D 47826)
- Self Etch Primer in Schmelz und Dentin einmassieren für 15 s
  - 15 s einwirken lassen
  - gründlich verblasen, bis alle Primer-Überschüsse entfernt sind, da es sonst zur Polymerisationsbehinderung kommt
- Self Etch Bonding (D 49553)
- Self Etch Bonding auf Dentin und Schmelz auftragen
  - 10 s einwirken lassen
  - vorsichtig verblasen zu einem gleichmäßigen Film
  - 20 s lichthärten von approximal
  - 20 s lichthärten von okklusal

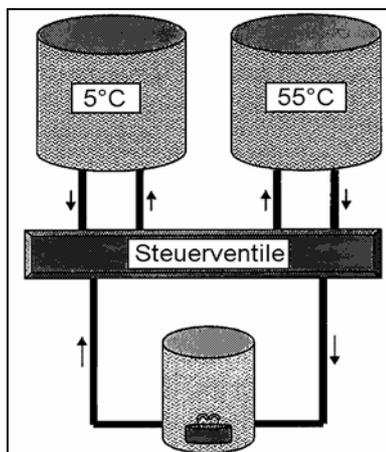
Das Feinpartikel-Hybridkomposit In Ten-S, Farbe A3, wurde mit der Polymerisationslampe Astralis 10 (Ivoclar Vivadent) 10 s pro Schicht ausgehärtet.

#### 4.2.5 Mechanisch-thermischer Belastungstest der Zähne

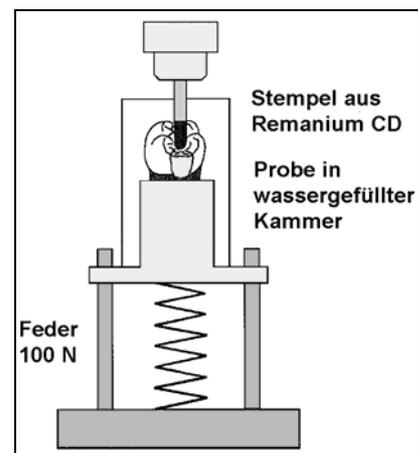
Zur Simulation klinischer Beanspruchung wurden die Zähne einer künstlichen Alterung aus thermischer und mechanischer Wechselbelastung unterzogen.

Zunächst erfolgte die thermische Wechselbelastung im Wechselbad, welches bei einer Haltezeit von 60 s abwechselnd auf 5°C und 55°C temperiert wurde. Jede Probe durchlief 2.500 Zyklen dieser Thermowechselbelastung (Abb. 3).

Anschließend erfolgte eine mechanische Wechselbelastung von 500.000 Zyklen mit einer Stempelkraft von 100 N. Als Antagonisten dienten mit Komposit ummantelte Stempel aus einer Cr-Co-Mo-Legierung, die ausschließlich auf der Füllung und nicht auf der Zahnhartsubstanz abgestützt sind (Abb. 4).



**Abb. 3** Schematische Darstellung der thermischen Belastung der Proben



**Abb. 4** Schematische Darstellung der mechanischen Belastung der Proben

#### 4.2.6 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen

Jeweils vor und nach thermischer sowie nach mechanischer Belastung wurden Replikamodelle der Proben angefertigt.

Die Zähne wurden nach vorheriger Reinigung im Ultraschallbad mit einem additionsvernetzenden Silikon (President regular body und light body; coltène, Altstätten, CH) im Korrekturabformverfahren abgeformt und anschließend mit einem Epoxidharz (Blue Star, GIRRACH DENTAL, Pforzheim, D) ausgegossen.

Die Replikas der Proben wurden mit Graphitfolie (Leit-Tabs, doppelklebend, Ø12 mm, Noviscan) auf REM-Objektträger (Stiftprobenteller Artikel G, Plano, W. Plannet GmbH, Balzers, FL) geklebt und mit einem Silberlack (Agar-Leitsilber mit Pinsel G 3691) benetzt.

Nach Trocknung der Proben im Trockenschrank (37°C / 24h) wurden die Replikas im Sputtercoater (Sputtercoater SCD 50, Bal-Tec, Balzers, FL) unter Vakuum mit Gold besputtert.

Bedingungen beim Besputtern der Präparate:

Trägergas:	Argon
Spannung:	180 V
Stromstärke:	45 mA
Zeit:	60 s

Die rasterelektronenmikroskopische Auswertung der approximalen Füllungsänder erfolgte mit dem Rasterelektronenmikroskop (Digital Scanning Microscope DSM 950, Zeiss, Oberkochen, D) in 100 µm Schritten und 320facher Vergrößerung gemäß folgender Kriterien:

- „*Perfekter Rand*“, definiert als kontinuierlicher Übergang zwischen Füllung und Zahnhartsubstanz
- „*Randspalt*“, charakterisiert als eindeutiger Spalt oder Haarriss zwischen Zahn und Füllung
- „*Überhang*“, die Füllung liegt der Zahnoberfläche außerhalb der Kavität auf
- „*Marginale Unregelmäßigkeit*“, charakterisiert als nicht kontinuierlicher, aber spaltfreier Übergang zwischen Füllung und Zahnhartsubstanz

- „Artefakte“, definiert als nicht beurteilbarer Randabschnitt wegen Fehlern in der Replikaherstellung

Für die approximalen Restaurationsränder wurde die prozentuale Verteilung der verschiedenen Randqualitäten – getrennt nach schmelz- und dentinbegrenzten Füllungsändern – in den sechs Versuchsgruppen vor und nach thermischer sowie nach mechanischer Belastung in bezug auf die Gesamtlänge der im Dentin bzw. Schmelz gelegenen Randabschnitte errechnet.

Jeweils repräsentative Abschnitte der Füllungsänder wurden fotografiert (Polapan, Polaroid).

#### **4.2.7 Statistische Auswertung**

Zur Signifikanzprüfung mit einem Signifikanzniveau von  $p < 0,01$  oder  $0,05$  dienten non-parametrische Testverfahren wie der Mann-Whitney-U-Test für den paarweisen Vergleich verschiedener Versuchsgruppen und der Wilcoxon-Test für einen Vergleich innerhalb der Versuchsgruppen vor und nach thermo-mechanischer Belastung. Für einen Vergleich aller sechs bzw. fünf (ausgenommen Versuchsgruppe III) verschiedenen Gruppen in Bezug auf ihr Randschlussverhalten in Schmelz und Dentin vor und nach thermischer und mechanischer Belastung diente der Kruskal-Wallis-Test.

## **5 Ergebnisse**

### **5.1 Rasterelektronenmikroskopische Füllungsrandanalyse**

Das Randschlussverhalten wurde getrennt nach dentin- und schmelzbegrenzten Restaurationsrändern beurteilt.

#### **5.1.1 Randschlussverhalten im Bereich der dentinbegrenzten Restaurationsränder**

##### **Gruppe I : Tetric Ceram / Syntac Classic mit Schmelzschrägung**

In Abbildung 5 sind die Resultate der quantitativen Füllungsrandanalyse für die dentinbegrenzten Restaurationsränder der Gruppe I (Tetric Ceram / Syntac Classic mit Schmelzschrägung) graphisch dargestellt. Die Abbildung 7 zeigt ein repräsentatives Photo des Füllungsrandes in 320facher Vergrößerung. Nach Fertigstellung der Restaurationen wiesen die dentinbegrenzten Füllungsränder der Versuchsgruppe I einen durchschnittlichen Anteil perfekter marginaler Adaptation von 48,8% der untersuchten Randlänge auf. Infolge der thermo-mechanischen Belastungstests kam es zu einer Abnahme des Prozentanteils perfekter marginaler Adaptation auf 17,3% der gesamten Randlänge. Entsprechend nahm die prozentuale Häufigkeit des Kriteriums „Marginale Unregelmäßigkeit“ infolge der In-vitro-Belastungstests von 33,5% auf 71,0% zu. Der prozentuale Anteil „Randspalt“ nahm nach Fertigstellung der Restaurationen von 11,2% auf 16,5% nach thermischer Belastung zu, um dann wieder fast auf einen ähnlichen Ausgangswert von 9,2% nach mechanischer Belastung abzufallen.

**Abb. 5** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der drei Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsänder in der Versuchsgruppe I (Tetric Ceram / Syntac Classic mit Schmelzschrägung). (Mittelwerte)

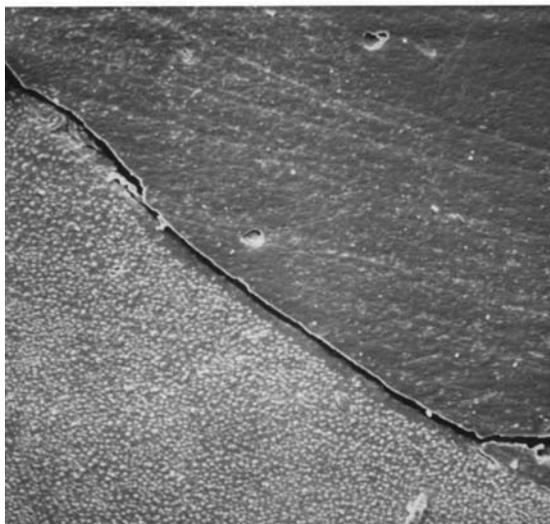


**Abb. 6** REM- Aufnahme eines dentinbegrenzten Füllungsrandes der Gruppe I (Tetric Ceram / Syntac Classic mit Schmelzschrägung) nach Abschluss der In-vitro-Belastungstests: „perfekter Rand“ bei 320facher Vergrößerung.

**Gruppe II: Tetric Ceram / Syntac Classic ohne Schmelzschrägung**

In Abbildung 7 sind die Resultate der quantitativen Füllungsrandanalyse für die dentinbegrenzten Restaurationsränder der Gruppe II (Tetric Ceram / Syntac Classic ohne Schmelzschrägung) graphisch dargestellt. Die Abbildung 8 zeigt ein repräsentatives Photo des Füllungsrandes in 320facher Vergrößerung. Nach Fertigstellung der Restaurationen wiesen die dentinbegrenzten Füllungsränder der Versuchsgruppe II einen durchschnittlichen Anteil perfekter marginaler Adaptation von 49,4% der untersuchten Randlänge auf. Infolge der thermo-mechanischen Belastungstests kam es zu einer Abnahme des Prozentanteils perfekter marginaler Adaptation auf 13,9% der gesamten Randlänge. Die prozentuale Häufigkeit des Kriteriums „Randspalt“ nahm infolge der In-vitro-Belastungstests von 14,3% auf 30,9% zu. Der prozentuale Anteil „Marginale Unregelmäßigkeiten“ nahm von 36,3% nach Fertigstellen der Restaurationen auf 54,7% nach mechanischer Belastung zu.

**Abb. 7** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der drei Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsråder in der Versuchsgruppe II (Tetric Ceram / Syntac Classic ohne Schmelzschrägung). (Mittelwerte)

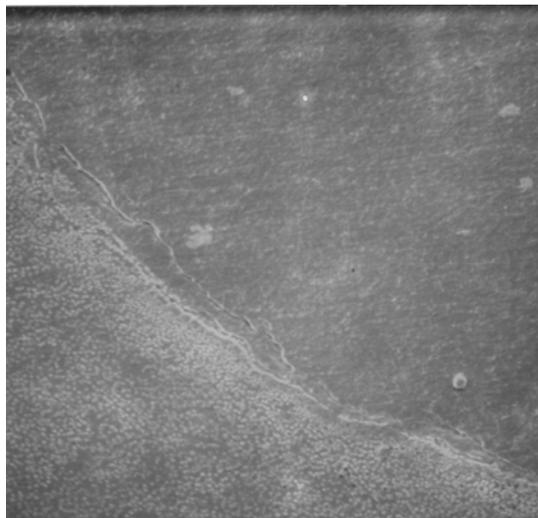


**Abb. 8** REM- Aufnahme eines dentinbegrenzten Füllungsrandes der Gruppe II (Tetric Ceram / Syntac Classic ohne Schmelzschrägung) nach Abschluss der In-vitro-Belastungstests: „Randspalt“ bei 320facher Vergrößerung.

**Gruppe III: Hermes / Hermes Bond**

In Abbildung 9 sind die Resultate der quantitativen Füllungsrandanalyse für die gesamte untersuchte Füllungsrandlänge im Bereich des Dentins der Gruppe III (Hermes / Hermes Bond) graphisch dargestellt. Die Abbildung 10 zeigt ein repräsentatives Photo des Füllungsrandes in 320facher Vergrößerung. Die Restaurationen der Versuchsgruppe III wiesen bereits nach Applikation des Füllungsmaterials mit einem Anteil von nur 26,6% perfekter marginaler Adaptation ein so schlechtes Randschlussverhalten auf, dass die weitere Untersuchung im thermo-mechanischen Belastungstest entfiel.

**Abb. 9:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der drei Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsänder in der Versuchsgruppe III (Hermes / Hermes Bond). (Mittelwerte)

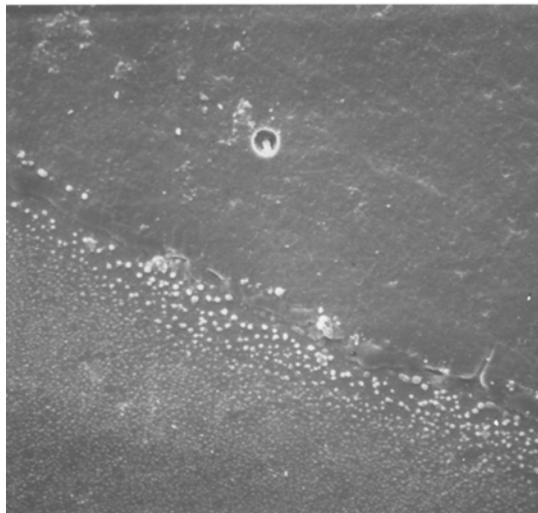


**Abb. 10:** : REM- Aufnahme eines dentinbegrenzten Füllungsrandes der Gruppe III (Hermes / Hermes Bond): „Randspalt“ bei 320facher Vergrößerung.

**Gruppe IV: In Ten-S / Syntac Classic**

In Abbildung 11 sind die Resultate der quantitativen Füllungsrandanalyse für die gesamte untersuchte Füllungsrandlänge im Bereich des Dentins der Gruppe IV (In Ten-S / Syntac Classic) graphisch dargestellt. Die Abbildung 12 zeigt ein repräsentatives Photo des Füllungsrandes in 320facher Vergrößerung. Bei den mit In Ten-S / Syntac Classic gefüllten Zähnen ließ sich im Vergleich zu den Versuchsgruppen I und II (Tetric Ceram / Syntac Classic) nach Applikation des Füllungsmaterials ein ähnlicher Wert des Anteils perfekter marginaler Adaptation von 48,7% feststellen. Infolge der thermo-mechanischen Belastungstests kam es zu einer Abnahme des Prozentanteils perfekter marginaler Adaptation auf 20,1% der gesamten Randlänge. Die prozentuale Häufigkeit des Kriteriums „Randspalt“ nahm infolge der In-vitro-Belastungstests von 9,1% auf 15,4% zu. Der prozentuale Anteil „marginale Unregelmäßigkeiten“ nahm von 39,9% nach Fertigstellen der Restaurationen auf 63,7% nach mechanischer Belastung zu.

**Abb.11:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der drei Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsänder in der Versuchsgruppe IV (In Ten-S / Syntac Classic). (Mittelwerte)

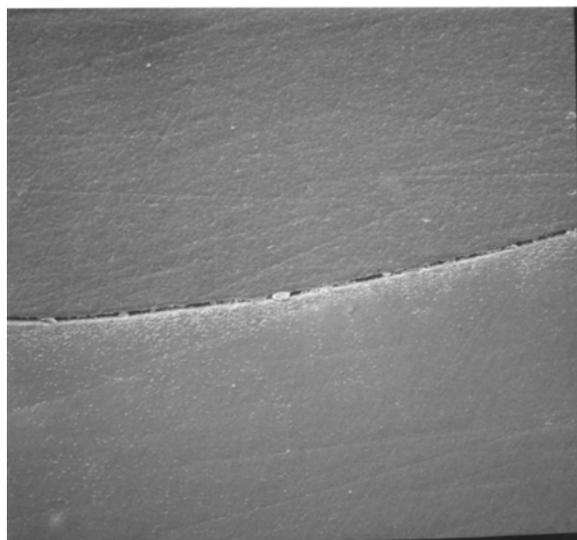


**Abb.12:** REM- Aufnahme eines dentinbegrenzten Füllungsrandes der Gruppe IV (In Ten-S / Syntac Classic) nach Abschluss der In-vitro-Belastungstests: „perfekter Rand“ bei 320facher Vergrößerung.

**Gruppe V: Admira / Admira Bond**

In Abbildung 13 sind die Resultate der quantitativen Füllungsrandanalyse für die gesamte untersuchte Füllungsrandlänge im Bereich des Dentins der Gruppe V (Admira / Admira Bond) graphisch dargestellt. Die Abbildung 14 zeigt ein repräsentatives Photo des Füllungsrandes in 200facher Vergrößerung. Der im Vergleich zu den übrigen fünf Versuchsgruppen bei weitem geringste Anteil perfekter marginaler Adaptation von nur 5,6% nahm nach thermischer Belastung auf 1,4% ab, so dass ein mechanischer Belastungstest entfiel. Entsprechend nahm die prozentuale Häufigkeit des Kriteriums „Randspalt“ von 49,5% auf 63,0% zu.

**Abb.13:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der drei Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsänder in der Versuchsgruppe V (Admira / Admira Bond). (Mittelwerte)

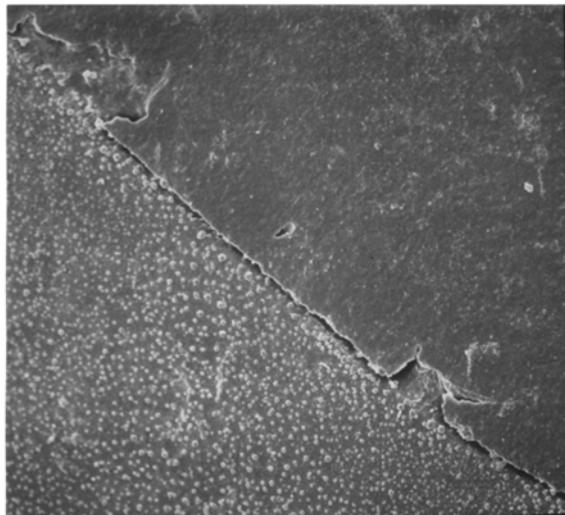


**Abb.14:** REM- Aufnahme eines dentinbegrenzten Füllungsrandes der Gruppe V (Admira / Admira Bond) nach Abschluss der In-vitro-Belastungstests: „Randspalt“ bei 200facher Vergrößerung.

**Gruppe VI: In Ten-S / Self Etch Prime & Bonding**

In Abbildung 15 sind die Resultate der quantitativen Füllungsrandanalyse für die gesamte untersuchte Füllungsrandlänge im Bereich des Dentins der Gruppe VI (In Ten-S / Self Etch Prime & Bonding) graphisch dargestellt. Die Abbildung 16 zeigt ein repräsentatives Photo des Füllungsrandes in 320facher Vergrößerung. Die thermische Wechselbelastung der Füllungen dieser Versuchsgruppe führte mit 34,3% zu keiner signifikanten Verschlechterung des Randschlusses von 34,5% nach Applikation des Füllungsmaterials. Nach mechanischer Belastung nahm der Anteil perfekter marginaler Adaptation allerdings ab auf 22,7%. Sowohl nach thermischer als auch nach mechanischer Druckbelastung kam es zu einer kontinuierlichen Erhöhung der Randspaltbildung von anfänglich 11,0% auf schließlich 30,0%.

**Abb.15:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der drei Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsråder in der Versuchsgruppe VI (In Ten-S / Self Etch Prime & Bonding). (Mittelwerte)



**Abb.16:** REM- Aufnahme eines dentinbegrenzten Füllungsrandes der Gruppe VI (In Ten-S / Self Etch Prime & Bonding) nach Abschluss der In-vitro-Belastungstests: „Marginale Unregelmäßigkeit im Übergang zu einem Randspalt“ bei 320facher Vergrößerung.

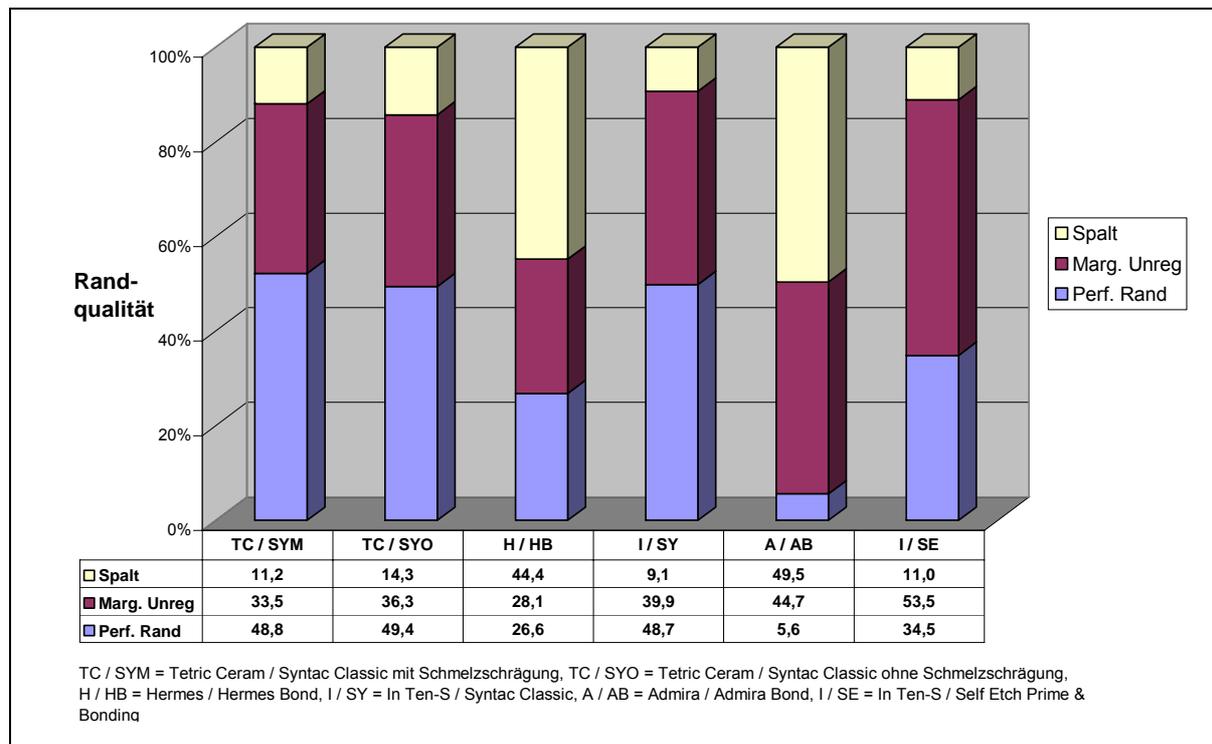
Die prozentuale Verteilung der verschiedenen Randkriterien bezogen auf die untersuchten dentinbegrenzten Füllungsråder ist in den Abbildungen 17 (nach Applikation des Füllungsmaterials), 18 (nach thermischer Belastung) und 19 (nach mechanischer Belastung) für alle Füllungsmaterialgruppen nochmals zusammenfassend graphisch dargestellt und erläutert.

Nach Fertigstellung der Restaurationen wiesen die Versuchsgruppen I, II, IV und VI vergleichbare Ergebnisse in Bezug auf die Randspaltbildung zwischen 9,1% und 14,3% auf. In Bezug auf die perfekten Randanteile wiesen die Gruppen I, II und IV die besten Ergebnisse zwischen 48,7% und 49,4% auf, gefolgt von Gruppe VI mit 34,5% perfekten Randanteilen. Bei den Versuchsgruppen III und V war dagegen schon vor thermo-mechanischer Belastung eine Spaltbildung auf über 40% der gesamten untersuchten Randlänge zu verzeichnen, so dass die thermo-mechanische Belastung der Versuchsgruppe III entfiel.

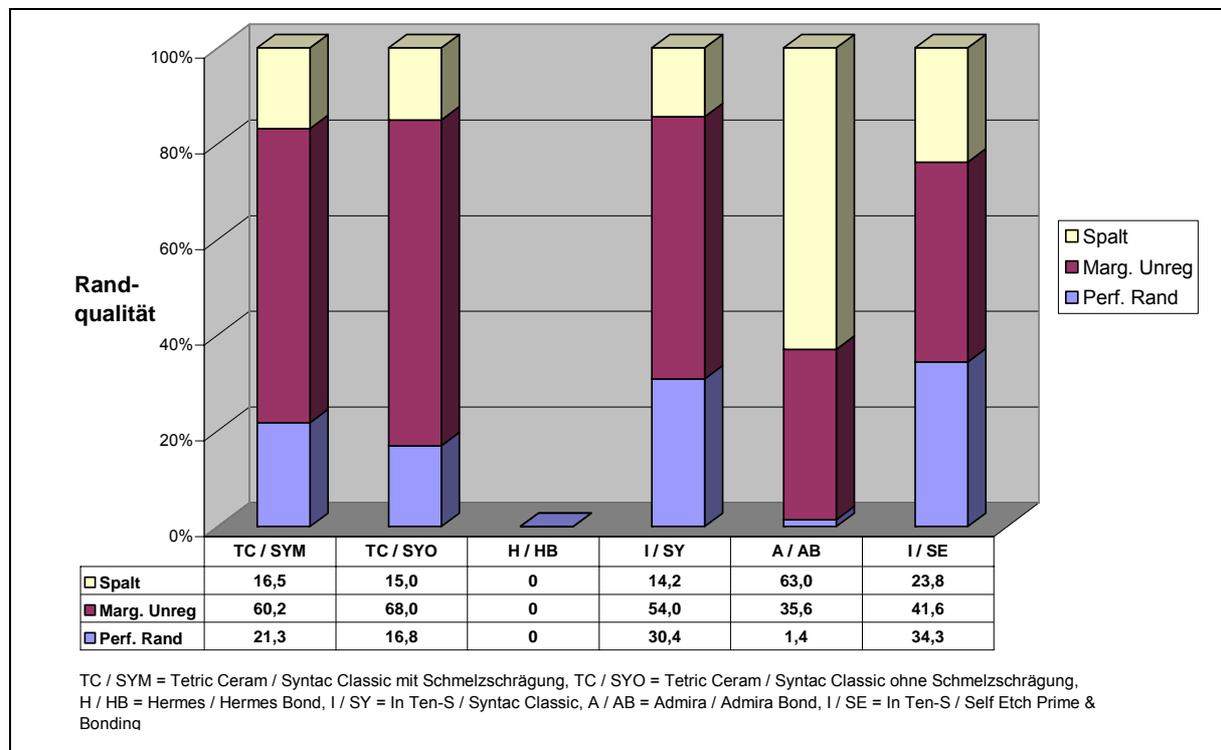
Nach thermo-mechanischer Belastung nahmen die perfekten Randanteile in den Gruppen I, II und IV zugunsten eines Anstiegs der marginalen Unregelmäßigkeiten deutlich ab, wobei die Randspaltbildung nur geringfügig zunahm. Dagegen blieb bei Gruppe VI der perfekte Randschluss unverändert, aber die Randspaltbildung verdoppelte sich. Bei Versuchsgruppe V stieg der Anteil an marginalen Randspalten auf über 60%, so dass eine mechanische Belastung entfiel.

Nach mechanischer Belastung wiesen die Gruppen I und IV die besten Ergebnisse auf bei nahezu unverändertem Anteil an Randspalten bei Gruppe IV (15,4%) und sogar vermindertem Randspaltenanteil von 9,2% zugunsten einer Zunahme der marginalen Unregelmäßigkeiten bei Gruppe I, gefolgt von Versuchsgruppe VI mit einer Abnahme der perfekten Randanteile und einer Zunahme der Randspalten um jeweils ca. 30%. Das letztendlich schlechteste Ergebnis lieferte im Vergleich zu den Gruppen I, IV und VI die Gruppe II mit einer Zunahme der Randspaltbildung um 100%.

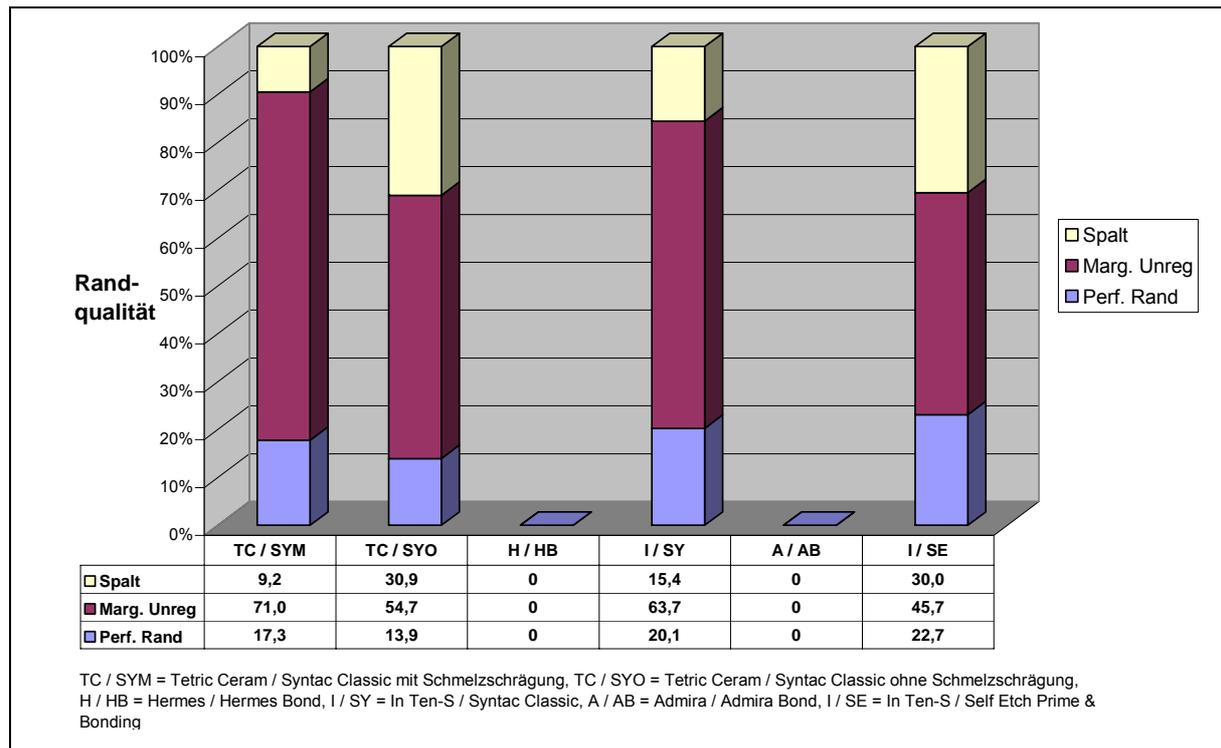
Eine Kontinuität in Bezug auf den perfekten Randschluss nach thermo-mechanischer Belastung konnte bei keiner der sechs Versuchsgruppen festgestellt werden, in Bezug auf die Randspaltbildung blieben die Werte bei Versuchsgruppe I und IV allerdings auch nach thermo-mechanischer Belastung stabil.



**Abb. 17:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsrandbereiche vor thermischer und mechanischer Belastung in den Versuchsgruppen I-VI. (Mittelwerte)



**Abb. 18:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsrandbereiche nach thermischer Belastung in den Versuchsgruppen I-VI. (Mittelwerte)



**Abb. 19:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Bewertungskriterien bezogen auf die dentinbegrenzten approximalen Füllungsrandbereiche nach mechanischer Belastung in den Versuchsgruppen I-VI. (Mittelwerte)

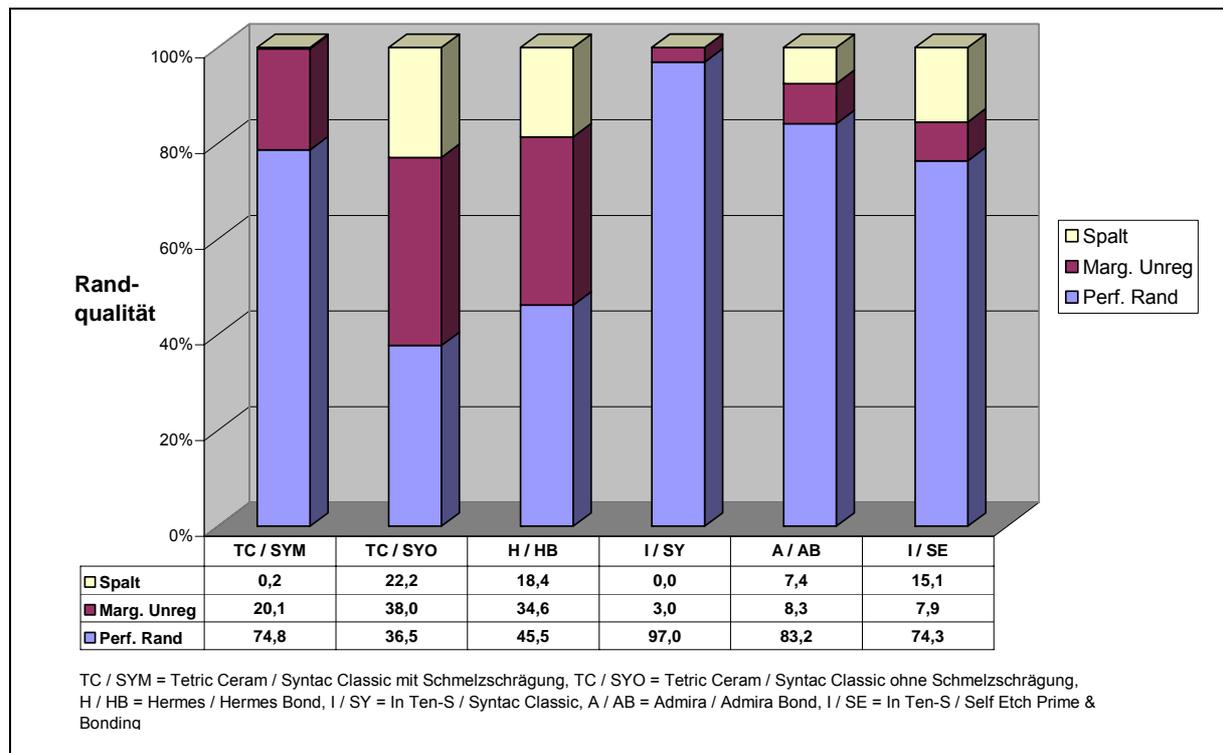
### 5.1.2 Randschlussverhalten im Bereich der approximal schmelzbegrenzten Restaurationsränder

Die prozentuale Verteilung der verschiedenen Randkriterien bezogen auf die untersuchten schmelzbegrenzten Füllungs­ränder ist in den Abbildungen 20 (nach Applikation des Füllungs­materials), 21 (nach thermischer Belastung) und 22 (nach mechanischer Belastung) für alle Füllungs­materialgruppen graphisch dargestellt. Die Abbildungen 23 und 24 zeigen repräsentative Photos der Füllungs­ränder in 200facher Vergrößerung.

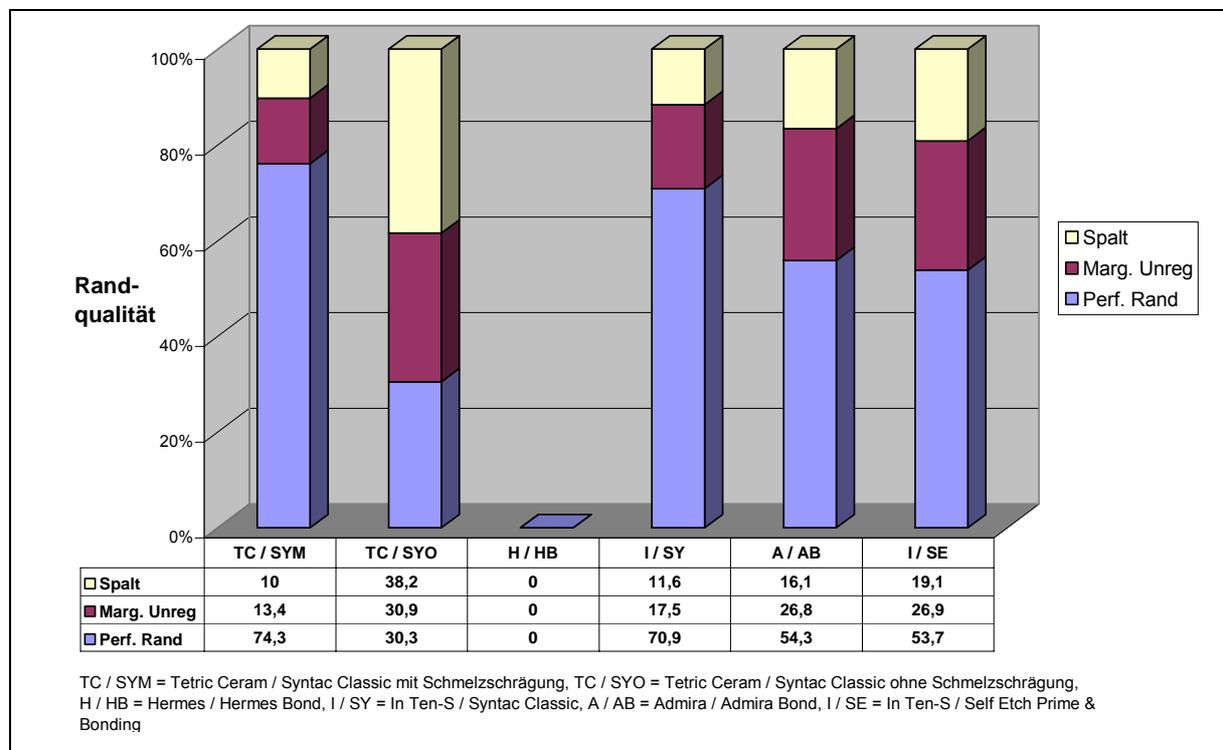
Nach Fertigstellung der Restaurationen wies die Versuchsgruppe IV mit 97% einen nahezu perfekten Randschluss über die gesamte untersuchte Randlänge auf, wobei die verbleibenden 3% auf marginale Unregelmäßigkeiten entfielen (Abb. 17). Bei der Versuchsgruppe V war vor Belastung ein perfekter Randschluss von 83,2% zu verzeichnen, welcher nach thermischer Belastung auf 54,3% sank bei einem um mehr als das Doppelte gestiegenen Anteil an Randspalten von 16,1%. Eine mechanische Belastung entfiel bei dieser Versuchsgruppe. Die Versuchsgruppen I

und VI wiesen einen nahezu gleichen Anteil an perfektem Randschluss von 74,8% bzw. 74,3% vor Belastung auf, wobei der Anteil an Randspalten gleichzeitig bei Versuchsgruppe I nur 0,2% und bei Versuchsgruppe VI 15,1% betrug. Nach thermo-mechanischer Belastung sank der Anteil an perfektem Rand bei der Gruppe I auf 66,5% und die Randspalten erhöhten sich auf einen Anteil von 5,8%, während bei der Gruppe VI eine Abnahme des perfekten Randschlusses auf 51,6% und eine Abnahme der Randspalten auf 11,2% zu verzeichnen war. Die Versuchsgruppe III wies bereits vor Belastung einen Anteil perfekten Randschlusses von nur 45,5% bei einem gleichzeitig bestehenden Randspaltanteil von 18,4% auf. Eine thermo-mechanische Belastung wurde nicht durchgeführt. Bei der Versuchsgruppe II, die in der Materialkombination der der Versuchsgruppe I entsprach, bei der jedoch keine Schmelzschrägung durchgeführt wurde, zeigte sich bereits vor Belastung ein Anteil von nur 36,5% an perfektem Randschluss bei gleichzeitiger Kumulation der Anteile an Randspalten und marginalen Unregelmäßigkeiten auf insgesamt 60,2% der untersuchten Randlänge.

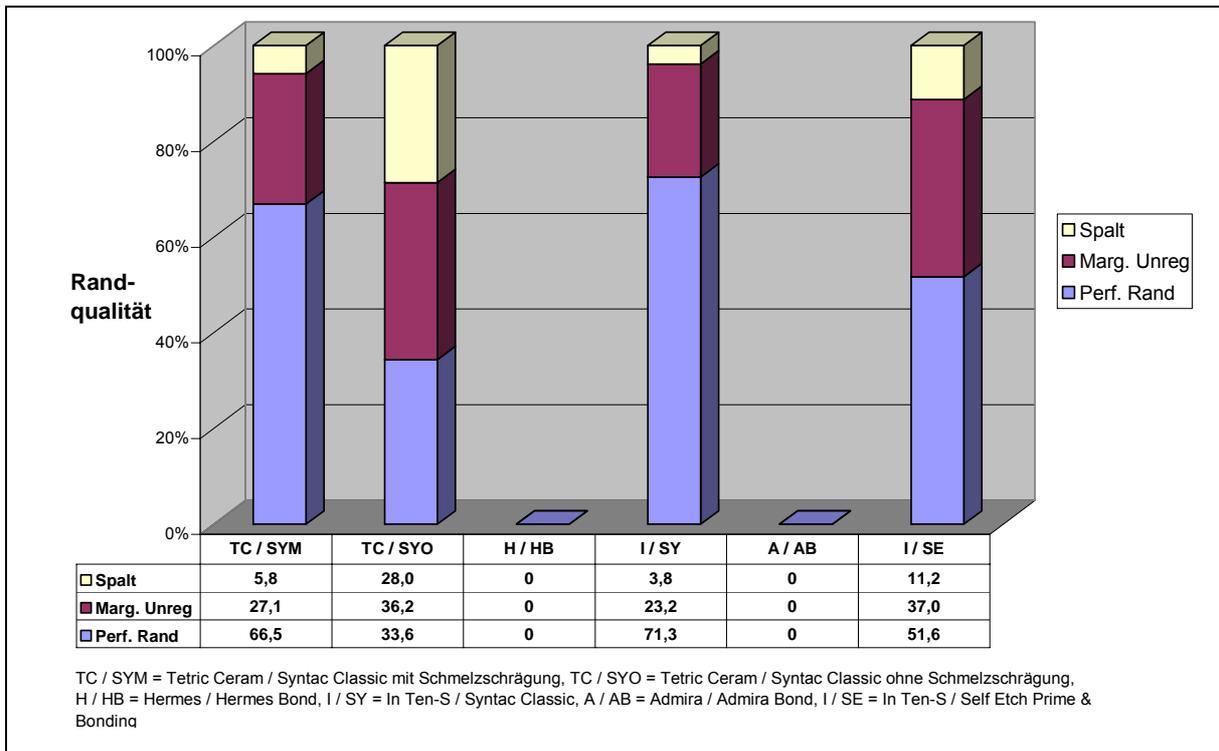
Eine Stagnation des Anteils an perfektem Randschluss bei wenigstens 90% nach thermo-mechanischer Belastung konnte bei keiner der sechs Versuchsgruppen festgestellt werden.



**Abb. 20:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Bewertungskriterien bezogen auf die schmelzbegrenzten approximalen Füllungsrandbereiche vor thermischer und mechanischer Belastung in den Versuchsgruppen I-VI. (Mittelwerte)



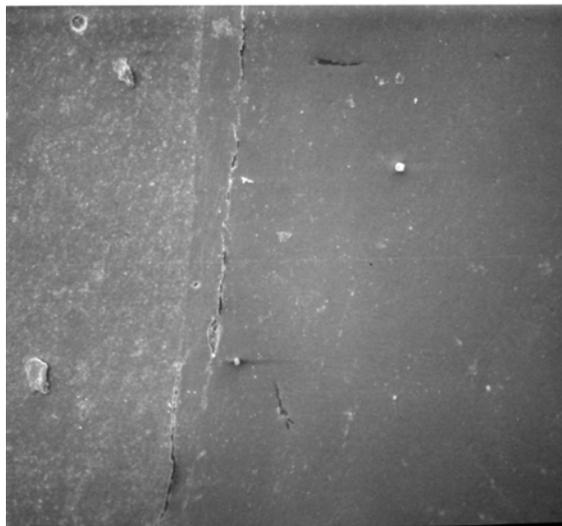
**Abb. 21:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Bewertungskriterien bezogen auf die schmelzbegrenzten approximalen Füllungsrandbereiche nach thermischer Belastung in den Versuchsgruppen I-VI. (Mittelwerte)



**Abb. 22:** Prozentuale Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Bewertungskriterien bezogen auf die schmelzbegrenzten approximalen Füllungsrandbereiche nach mechanischer Belastung in den Versuchsgruppen I-VI. (Mittelwerte)



**Abb. 23:** REM-Aufnahme eines approximal schmelzbegrenzten Füllungsrandes der Versuchsgruppe VI: „perfekter Rand“ zwischen Schmelz und Füllungsmaterial nach In-vitro-Belastung bei 200facher Vergrößerung.



**Abb. 24:** REM-Aufnahme eines approximal schmelzbegrenzten Füllungsrandes der Versuchsgruppe VI: „Randspalt“ zwischen Schmelz und Füllungsmaterial nach In-vitro-Belastung bei 200facher Vergrößerung.

## **5.2 Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse**

Die Ergebnisse der rasterelektronenmikroskopischen Füllungsranduntersuchung in den Versuchsgruppen I-VI wurden untereinander mit Hilfe des Kruskal-Wallis Tests analysiert und zwar separat für schmelz- und dentinbegrenzte Ränder und separat für den Randschluss nach Legen der Füllung, Thermocycling und mechanischer Belastung.

Mit Hilfe des Mann-Whitney-U-Tests wurde überprüft, ob infolge der thermo-mechanischen Belastung eine statistisch signifikante Verschlechterung der Randqualität zu verzeichnen war. Die einzelnen Versuchsgruppen wurden dabei paarweise miteinander verglichen.

Schließlich erfolgte ein Vergleich innerhalb der Gruppen vor, nach Thermobelastung und Mechanobelastung mit dem Wilcoxon-Test.

### **5.2.1 Statistische Auswertung der dentinbegrenzten Restaurationsränder**

In der Abbildung 25 sind die Veränderungen der Randständigkeit infolge der thermo-mechanischen Belastung im direkten Vergleich miteinander dargestellt. Der Vergleich der Gruppen I, II, IV und VI zeigt in der Tendenz die beste marginale Adaptation für die Gruppen I und IV.

Die Tabelle 1 listet die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die mittels rasterelektronenmikroskopischer Analyse gewonnenen Daten bezüglich des Randschlussverhaltens der dentinbegrenzten Füllungsänder in Bezug auf die perfekte marginale Adaptation auf. Ein statistisch signifikanter Unterschied im Randschlussverhalten beim Vergleich aller Versuchsgruppen I-VI ließ sich nur in Gruppe V feststellen.

Im Mann-Whitney-U-Test wurden die Versuchsgruppen folgendermaßen vor, nach thermischer und nach mechanischer Belastung paarweise miteinander verglichen: Gruppe I und II, Gruppe I und IV, Gruppe I und V und Gruppe IV und VI. Bei der Betrachtung der Versuchsgruppen I und II ergab sich in Bezug auf den dentinbegrenzten Füllungsrandbereich sowohl vor als auch nach Belastung kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen, ebenso beim Vergleich der Gruppe I und IV. Allerdings unterschied sich das Randschlussverhalten der Gruppe I und V im Dentin vor und nach thermischer Belastung statistisch signifikant voneinander. Der Vergleich der Gruppe IV und VI ergab sowohl vor als auch nach beiden Belastungstests keinen statistisch signifikanten Unterschied.

Im Wilcoxon-Test war beim Vergleich innerhalb der Gruppen eine signifikante Verschlechterung des Randschlussverhaltens der Restaurationen sowohl durch die Thermobelastung als auch durch die Mechanobelastung zu verzeichnen.

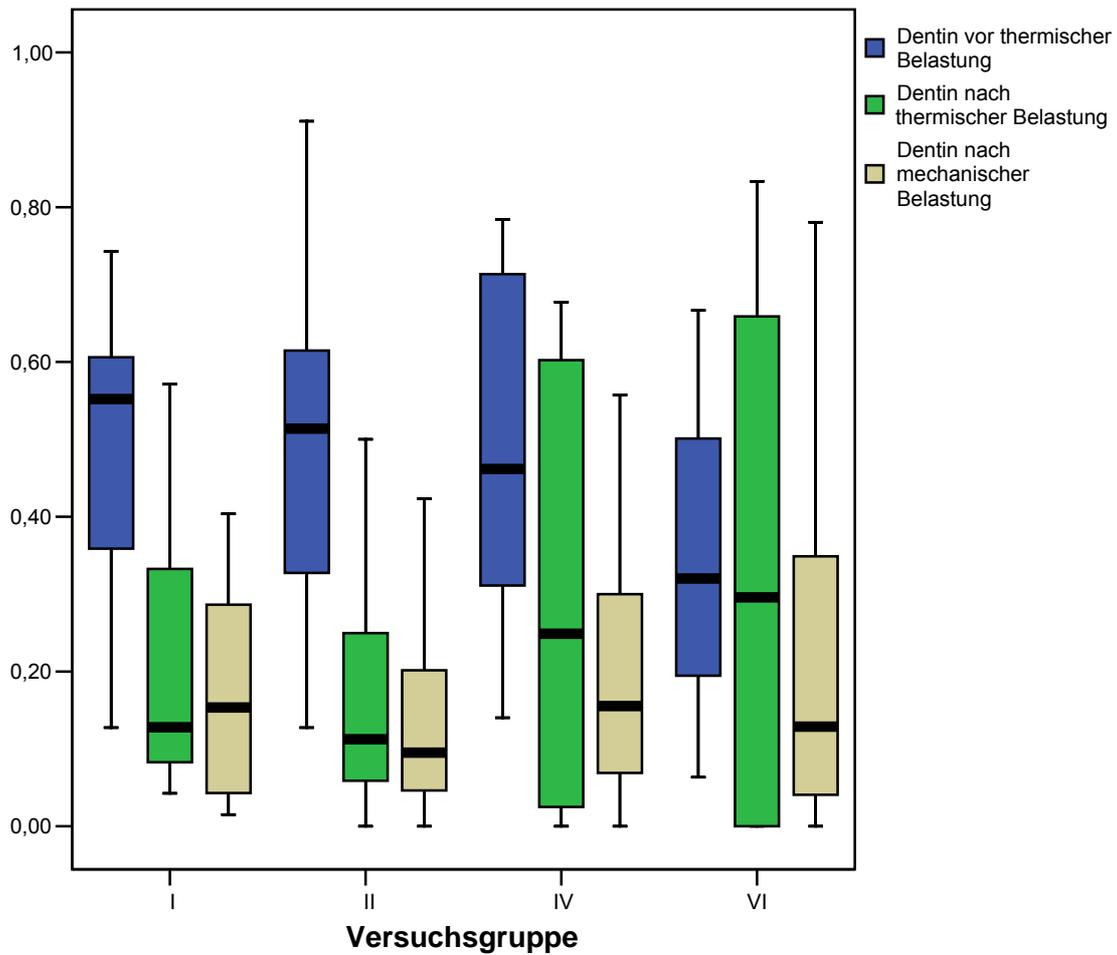
**Tabelle 1:** Ergebnisse der statistischen Analyse: Abnahme der perfekten marginalen Adaptation am dentinbegrenzten zerviko-approximalen Restaurationsrand infolge der In-vitro-Belastungen.

Gruppe	I	II	III	IV	V	VI
V	ns	ns	ns	ns	s	ns
T	ns	ns	-	ns	s	ns
M	ns	ns	-	ns	-	ns

V = vor Belastung, T = nach thermischer Belastung, M = nach mechanischer Belastung.

s = signifikanter Unterschied für  $p \leq 0,05$

ns = kein signifikanter Unterschied



**Abb. 25:** Boxplotdiagramm für die Anteile „perfekter Rand“ in % der Randlänge im Dentin nach In-vitro-Belastung. (Balken = Median, Kasten = 25. Perzentil bis 75. Perzentil, Minimum- / Maximumwerte)

I = Tetric Ceram / Syntac Classic mit Schmelzschrägung, II = Tetric Ceram / Syntac Classic ohne Schmelzschrägung, IV = In Ten-S / Syntac Classic mit Schmelzschrägung, VI = In Ten-S / Self Etch Prime & Bonding mit Schmelzschrägung

### **5.2.2 Statistische Auswertung der approximal schmelzbegrenzten Restaurationsränder**

In der Abbildung 26 sind die Veränderungen der Randständigkeit infolge der thermo-mechanischen Belastung im direkten Vergleich miteinander dargestellt. Der Vergleich der Gruppen I-VI zeigt in der Tendenz die beste marginale Adaptation für die Gruppen I und IV.

Die Tabelle 2 listet die Ergebnisse der statistischen Auswertung für die mittels rasterelektronenmikroskopischer Analyse gewonnenen Daten bezüglich des Randschlussverhaltens der dentinbegrenzten Füllungs-ränder in Bezug auf die perfekte marginale Adaptation auf. Ein statistisch signifikanter Unterschied im Randschlussverhalten beim Vergleich aller Versuchsgruppen I-VI ließ sich in den Gruppen II und III feststellen.

Im Mann-Whitney-U-Test wurden die Versuchsgruppen folgendermaßen vor, nach thermischer und nach mechanischer Belastung paarweise miteinander verglichen: Gruppe I und II, Gruppe I und IV, Gruppe I und V und Gruppe IV und VI. Bei der Betrachtung der Versuchsgruppen I und II ergab sich in Bezug auf den schmelzbegrenzten Füllungsrandbereich sowohl vor als auch nach Belastung ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen beiden Gruppen. Beim Vergleich der Gruppe I und IV ergab sich vor Belastung ebenfalls ein signifikanter Unterschied im Randschlussverhalten zwischen beiden Gruppen, nach thermo-mechanischer Belastung war der Unterschied allerdings nicht mehr signifikant. Bei Gruppe I und V ergab sich sowohl vor als auch nach thermischer Belastung kein signifikanter Unterschied zwischen beiden Versuchsgruppen. Beim Vergleich der Gruppe IV und VI ergab sich vor thermo-mechanischer Belastung ein signifikanter Unterschied, der allerdings sowohl nach thermischer als auch nach mechanischer Belastung nicht mehr signifikant war.

Im Wilcoxon-Test war beim Vergleich innerhalb der Gruppen eine signifikante Verschlechterung des Randschlussverhaltens sowohl durch die Thermobelastung als auch durch die Mechanobelastung zu verzeichnen.

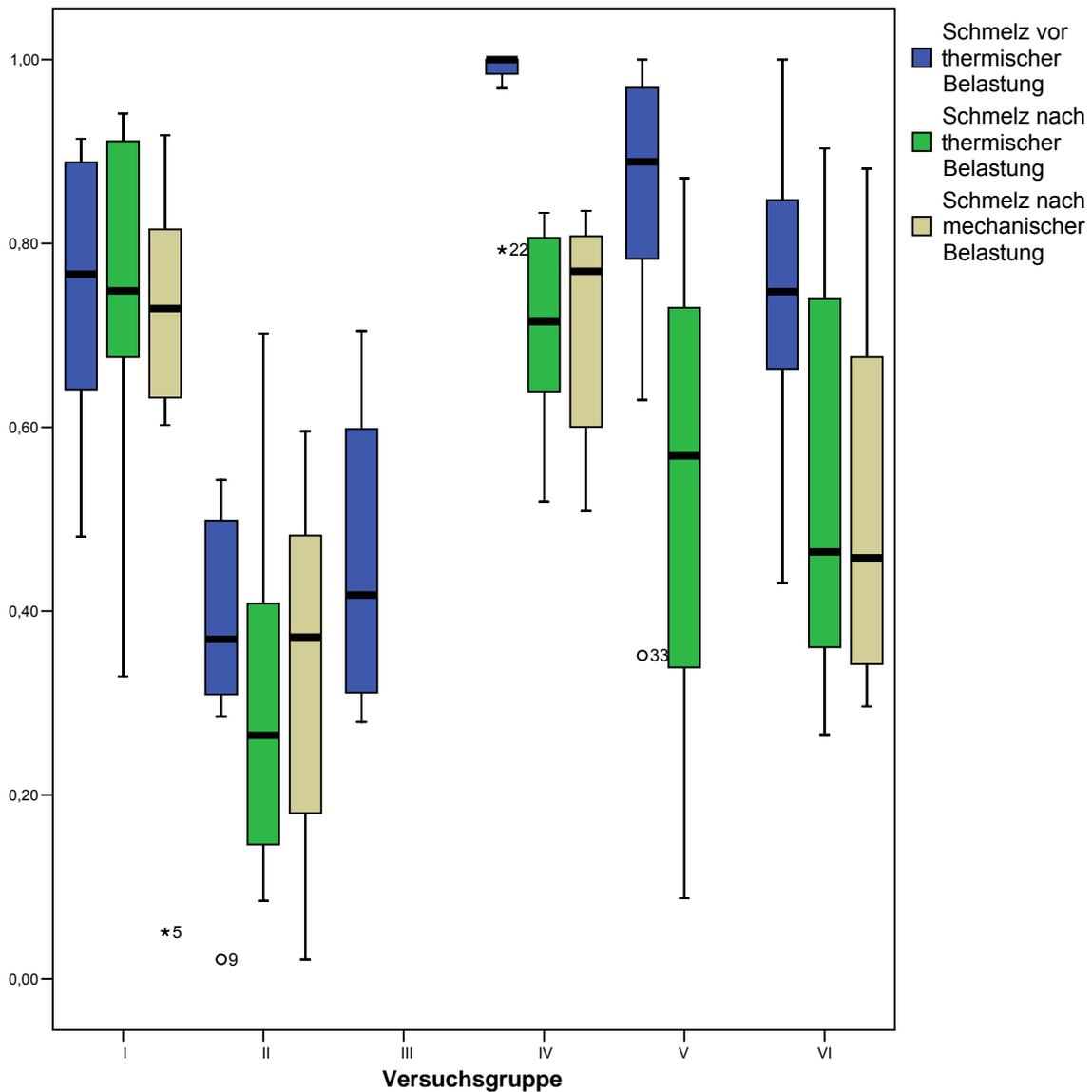
**Tabelle 2:** Ergebnisse der statistischen Analyse: Abnahme der perfekten marginalen Adaptation am schmelzbegrenzten approximalen Restaurationsrand infolge der In-vitro-Belastungen.

Gruppe	I	II	III	IV	V	VI
V	ns	s	s	ns	ns	ns
T	ns	s	-	ns	ns	ns
M	ns	s	-	ns	-	ns

V = vor Belastung, T = nach thermischer Belastung, M = nach mechanischer Belastung.

s = signifikanter Unterschied für  $p \leq 0,05$

ns = kein signifikanter Unterschied



**Abb. 26:** Boxplotdiagramm für die Anteile „perfekter Rand“ in % der Randlänge im Schmelz nach In-vitro-Belastung. (Balken = Median, Kasten = 25. Perzentil bis 75. Perzentil, Minimum- / Maximumwerte)

I = Tetric Ceram / Syntac Classic mit Schmelzschrägung, II = Tetric Ceram / Syntac Classic ohne Schmelzschrägung, III = Hermes / Hermes Bond mit Schmelzschrägung, IV = In Ten-S / Syntac Classic mit Schmelzschrägung, V = Admira / Admira Bond mit Schmelzschrägung, VI = In Ten-S / Self Etch Prime & Bonding mit Schmelzschrägung

## **6 Diskussion**

### **6.1 Diskussion von Material und Methode**

#### **6.1.1 Versuchsaufbau**

Die Proben in dieser Untersuchung wurden bis zur Präparation der Kavitäten in einer desinfizierenden wässrigen Alkohollösung gelagert und nach der Präparation in einer antimykotisch wirkenden 0,1%igen Thymollösung aufbewahrt, wobei die Zähne mindestens 24 Stunden vor der Applikation der Füllungen in reinem Wasser gelagert wurden. Mit der Lagerung der Proben in wässrigen Lösungen während der gesamten Versuchsdauer sollte die Austrocknung der Zahnhartsubstanz verhindert und Quelleffekte der verwendeten Füllungsmaterialien durch Wasseraufnahme (THORSTENSON und BRÄNNSTRÖM 1988, HANNIG et al. 1994, ATTIN et al. 1995, KULLMANN 1990, THONEMANN et al. 1997) sowie daraus resultierende hydrolytische Degradationsvorgänge, welche die Randqualität beeinflussen können, in vitro simuliert werden (KEMP-SCHOLTE und DAVIDSON 1989, KULLMANN 1990).

Nach wie vor ist die Herstellung absolut randspaltfreier Kompositrestaurationen nicht möglich (HANNIG und FRIEDRICHS 2001a). Eine initial randspaltfreie Kompositfüllung nach ihrer Applikation ist in der Mundhöhle neben thermischen und chemischen Degradationsprozessen auch okklusalen Belastungen ausgesetzt, die letztendlich zur Ausbildung von Randundichtigkeiten und damit zu Nebenwirkungen wie postoperative Hypersensitivität, Sekundärkaries und Randverfärbungen führen können (HANNIG und FRIEDRICHS 2001a).

In diversen Studien konnte nachgewiesen werden, dass eine kaufunktionelle Belastung des adhäsiven Verbundes zur Randspaltbildung beitragen kann und die belastungsinduzierte marginale Desintegration von Klasse-II-Kompositfüllungen bevorzugt am approximal dentinbegrenzten Füllungsrand der Kavität auftritt (DAVIDSON 1993, BOTT und HANNIG 1995, DA CUNHA MELLO et al. 1997, HANNIG et al. 1999a, HANNIG und BOTT 2000).

Zur Erhaltung klinisch relevanter Daten ist es daher wichtig, die stomatologischen Einflussfaktoren so genau wie möglich zu simulieren (KREJCI et al. 1990a).

Mit der Wahl der in dieser Studie verwendeten Belastungsapparatur wurde den Anforderungen, die KREJCI und LUTZ (1990a) für die In-vitro-Testung dentaler Restaurationssysteme aufstellten, weitgehend Rechnung getragen. Im Gegensatz zu der von KREJCI und LUTZ (1990a) verwendeten Apparatur, welche gleichzeitig die

mechanische und thermische Belastung simuliert, wurde für diese Untersuchung ein zweizeitiges Verfahren gewählt, um zeigen zu können, welchen Einfluss die jeweilige Belastungskomponente auf die Randqualität der Klasse-II-Restaurationen hat.

Die thermische Wechselbelastung wurde in einer Apparatur durchgeführt, die durch wechselnde Temperatur des die Probenzähne umspülenden Wassers den Einfluss der unterschiedlichen Expansionskoeffizienten von Zahnhartgewebe und Füllungsmaterial auf den Komposit-Dentinverbund aufzeigen sollte. Der Temperaturwechsel wurde in einem Temperaturbereich von 5°C auf 55°C analog zu KREJCI et al. (1990a) durchgeführt, wobei eine Verweildauer von 60 Sekunden pro Bad eingehalten wurde, um eine ausreichende Temperaturangleichung der Proben zu gewährleisten. Eine Temperaturdifferenz von 50°C über 2500 Zyklen, welche ebenfalls in dieser Studie erfolgten, wird von LÖSCHE (1991) als ausreichend angesehen, um die den adhäsiven Verbund beeinträchtigende thermische Belastung zu simulieren.

Die anschließende okklusale Druckbelastung wurde in einem von HANNIG et al. (1991) und WEINLE (1993) entwickelten Kaukraftsimulator auf die Restaurationen übertragen. Die Belastung der Proben mit etwa 70 N, in dieser Studie 100 N bei 500 000 Zyklen, stellt eine ausreichende Prüfung des adhäsiven Verbundes dar, wenn man von einer physiologischen Kaukraft von 20 bis 40 N ausgeht (EICHNER 1963, GLOCKNER et al. 1998). Eine Belastung über eine Dauer von 500 000 mechanischen Kauzyklen entspricht nach KREJCI und LUTZ (1990b) einer Liegedauer in der Mundhöhle von ca. zwei Jahren.

### **6.1.2 Füllungstechnik**

Die in dieser Untersuchung verwendeten Materialien bildeten einen Querschnitt aus den zurzeit marktüblichen Kompositen und Adhäsivsystemen. Zusätzlich wurde ein derzeit noch nicht kommerziell verfügbares Komposit auf Epoxidharzbasis mit dem adäquaten Adhäsivsystem untersucht.

In Kombination mit dem Verwendung findenden Komposit muss stets ein geeignetes Adhäsivsystem verwendet werden, da die Haftung von Kompositen an Schmelz und Dentin ohne entsprechende Konditionierung unzureichend ist (MANHART et al. 1999, VAN MEERBEEK et al. 1994).

Im zervikalen dentinbegrenzten Kavitätenrandbereich wurde eine stumpfwinklige Präparation gewählt, um der Polymerisationsschrumpfung des Kompositmaterials

und damit der Randspaltbildung entgegenzuwirken (DAVIDSON, DE GEE und FEILZER 1984, FEILZER, DE GEE und DAVIDSON 1987).

Im Bereich der approximal schmelzbegrenzten Kavitätenränder wurde zur Erzielung eines belastungsstabilen Verbundes eine Schmelzschrägung auf einer Breite von ca. 0,5 mm präpariert. Durch die Randschrägung werden die Schmelzprismen vorzugsweise quer zu ihrer Verlaufsrichtung angeschnitten, was ideale Bedingungen für die adhäsive Verankerung von Kompositfüllungen darstellt (CHEUNG 1990, HANNIG 1994b). Das nach Säurekonditionierung resultierende mikroretentive Ätzmuster ermöglicht bei gleichzeitiger Oberflächenvergrößerung eine effektive, randdichte Verankerung des Komposits am Zahnschmelz (LUESCHER et al. 1977, MUNECHIKA et al. 1984, MOORE und VANN 1988, DIETSCHI et al. 1995b, OPDAM et al. 1998, HILTON und FERRACANE 1999). Die Anshrägung der Kavitätenränder auf einer Breite von 0,5 mm wird generell für die adhäsive Restauration von Klasse-II-Kavitäten mit plastischen Füllungsmaterialien gefordert (LUESCHER et al. 1977, MUNECHIKA et al. 1984, PORTE et al. 1984, BEN-AMAR, METZGER und GONTAR 1987, HINOURA, SECTOS und PHILLIPS 1988, MOORE und VANN 1988, DIETSCHI et al. 1995b).

Je nach Kavitätenkonfiguration treten bei der Polymerisation des Komposits unterschiedlich starke Schrumpfungsspannungen auf. Das Ausmaß der Polymerisationsschrumpfungsspannungen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie der zu polymerisierenden Materialmenge, der Insertionstechnik und den Fließeigenschaften des Komposits bzw. der Kavitätenkonfiguration. Die resultierende Schrumpfungsspannung innerhalb der Füllung ist abhängig von dem Verhältnis gebundener zu nicht gebundener Oberfläche, auch Konfigurationsfaktor (C-Faktor) genannt (DAVIDSON, DE GEE und FEILZER 1984, FEILZER, DE GEE und DAVIDSON 1987). Je größer die gebundene im Verhältnis zur ungebundenen Oberfläche wird, desto größer werden der Konfigurationsfaktor und damit die Schrumpfungsspannung.

Zur Applikation der verschiedenen Komposite wurde in allen sechs Versuchsgruppen daher die Inkrementschichttechnik angewendet: die erste Schichtung erfolgte mit nur 1 mm Schichtstärke horizontal am tiefsten Punkt des approximalen Kastens der Kavität, wo die gebundene Oberfläche im Verhältnis zur ungebundenen Oberfläche sehr groß ist. Alle weiteren Inkremente wurden dann keilförmig in die Kavität appliziert, um den Konfigurationsfaktor möglichst klein zu halten. Zur Gewährleistung einer vollständigen Durchhärtung der Füllungsmaterialien während der

Lichtpolymerisation wurde dabei eine Schichtstärke von 2 mm bei der Applikation der Inkremente nicht überschritten (ATTIN und BUCHALLA 1998).

Im Rahmen der vorgestellten Fülltechnik konnte eine geringfügige Überschussbildung bei der Applikation der Füllungsmaterialien nicht immer vermieden werden. Die Ausarbeitung der approximalen Füllungsflächen erfolgte daher unter direkter Sicht und eine abschließende Kontrolle unter dem Auflichtmikroskop, um die für die rasterelektronenmikroskopische Randanalyse störenden Kompositüberhänge am Füllungsrandbereich abzutragen (HALLER und TROJANSKI 1998, HANNIG und BOTT 2000).

### **6.1.3 Beurteilung der marginalen Adaptation**

Zur Bewertung der durchgeführten Füllungstherapie im Hinblick auf Erfolg oder Misserfolg bezog sich die Untersuchung auf die Randständigkeit der Klasse-II-Restaurationen.

Die rasterelektronenmikroskopische Füllungsrandanalyse stellt ein Standardverfahren zur In-vitro-Evaluation adhäsiver Restaurationstechniken dar (BLUNCK und ROULET 1989, DIETSCHI et al. 1995b, KREJCI 1992), wobei sich die Beurteilung der Randqualität in Verbindung mit der Replikatechnik bewährt hat (SEICHTER und HERFORTH 1980, NOACK 1988). Diese Technik erlaubt eine exakte und zuverlässige Analyse und Bestimmung der Gesamttrandlänge einer Füllung und die Vermessung der Randspaltweite. Mit der Anfertigung von Replikamodellen, die durch Abformung der Probenzähne und Ausgießen des gewonnenen Negativs mit einem Epoxidharz erstellt werden, besteht die Möglichkeit, einen einzelnen Probenzahn vor und nach den Belastungstests beurteilen zu können. Dagegen ist bei einer Betrachtung der Originalproben im Rasterelektronenmikroskop unter der Einwirkung eines Hochvakuums mit artifiziellen Rissen und Spalten in den Zahnhartgeweben und Füllungsmaterialien oder an deren Grenzflächen zu rechnen (REINHARDT et al. 1984). Eine Verwendung der Probenzähne für weitere Untersuchungen wäre damit ausgeschlossen.

## **6.2 Diskussion der Ergebnisse**

### **6.2.1 Diskussion der Ergebnisse für die dentinbegrenzten Füllungsrandareale**

#### **Zusammenhang zwischen der Anwendung der Inkrementschichttechnik und der Kavitätenkonfiguration**

Zahlreiche In-vitro- und In-vivo-Studien haben gezeigt, dass an dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten selbst mit modernen Mehr-Schritt-Adhäsivsystemen kein vollständig spaltfreier und dichter Randschluss erzielt werden kann (SCHUCKAR 1997, HALLER 1998, HILTON 1999, SZEP et al. 2001).

Ein entscheidender Faktor, der sich negativ auf das Randschlussverhalten von Kompositfüllungen auswirkt, ist die Polymerisationsschrumpfung des Kompositmaterials (PEUTZFELDT und ASMUSSEN 2004).

Während der Polymerisation von Kompositen konkurriert der Schrumpfstress mit dem Komposit-Dentin-Verbund, so dass Randspaltbildungen unter anderem in Abhängigkeit von der Kavitätenkonfiguration und der Restaurationstechnik entstehen können.

Durch die Dreidimensionalität von Klasse-II-Kavitäten besteht hier ein großer Konfigurationsfaktor, da das Verhältnis ungebundener zu gebundener Oberfläche sehr ungünstig ist. Daraus resultiert ein relativ hoher Polymerisationsstress, der sich negativ auf den Komposit-Dentin-Verbund auswirkt (YOSHIKAWA et al. 1999).

Die Applikation großer Mengen lichthärtender Komposite in kastenähnliche Kavitäten führt zur Maximierung der Konkurrenz zwischen Polymerisationsschrumpfung und Komposit-Dentin-Verbund (DAVIDSON et al. 1984, DAVIDSON und DE GEE 1984, FEILZER et al. 1987, 1988, 1990, DAVILLIER 2000). Auch eine Studie von NIKOLAENKO et al. 2004 bestätigt den Konfigurationsfaktor als beeinflussenden Faktor für die Dentinadhäsion. Allerdings könnten durch eine geeignete Füllungstechnik trotzdem hohe Haftfestigkeitswerte in tiefen Kavitäten erreicht werden.

Eine Möglichkeit zur Verringerung des Ausmaßes an Polymerisationsschrumpfstress ist die Anwendung der Inkrementschichttechnik. Sie ist charakterisiert durch horizontale und keilförmige Insertionen möglichst kleiner Materialmengen und deren schichtweise Aushärtung, um den Konfigurationsfaktor und damit den Polymerisationsschrumpfstress größtmöglich zu minimieren (FEILZER et al. 1987, BOUSCHLICHER et al. 1997).

Die Anwendung der Inkrementschichttechnik resultiert in einer sehr geringen Polymerisationsschrumpfung in jedem einzelnen Inkrement, weil nur ein kleiner Konfigurationsfaktor in Bezug zu einer großen ungebundenen Oberfläche entsteht, welche dem Komposit ein Fließen während der Polymerisation erlaubt (RUPP 1979). Diese Resultate differieren mit Ergebnissen anderer Studien, in denen geringe Stresswerte bei Applikation großer Kompositmengen in Klasse-V-Kavitäten im Vergleich zu drei horizontalen und drei keilförmigen Inkrementen gefunden wurden (WINKLER et al. 1996). Daher wird der Vorteil der Inkrementfülltechnik zur Reduktion des Polymerisationsstresses kontrovers diskutiert (VERSLUIS et al. 1996).

In der vorliegenden Studie reichte die Spannweite der Ergebnisse bezogen auf die approximal dentinbegrenzten Füllungsänder von 22,7% (Gruppe VI: In Ten-S / Self Etch Prime & Bonding) bis 13,9% (Gruppe II: Tetric Ceram / Syntac Classic) perfekten Randschlusses nach thermo-mechanischer Belastung der mittels Inkrementschichttechnik gelegten Füllungen.

In den sechs Versuchsgruppen konnte mit keiner der unter Anwendung der Inkrementschichttechnik gelegten Restaurationen ein vollständig spaltfreier Randschluss erzielt werden, weder vor noch nach thermo-mechanischer Belastung.

Bereits nach Applikation der Füllungsmaterialien traten infolge der Abbindeschrumpfung in allen sechs Versuchsgruppen unterschiedlich hohe Anteile an Randspalten von 9,1% (Gruppe IV: In Ten-S / Syntac Classic) bis 49,5% (Gruppe V: Admira / Admira Bond) auf. Infolge thermischer und mechanischer Wechselbelastung kam es bei den Füllungen der Versuchsgruppen I und IV zu keiner bzw. geringfügiger, bei den Füllungen der Versuchsgruppen II, V und VI zu einer deutlichen Zunahme der marginalen Randspaltbildung um zum Teil das Doppelte (VG II) bzw. fast das Dreifache des Ausgangswertes (VG VI).

### **Betrachtung der unterschiedlichen Materialgruppen**

Bei Verwendung des Mehrkomponenten-Dentinadhäsivs *Syntac Classic* mit „selektiver“ Schmelzätzung wurde in den Versuchsgruppen I und IV nach thermo-mechanischer Belastung der geringste Anteil an marginalen Randspalten mit 9,2% bzw. 15,4% erzielt. Dagegen kam es in der Versuchsgruppe II mit unterlassener Schmelzrandschrägung zu einer wesentlich größeren Randspaltbildung von 30,9%, die mit der in Versuchsgruppe VI bei der Verwendung des selbstkonditionierenden Adhäsivsystems *Self Etch Prime & Bond* vergleichbar ist.

Die Ursache für die vermehrte Randspaltbildung in Versuchsgruppe II im Vergleich zur Versuchsgruppe I trotz Verwendung desselben Restaurationsmaterials in beiden Versuchsgruppen könnte in einer belastungsinstabilen Verankerung der Kompositfüllung durch die unterlassene Schmelzrandschrägung liegen. Die Schrägung des Schmelzrandes führt zu einem senkrechten Anschnitt der Schmelzprismen und somit zu einer besseren Ätzwirkung im Vergleich zu lateral getroffenen Schmelzprismen. Nach Säurekonditionierung entsteht ein mikroretentives Ätzmuster in der Schmelzoberfläche, welches dem Schmelzhaftvermittler eine mikromechanische Haftung ermöglicht (geometrische Effekte) und zu dessen Aufschumpfen auf die Schmelzzotten führt (rheologischer Effekt). Dies ist eine Voraussetzung für eine effektive, randdichte Verankerung des Komposits am Zahnschmelz (LUESCHER et al. 1977, MUNECHIKA et al. 1984, MOORE und VANN 1988). Die Randspaltfreiheit einer Klasse-II-Restauration unterhalb der Schmelz-Zementgrenze hängt davon ab, wie sich das Dentinadhäsiv verhält in Bezug auf die mikromechanische Verankerung und damit die Widerstandsfähigkeit gegenüber Polymerisationsschrumpfung und thermo-mechanischer Belastung des Komposits (RETIEF 1994).

Auffällig war, dass in der Gruppe I der Anteil an Randspalten nach okklusaler Druckbelastung im dentinbegrenzten Füllungsareal geringfügig abnahm. Dieses Phänomen wurde in einer Untersuchung von FRANKENBERGER et al. 2005 bestätigt, bei der die Tendenz zur Abnahme der Spaltbildung bei zunehmender thermomechanischer Belastung auch für *Syntac Classic* erkennbar war. Wahrscheinlich sind diese Erscheinungen auf eine Quellung der Kunststoffmatrix infolge der feuchten Lagerung während der gesamten Studie zurückzuführen (KULLMANN 1990, LOHER et al. 1997). Eine Untersuchung von HANNIG et al. (1994a) bestätigt jedoch, dass dem Effekt der Wasserquellung von Kompositfüllungen nur eine geringe Relevanz für die Verbesserung des Randschlusses beizumessen ist.

Die Versuchsergebnisse der Versuchsgruppe IV sind mit denen der Versuchsgruppe I vergleichbar. Auch hier kam das Mehrkomponenten-Dentinadhäsiv *Syntac Classic* mit „selektiver“ Schmelzätzung zum Einsatz, allerdings in Kombination mit dem Nanofüllerkomposit *In Ten-S* im Gegensatz zu dem in Versuchsgruppe I und II verwendeten Hybridkomposit *Tetric Ceram*. Im Vergleich ergaben sich in beiden

Versuchsgruppen nahezu gleiche Werte in Bezug auf die dentinbegrenzten perfekten Randanteile, sowohl nach thermischer als auch nach mechanischer Belastung fielen die Ergebnisse für die Versuchsgruppe IV geringfügig besser aus als für die Versuchsgruppe I. Dies könnte sich erklären aus einem etwa dreißig Prozent niedrigeren Polymerisationsschrumpungsstress des Nanofüllers gegenüber einem Hybridkomposit (ERNST et al. 2003 und 2004).

Die Füllungen der Versuchsgruppe V (*Admira / Admira Bond*) weisen neben denen der Versuchsgruppe III die mit Abstand weitest schlechtesten Ergebnisse hinsichtlich der marginalen Adaptation im Vergleich zu allen übrigen Versuchsgruppen auf. Die Anteile an Randspalten liegen schon vor thermomechanischer Belastung bei fast 50% der dentinbegrenzten Füllungsrandareale und sind damit signifikant höher bei diesem Zwei-Schritt-Totalätzsystem *Admira Bond* im Vergleich zu dem Drei-Schritt-System *Syntac Classic*. Es handelt sich bei dem verwendeten Ein-Komponenten-Haftvermittler *Admira Bond* um ein sogenanntes „selbstprimendes Adhäsiv“, welches den Priming- und Bondingschritt vereinigt und nach dem Prinzip der „Total-Etch“-Technik arbeitet. Dadurch entfällt im Vergleich zu *Syntac Classic* ein Arbeitsschritt.

Die Resultate der Gruppe V spiegeln die Feststellungen unterschiedlicher Autoren wider, dass die Vereinfachung von Arbeitsschritten mit Qualitätseinbußen einhergehen kann (FRANKENBERGER et al. 1996b, REINHARDT 1997, FRANKENBERGER et al. 1999 a und b, HALLER und TROJANSKI 1998, HALLER und FRITZENSCHAFT 1999, ERNST 2001). In anderen Studien zeigten Haftfestigkeitsmessungen für die Zwei-Schritt-Totalätzsysteme geringere Haftwerte und stärkere Schwankungen der Messwerte im Vergleich zu den Drei-Schritt-Systemen (BLUNCK und ROULET 2002, INOUE et al. 2001, HALLER und FRITZENSCHAFT 1999). Langzeitversuche in vitro bestätigen sowohl im Randverhalten als auch in den Haftwerten schlechtere Prognosen für die Zwei-Schritt-Systeme als für Bondingsysteme, bei denen eine getrennte Applikation von Primer und Adhäsiv erfolgt (MIYAZAKI et al. 1998, FRANKENBERGER 2002).

Ein spezielles Problem der Totalätztechnik-Systeme ist die Gefahr des Kollabierens des Kollagennetzwerkes im Dentin durch eine zu starke Trocknung der Kavität nach dem Ätzvorgang. Daher kann zur Vermeidung dieses Problems das Dentin nach dem Anätzen mit Phosphorsäure leicht feucht belassen werden (Wet Bonding) bzw. vor der Applikation des Primer-Adhäsivs nochmals leicht angefeuchtet werden (Re-

wetting), um eventuell kollabierte Kollagenfasern wieder aufzurichten. *Admira Bond* enthält Aceton als Lösungsmittel, welches eine hohe Flüchtigkeit besitzt, um das Wasser aus den Zwischenräumen des Kollagennetzwerkes zu verdrängen und durch Monomer zu ersetzen. Allerdings reagieren Bondingsysteme auf Acetonbasis besonders empfindlich auf ausgetrocknetes Dentin (KANCA 1992, GWINNETT 1992, HALLER und FRITZENSCHAFT 1999). Daher wurde zum Ausschluss einer zu starken Austrocknung in dieser Studie das Dentin, nach dem Absprühen des Ätzgels und der darauf folgenden Trocknung der Kavität, mit einem mit Wasser leicht angefeuchteten Wattepellet vor der Applikation von *Admira Bond* nochmals befeuchtet (Re-wetting). Die ursprüngliche, aufgelockerte Struktur wird dadurch zwar nur teilweise wieder erreicht, dennoch ist sie ausreichend für die Diffusion des Monomersystems in das Dentin. Ein „Re-wetting“ des Kollagennetzwerkes gelingt nicht nur, wie in diesem Fall, mit Wasser, sondern auch mittels Hydroxyethylmethacrylat, das unter anderem auch in *Admira Bond* enthalten ist (TAY et al. 1997). Eine Einwirkzeit des Primer-Adhäsivs von 30 s laut Herstellerangaben gewährt also einerseits die Feuchterhaltung des Kollagennetzwerkes bei gleichzeitiger Verdrängung des Wassers aus dessen Zwischenräumen durch das Lösungsmittel andererseits. Durch das anschließende leichte Verblasen des Bondings verdunstet das Lösungsmittel vollständig und durch die anschließende Lichtpolymerisation wird die Hybridschicht stabilisiert.

Untersuchungen von VAN MEERBEEK et al. 1992 und 1999 machen für die geringen Haftwerte von Zwei-Schritt-Systemen eine unzureichende Hybridisierung des Dentins, also das unvollständige Eindringen des Primer-Adhäsivs in die mit Phosphorsäure konditionierte Dentinoberfläche, verantwortlich.

Bei einer Wasserlagerung der Proben über einen längeren Zeitraum wird die Dentinhaftung zusätzlich herabgesetzt (HALLER et al. 1993, BURROW et al. 1996, BLUNCK und ROULET 1997, LUCENA-MARTIN et al. 1999). Durch eindringendes Wasser und darin gelöste Enzyme kann freigelegtes, aber nicht mit Kunststoff umhülltes Kollagen zersetzt und der Haftverbund geschwächt werden (SANO et al. 1995, KATO und NAKABAYASHI 1998).

Dagegen berichten Studien anderer Autoren von einer deutlich erhöhten Penetrationsfähigkeit des demineralisierten Dentins durch Adhäsive auf Aceton-Basis durch Anwendung der Wet Bonding-Technik und damit einer signifikanten Verbesserung des Haftverbundes zwischen Dentin und Komposit (HASHIMOTO et al. 2002).

In einer Studie von HALLER und SCHUSTER 2000 wurde für *Admira* im Dentin eine zufrieden stellende Randqualität erzielt mit einem Anteil von 96,5% perfektem Rand vor und 93,1% nach thermomechanischer Belastung. Erklärt wird dieses gute Resultat unter anderem mit der Kompensation auftretender Schrumpfungsspannungen durch die Flexibilität der Kunststoff-Dentin-Hybridschicht (UNO und FINGER 1995) und einer reduzierten Polymerisationsschrumpfung des Ormocers gegenüber konventionellen Hybridkompositen (SOLTESZ 1999). Allerdings konnte bisher keines der am Markt befindlichen Ormocerfüllungsmaterialien dies in einem klinisch relevanten Umfang umsetzen (ERNST und WILLERSHAUSEN 2003).

In der Versuchsgruppe VI wurde das Nanofüllerkomposit *In Ten-S* in Kombination mit dem selbstkonditionierenden Adhäsiv *Self Etch Prime & Bonding* verwendet. Die Ergebnisse fielen im Vergleich zu den Ergebnissen der Versuchsgruppen I und IV deutlich schlechter aus. Infolge der In-vitro-Belastung kam es zu einer deutlichen Verschlechterung des Randschlussverhaltens am dentinbegrenzten Füllungsrand. In dieser Gruppe war der Anteil an marginalen Randspalten nach thermomechanischer Belastung mit 30,0% ähnlich hoch wie in der Versuchsgruppe II.

„Selbstkonditionierende“ Primer werden sowohl zur Schmelz- als auch zur Dentinätzung ohne vorherige Phosphorsäureätzung empfohlen. Diese Adhäsivsysteme zeichnen sich durch ein simultanes Ätzen und „Primen“ der Schmelz- und Dentinoberfläche mithilfe eines selbstkonditionierenden Primers aus. In einem zweiten Schritt wird dann das Adhäsiv aufgetragen und lichtgehärtet. Bei Anwendung entsprechender Präparate entfällt der Arbeitsschritt, die Schmelz- und Dentinoberflächen nach der Applikation des Primers abzusprühen. Die Dentinätzung geschieht durch die in den sauren Monomeren enthaltenen Phosphatreste, während Methacrylatreste für die Anbindung an das Bondingmaterial zur Verfügung stehen. Bei selbstätzenden Monomeren sind die Tiefe der Demineralisation und die Tiefe der Infiltration identisch. Die Anwendung von selbstkonditionierenden Primern ist daher im Vergleich zur Totalätztechnik weniger techniksensitiv und die erzielte Dentinhaftung weniger behandlerabhängig (MIYAZAKI et al. 2000). Das im Primer enthaltene Wasser muss vor dem Auftragen des Bondingmaterials von der Dentinoberfläche mit Hilfe einer Druckluftdüse vorsichtig und vollständig evaporiert werden. Verbleibendes Wasser auf der vorbehandelten oberflächlichen Dentinschicht kann zu einer Beeinträchtigung der Polymerisation des Bondingmaterials führen (HANNIG und FU 2001c, TAY et al. 2002a und 2002b).

In dieser Studie wurde bei der Verarbeitung der verwendeten Dentinhaftvermittler und bei der Applikationsdauer streng nach Herstellerangaben vorgegangen. Aufgrund der komplizierten Konfiguration von Klasse-II-Kavitäten sollte jedoch bedacht werden, dass die vom Hersteller angegebene Trocknungsdauer zur vollständigen Evaporation des Lösungsmittels Wasser möglicherweise nicht ausreicht und dadurch, wie bereits erwähnt, ein nachteiliger Effekt für den Haftverbund bzw. für die Anpolymerisation des Bondingmaterials an das vorbehandelte Dentin entstehen kann.

Eine längere oder häufigere Applikation von „selbstätzenden“ Primern kann allerdings zu einer Verbesserung des Randschlusses und zu einer erhöhten Haftfestigkeit führen (FERRARI et al. 1997, OGATA et al. 1999, HANNIG und FU 2001).

Die vorliegende Studie zeigt, dass mit dem gewählten „selbstkonditionierenden“ Adhäsivsystem der Gruppe VI kein belastungsstabiler Verbund zur Dentinoberfläche unter den vorherrschenden Versuchsbedingungen hergestellt werden konnte. Gleichsam berichten Studien von LI et al. 2001 und 2002 über das Phänomen der „Nanoleakage“ bei selbstkonditionierenden Systemen.

Dagegen berichten andere Autoren von der Erzielung eines dichten marginalen Haftverbundes am Dentin unter Anwendung „selbstätzender“ Primer-Systeme ohne zusätzliche Phosphorsäureätzung (BARKMEIER et al. 1995, GORDON et al. 1998). Einen nahezu vollständigen belastungsstabilen Randschluss konnten HANNIG und BOTT (2000) und HANNIG et al. (2001b) mit „selbstätzenden“ Primer-Systemen in dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten erzielen.

Die Dentinhaftfestigkeit von selbstkonditionierenden Systemen mit separater Applikation von Primer und Adhäsiv lag in den meisten Studien zwischen denen von Drei-Schritt- und Zwei-Schritt-Totalätzsystemen (INOUE et al. 2001, MOLL et al. 2002, NIKAIDO et al. 2002).

Bei Anwendung des noch in Erprobung stehenden selbstkonditionierenden Primer-Adhäsiv-Systems *Hermes Bond* in Kombination mit dem Siloran *Hermes* in der Versuchsgruppe III ergab sich in dieser Untersuchung eine Randspaltbildung von 44,4% bereits vor In-vitro-Belastung der Füllungen. Bei Betrachtung der dazugehörigen REM-Aufnahmen stellte sich eindeutig ein adhäsiver Abriss des Bondings vom Komposit im Spaltraum dar, während zwischen Bonding und Dentin ein Haftverbund erkennbar war. Dieses Phänomen lässt vermuten, dass das Adhäsiv

im Dentin einen guten Dentinhaftverbund besitzt und die Randspaltbildung eher auf eine Inkompatibilität des Adhäsivsystems mit dem Komposit zurückzuführen ist.

Bei diesen sogenannten All-in-one-Adhäsiven wird nur eine Lösung appliziert. Sie enthalten eine ausgewogene Mischung von hydrophilen und hydrophoben Monomeren sowie Monomere mit Säureestern und erfüllen so neben der Funktion des Adhäsivs gleichzeitig auch die des Ätzmittels und des Primers. Die Abstimmung der einzelnen Bestandteile ist dabei extrem schwierig. Die Dentinhaftung von All-in-one-Adhäsiven wird herabgesetzt, wenn zwischen ihrer Aushärtung und der Lichtpolymerisation zu viel Zeit verstreicht (TAY et al. 2001). In verschiedenen Studien waren All-in-one-Adhäsive meist weniger wirksam als Totalätzsysteme oder selbstkonditionierende Systeme mit Zwei-Schritt-Applikation (CARDOSO et al. 1999, HANNIG und BOTT 2000, ROSA und PERDIGAO 2000, FRANKENBERGER et al. 2001, INOUE et al. 2001, SPOHR et al. 2001, ERNST et al. 2002a und b, FRANKENBERGER 2002, KAADEN et al. 2002, MOLL et al. 2002).

### **6.2.2 Diskussion der Ergebnisse für die schmelzbegrenzten Füllungsrandbereiche**

Die Ergebnisse der schmelzbegrenzten Füllungsrande zeigten schon nach dem Einbringen der Füllungsmaterialien zum Teil erhebliche Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsgruppen, vor allem die Versuchsgruppen II und III bezüglich der Versuchsergebnisse der anderen Versuchsgruppen.

Die Versuchsgruppe IV wies vor thermomechanischer Belastung mit einem perfekten Randanteil von 97% und einer nicht nachweisbaren Randspaltbildung die besten Ergebnisse von allen Versuchsgruppen auf. Auch nach thermomechanischer Belastung ergab sich eine nur sehr geringe Randspaltbildung. Im Vergleich zur Versuchsgruppe I, bei der dasselbe Adhäsiv verwendet worden war, fielen die Ergebnisse in Bezug auf die Randspaltbildung hier ähnlich gut aus, sowohl vor als auch nach in-vitro-Belastung.

Signifikant unterschiedlich fiel das Ergebnis bei der Versuchsgruppe II im Vergleich zur Versuchsgruppe I aus, bei welcher sowohl dasselbe Komposit als auch dasselbe Adhäsiv verwendet worden waren. Mit 36,5% perfekter Randanteile ohne Schmelzrandschrägung betrug die Randqualität weniger als 50% derjenigen mit Schmelzrandschrägung in Versuchsgruppe I schon vor Belastung der Proben. Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung anderer Autoren, die eine Steigerung der Mikroretention und eine Verbesserung der marginalen Adaptation durch

Anschrägung der Kavitätenränder beobachten konnten (LUESCHER et al. 1977, MUNECHIKA et al. 1984, MOORE und VANN 1988). In einer Studie von BOTT und HANNIG 1995 erreichten Klasse-II-Kompositrestaurationen ohne Anchrägung der approximalen Kavitätenränder nach In-vitro-Belastung Randspalten von 38,3% in Bezug auf die approximalen Restaurationsränder.

In der Versuchsgruppe V ergab sich zunächst ein kleiner Anteil an Randspalten und marginalen Unregelmäßigkeiten bei einem perfekten Randanteil von 83,2%. Infolge der thermischen Belastung kam es dann zu einer deutlichen Verschlechterung sowohl der perfekten Randanteile als auch der Randspaltbildung. Dies steht in Übereinstimmung mit einer Studie von KOURNETAS et al. 2004, bei der die marginale Adaptation zweier Ormocere, darunter *Admira*, einander ähnlich und im Vergleich zu einem Hybridkomposit deutlich schlechter waren.

Bei der Versuchsgruppe III ergab sich unter Anwendung eines selbstkonditionierenden Primer-Adhäsivs bereits vor In-vitro-Belastung ein unbefriedigendes Ergebnis mit 45,5% perfekten Randanteilen trotz separater Phosphorsäureätzung des Schmelzes vor der Applikation des Primer-Adhäsivs.

In der Versuchsgruppe VI, bei der ein selbstkonditionierendes Adhäsivsystem mit getrennter Applikation von Primer und Adhäsiv angewendet wurde, sind die Ergebnisse in Bezug auf die perfekten Randanteile mit denen der Versuchsgruppe I vergleichbar, allerdings mit einem etwas höheren Anteil an Randspaltbildung.

Bemerkenswerterweise stieg in den Versuchsgruppen I, II, IV und VI der Anteil an Randspalten nach thermischer Belastung um durchschnittlich 10,4 Prozentpunkte an, um nach mechanischer Belastung um durchschnittlich 7,6 Prozentpunkte wieder abzufallen. Hier kann eine Quellung des Adhäsivs durch Wasseraufnahme der Adhäsivmatrix oder ein Abbruch der Spaltkanten durch die mechanische Belastung bei darunter befindlichem dichtem Füllungsverband zu einer Verminderung der Randspalten beigetragen haben (KULLMANN 1990, LOHER et al. 1997).

Die in den Gruppen I-V angewandte Konditionierung der Schmelzoberfläche mit 37%iger Phosphorsäure stellt ein Standardverfahren zur adhäsiven Befestigung zahnfarbener Kompositmaterialien dar. In vielen in-vitro- und in-vivo-Studien konnte nachgewiesen werden, dass sich mit Hilfe der Schmelz-Ätz-Technik dauerhaft randständige Kompositfüllungen legen lassen (SWIFT et al. 1995). Der in der Versuchsgruppe VI verwendete selbstätzende Primer *Self Etch Primer* konnte einen mit der Schmelz-Ätz-Technik vergleichbaren belastungsstabilen Verbund am Schmelz herstellen. Dieses Ergebnis deckt sich mit einer Studie von HANNIG et al.

(1999a und 2001b), in der mit selbstätzenden Primern ohne Phosphorsäureätzung unter vergleichbaren Versuchsbedingungen ebenfalls eine der Schmelz-Ätz-Technik vergleichbare belastungsstabile Anheftung des Komposits am Zahnschmelz erreicht wurde. Die in dieser Studie unter Anwendung vier verschiedener Adhäsivsysteme gelegten Kompositfüllungen wiesen einen Anteil von 91,8-92,6% perfekter Randanteile und 5,6-5,9% Randspalten nach Belastung auf, was im Vergleich zur Versuchsgruppe VI mit 51,6% perfekter Randanteile und 11,2% Randspalten das bessere Versuchsergebnis darstellt. In der oben genannten Studie handelte es sich jedoch um rein schmelzbegrenzte Klasse-II-Kavitäten, wobei der untersuchte Randabschnitt sowohl die approximalen als auch die zervikalen Füllungsrandareale umfasste wegen der hier bevorzugt auftretenden belastungsinduzierten marginalen Desintegration von Klasse-II-Kompositfüllungen (BOTT und HANNIG 1995). DIETSCHI et al. (1995b) berichten über einen Anteil von 91,6% kontinuierlicher Ränder im zerviko-approximalen Sektor von Kompositfüllungen, die in schmelzbegrenzten Klasse-II-Kavitäten unter Anwendung der konventionellen Ätztechnik gelegt wurden. Im Übrigen sind die mit selbstkonditionierenden Monomerlösungen erzeugten Ätzmuster deutlich schwächer ausgeprägt als die nach Phosphorsäure-Ätzung (HANNIG et al. 2002, FABIANELLI et al. 2003). Der pH-Wert von selbstkonditionierenden Lösungen bestimmt zwar die Ätzwirkung, nicht jedoch die Haftfestigkeit (KAADEN et al. 2002, PASHLEY und TAY 2001). Offenbar spielen für die Schmelzhaftung neben der Ätztiefe auch andere Faktoren, wie die Benetzungseigenschaften der Monomere und die Festigkeit des Adhäsivs, eine entscheidende Rolle. In einer Studie von MIYAZAKI et al. (2000) wurde eine Herabsetzung der Schmelzhaftung durch thermische Wechselbelastung beobachtet, was aber ebenso eine Folge der starken Wasseraufnahme durch das Adhäsiv sein kann (BURROW et al. 1999).

Die Randspalten am schmelzbegrenzten Füllungsrand traten in allen sechs Versuchsgruppen dieser Studie ähnlich einer Studie von MEHL et al. (1994) bevorzugt an der Schmelz-Zement-Grenze auf und gingen okkluswärts in einen perfekten Randschluss über. Die Ursache hierfür liegt wahrscheinlich darin begründet, dass der Schmelz zervikal dünn ausläuft und dort eine zunehmend prismafreie Struktur und einen geringen Mineralisationsgrad aufweist (GWINNET 1973). Die Erklärung für die etwas besseren Versuchsergebnisse in der Studie von HANNIG et al. (1999a, siehe oben) könnte also die Dentinbegrenzung versus Schmelzbegrenzung der Kavitätenränder sein.

Die Ergebnisse der Gruppe I und II bestätigen, dass die Schmelzrandschrägung unabdingbar und Voraussetzung für einen stabilen adhäsiven Verbund ist. Die Ergebnisse der Gruppen I, IV und V verdeutlichen, dass Phosphorsäure das Konditionierungsmittel der Wahl darstellt und die vorhersagbarsten Ergebnisse für die adhäsive Befestigung von Kompositen am Schmelz liefert. Die Qualität des Komposit-Schmelz-Verbundes ist in den Gruppen I und IV miteinander vergleichbar, was auf das gleichermaßen verwendete Adhäsivsystem *Syntac Classic* zurückzuführen ist.

Mit der Anwendung von „selbstätzenden Primern“ wie in Gruppe VI sind ähnliche Ergebnisse erreichbar wie in Gruppen mit konventioneller Phosphorsäurekonditionierung bzw. Totalätztechnik. Dies deckt sich mit den meisten In-vitro-Studien zur Haftfestigkeit am Schmelz, die keine Unterschiede zwischen selbstkonditionierenden Systemen und Totalätzsystemen herausfanden (HANNIG et al. 1999b, IBARRA et al. 2002, PERDIGAO et al. 2000, TOLEDANO et al. 2001). Allerdings bleibt zu bemerken, dass die mit selbstkonditionierenden Monomerlösungen erzeugten Ätzmuster und Kunststoff-Schmelz-Interaktionsmuster deutlich schwächer ausgebildet sind als bei Phosphorsäure-Ätzung. Auch bei den selbstkonditionierenden Systemen lässt sich die Randspaltbildung im Schmelz durch eine Anchrägung der approximalen Schmelzränder reduzieren (HERTER et al. 2001).

In einigen Studien wurde mit selbstkonditionierenden Bondingsystemen bei Klasse-II-Füllungen ein belastungsstabiler Schmelzrandschluss erzielt (HANNIG et al. 1999a und 2001b). All-in-one-Adhäsive zeigten dagegen häufig deutliche Mängel (HUBER et al. 2000, MOLLA et al. 2002, ERNST et al. 2002a und 2002b). Eine Studie von SENAWONGSE et al. (2004) zeigte signifikant höhere Haftfestigkeitswerte von selbstätzenden Zwei-Schritt-Adhäsivsystemen und Totalätz-selbstprimenden Adhäsivsystemen als bei den All-in-One-Adhäsiven.

Das in der Gruppe III verwendete Primer-Adhäsivsystem ähnelt chemisch vermutlich dem vom gleichen Hersteller stammenden Adhäsivsystem *Adper Prompt L-Pop*, das sich bereits klinisch bewährt hat in Kombination mit herkömmlichen Hybridkompositen. In dieser Studie wurde das Adhäsiv mit einem Siloran, einer chemisch völlig anderen Stoffklasse, kombiniert.

Bei der Betrachtung der rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen stellten sich in den schmelzbegrenzten Füllungsrandarealen eher Haarrisse als Randspalten dar. Bezug nehmend auf die Ergebnisse der Versuchsgruppe III lässt sich vermuten, dass

einerseits der Schmelz-Adhäsiv-Verbund aufgrund der ungenügenden Hafteigenschaften des Adhäsivs am Schmelz unzureichend ist bzw. eine Inkompatibilität des Adhäsivsystems mit dem verwendeten Komposit vorliegt, andererseits jedoch die nur sehr schmalen Randspalten für eine deutlich verminderte Volumenschrumpfung des Silorans sprechen könnten. Untersuchungen von DEDE et al. (2004) bestätigen eine bis zu 30% geringere Polymerisationsschrumpfung von *Hermes* gegenüber *Tetric Ceram*.

### 6.3 Schlussfolgerung

Die vorliegenden Resultate lassen sich folgendermaßen resümieren:

- 1) Das Mehr-Flaschen-Adhäsivsystem *Syntac Classic* mit Drei-Schritt-Applikation und separater Schmelzkonditionierung gewährleistete unter den in dieser Studie gewählten Versuchsbedingungen sowohl in Kombination mit einem bewährten konventionellen Hybridkomposit (Gruppe I) als auch in Kombination mit einem neueren schrumpfreduzierten Komposit (Gruppe IV), sowohl im Schmelz als auch im Dentin, den belastungsstabilsten Randschluss.
- 2) Die konsequente Ansträgung der Schmelzränder ist eine unabdingbare Voraussetzung für die belastungsstabile Verankerung von Kompositfüllungen.
- 3) Die vorliegenden Resultate in Bezug auf das selbstkonditionierende Adhäsivsystem *Self Etch Prime & Bonding* mit Zwei-Schritt-Applikation in Kombination mit dem in Gruppe IV ebenfalls verwendeten schrumpfreduzierten Komposit (Gruppe VI) zeigen auch ohne vorherige Phosphorsäureätzung einen belastungsstabilen Randschluss von Kompositfüllungen an den schmelzbegrenzten Kavitätenrändern, wenn auch mit etwas größerer Randspaltbildung im Vergleich zu den Versuchsgruppen I und IV. Im Bereich der dentinbegrenzten Kavitätenränder ließ sich kein belastungsstabiler Randschluss erzielen.
- 4) Die aus dem Ormocerprodukt *Admira* in Kombination mit dem Ein-Flaschen-Adhäsiv *Admira Bond* gelegten Klasse-II-Füllungen (Gruppe V) zeichneten sich in der vorliegenden Studie durch keinen guten Randschluss aus. Nach initial hohem Anteil perfekter marginaler Adaptation im schmelzbegrenzten Kavitätenrandbereich kam es infolge des Belastungstests zu einer signifikanten Verschlechterung des Randschlusses. Im Bereich der dentinbegrenzten Areale ergaben sich die mit Abstand schlechtesten Randschlussresultate aller Versuchsgruppen.

5) Die Materialkombination aus dem „All-in-One“-Adhäsiv *Hermes Bond* und dem Siloran *Hermes* (Gruppe III) zeigte trotz separater Schmelzätzung schon nach dem Legen der Restaurationen sowohl im Schmelz als auch im Dentin so geringe Anteile an marginaler Adaptation, dass die vorerst geplanten Belastungstests unterlassen wurden.

6) Es bleibt kritisch anzumerken, dass die Füllungen ohne Simulation des Pulpainnendruckes appliziert wurden und dass für die Experimente ausschließlich kariesfreie Zähne verwendet wurden.

## 7 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser In-vitro-Studie wurde das Randschlussverhalten von zahnfarbenen plastischen Füllungen aus einem schrumpfungsreduzierten Siloran (Hermes), einem Nanofüllerkomposit (In Ten-S) sowie aus einem Ormocer (Admira) unter Verwendung von Ein-, Zwei- und Drei-Flaschen-Haftvermittlern in approximal dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten rasterelektronenmikroskopisch analysiert. Als Referenz dienten Kompositfüllungen aus dem Hybridkomposit Tetric Ceram, die in approximal dentinbegrenzten Kavitäten unter Anwendung von Syntac Classic appliziert wurden.

An 46 extrahierten menschlichen Molaren wurden okklusal-approximale Kavitäten präpariert, deren zerviko-approximale Stufe 1 mm unterhalb der Schmelz-Zementgrenze endete. Diese wurden mit den folgenden Kompositmaterialien / Dentinadhäsivsystemen in Inkrementeschichttechnik gefüllt: Tetric Ceram / Syntac Classic mit Schmelzschrägung (Gruppe I), Tetric Ceram / Syntac Classic ohne Schmelzschrägung (Gruppe II), Hermes / Hermes Bond (Gruppe III), In Ten-S / Syntac Classic (Gruppe IV), Admira / Admira Bond (Gruppe V) sowie In Ten-S / Self Etch Prime & Bonding (Gruppe VI). Anschließend wurde der Randschluss der Füllungen rasterelektronenmikroskopisch nach thermischer Wechselbelastung (5°C / 55°C, 2500 Zyklen) und okklusaler Druckbelastung (100 N, 500 000 Zyklen) untersucht.

Eine überwiegend belastungsstabile und akzeptable marginale Adaptation im Bereich der dentinbegrenzten Kavitätenränder ließ sich nur in den Versuchsgruppen I (88,6%) und IV (83,8%) erzielen. Im Bereich der schmelzbegrenzten approximalen Kavitätenränder ließ sich auf 93,6% (Gruppe I), 94,5% (Gruppe IV) und 88,6% (Gruppe VI) der untersuchten Randlänge ein akzeptabler Randschluss feststellen.

Die vorliegenden Resultate zeigen, dass mit den Materialien der Gruppen I und IV eine belastungsstabile marginale Adaptation erzielt werden kann, jedoch mit keiner der getesteten Materialkombinationen vollständig randspaltfreie Füllungen erzielt werden konnten.

Auch wenn die Resultate der vorliegenden In-vitro-Studie nicht unmittelbar auf die klinische Situation übertragbar sind, so ermöglichen sie doch eine relative Einschätzung und geben einen Anhalt für die Bewertung des Randschlussverhaltens von Füllungen aus den untersuchten Materialkombinationen.

## 8 Literaturverzeichnis

**Attin,T., Buchalla,W., Kielbassa,A.M., Hellwig,E. (1995):**

Curing shrinkage and volumetric changes of resin-modified glass ionomer restorative materials. Dent Mater 11, 359-362.

**Attin,T., Buchalla,W. (1998):**

Werkstoffkundliche und klinische Bewertung von Kompomeren.

Dtsch Zahnärztl Z 53, 766-774.

**Barkmeier,W.W., Los,S.A., Triolo,P.T.Jr. (1995):**

Bond strength and SEM evaluation of Clearfil Liner Bond 2. Am J Dent 8, 289-293.

**Ben-Amar,B., Metzger,Z., Gontar,G. (1987):**

Cavity design for Class II composite restorations. J Prosthet Dent 58, 5-8.

**Blunck,U., Roulet,J.F. (1989):**

In-vitro marginal quality of dentin-bonded composite resins in class V cavities.

Quintess Int 206, 407-412.

**Blunck,U., Roulet,J.F. (1997):**

Einfluß der Wasserlagerung auf die Wirksamkeit von Dentinadhäsiven.

Dtsch Zahnärztl Z 52, 806-808.

**Blunck,U., Haller,B. (1999):**

Klassifikation von Bondingsystemen. Quintessenz 50, 1021-1033.

**Blunck,U., Roulet,J.F. (2002):**

Effect of one-year water-storage on the effectiveness of dentin adhesives in Class V composite resin restorations. J Dent Res 81 (Spec Iss A): A139, Abstr.No. 0946.

**Blunck,U., Haller,B. (2003):**

Übersicht und Wertung der aktuellen Bondingsysteme. zm 93, 808-818.

**Bott,B., Hannig,M. (1995):**

Optimizing class II composite resin esthetic restorations by the use of ceramic inserts. J Esthet Dent 7, 110-117.

**Bouschlicher,M.R., Vargas,M.A., Boyer,D.B. (1997):**

Effect of composite type light intensity, configuration factor and laser polymerization on polymerization contraction forces. Am J Dent 10, 88-96.

**Burrow,M.F., Satoh,M., Tagami,J (1996):**

Dentin bond durability after three years using a dentin bonding agent with and without priming. Dent Mater 12, 302-307.

**Burrow,M.F., Inokoshi,S., Tagami,J (1999):**

Water sorption of several bonding resins. Am J Dent 12, 295-298.

**Candou,J.R., Ferracane,J.L. (2002):**

Reduced polymerization stress through non-bonded nanofiller particles. Biomaterials 23, 3807-3815.

**Cardoso,P.E.C., Placido,E., Francci,C.E., Perdigao,J. (1999):**

Microleakage of Class V resin-based composite restorations using five simplified adhesive systems. Am J Dent 12, 291-294.

**Cheung,G.S. (1990):**

A scanning electron microscopic investigation on the acid etched cervical margin of Class II cavities. Quintess Int 21, 299-302.

**da Cunha Mello,F.S., Feilzer,A.J., de Gee,A.J., Davidson,C.L. (1997):**

Sealing ability of eight resin bonding systems in a Class II restoration after mechanical fatiguing. Dent Mater 13, 372-376.

**Davidson,C.L., de Gee,A.J. & Feilzer,A. (1984):**

The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. Journal of Dental Research 63, 1396-1399.

**Davidson,C.L., de Gee,A.J. (1984):**

Relaxation of polymerization contraction stresses by flow in dental composites.  
J Dent Res 1984; 63:146-148.

**Davidson,C.L., Abdalla,A.L. (1993):**

Effect of thermal and mechanical load cycling on the marginal integrity of class II resin composite restorations. Am J Dent 6, 39-42

**Dauvillier,B.S., Aarnts,M.P., Feilzer,A.J. (2000):**

Development in shrinkage control of adhesive restoratives.  
J Esthet Dent 12, 291-299.

**Dede,K., Weinmann,W., Guggenberger,R., Thalacker,C., Syrek,A., Jacobs,D. 2004:**

Comparison of two ways to determine polymerisation shrinkage of composites.  
IADR abstract.

**Dietschi,D. Holz,J. (1990):**

Die Qual der Wahl bei Seitenzahnfüllungen.  
Schweiz. Monatsschr. Zahnmed. 100, 1332-1334.

**Dietschi,D., De Siebenthal,G., Neveu-Rosenstand,L., Holz,J. (1995a):**

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.  
Quintess Int 26, 717-727.

**Dietschi,D. Scampa,U., Campanile,G., Holz,J. (1995b):**

Marginal adaptation and seal of direct and indirect Class II composite resin restorations: An in vitro evaluation. Quintess Int 26, 127-138.

**Dietschi,D., Herzfeld,D. (1998):**

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.

**Eichner,K. (1963):**

Messung der Kräfte bei Kauvorgängen. Dtsch Zahnärztl Z 18, 915-920.

**Ernst,C.P. (2001):**

Was Sie schon immer über Dentinadhäsive wissen wollten. ZMK 5, 254-269.

**Ernst,C.P., Cortain,G., Spohn,M., Rippin,G., Willershausen,B. (2002a):**

Marginal integrity of different resin-based composites for posterior teeth: an in vitro dye-penetration study on eight resin-composite and compomer-/adhesive combinations with a particular look at the additional use of flow-composites.

Dent Mater 18, 351-358.

**Ernst,C.P., Streicher,S., Willershausen,B. (2002b):**

Marginal adaptation of self-etching adhesives in Class II cavities.

J Adhes Dent 4, 223-231.

**Ernst,C.P., Willershausen,B. (2003):**

Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite.

zm 93, 790-800.

**Ernst,C.P., Meyer,G.R., Klöcker,K., Willershausen, B. (2004):**

Determination of Polymerisation shrinkage stress by means of a photoelastic investigation.

Dent Mater 20, 313-321.

**Fabianelli,A., Kugel.G., Ferrari,M. (2003):**

Efficacy of self-etching primer on sealing margins of Class II restorations.

Am J Dent 16, 37-41.

**Feilzer,A., de Gee,A.J., Davidson,C.L. (1987):**

Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration.

J Dent Res 66, 1636-1639.

**Feilzer,A.J., de Gee,A.J., Davidson,C.L. (1988):**

Curing contraction of composites and glass-ionomer cements.  
J Prosthet Dent 59, 297-300.

**Feilzer,A.J., de Gee,A.J., Davidson,C.L. (1990):**

Quantitative determination of stress reduction by flow in composite restorations.  
Dent Mater 6, 167-171.

**Ferrari,M., Mannocci,F., Vichi,A., Davidson,C.L. (1997):**

Effect of two etching times on the sealing ability of Clearfil Liner Bond 2 in Class V restorations. Am J Dent 10, 66-70.

**Frankenberger,R., Krämer,N., Sindel,J. (1996a):**

Zuverlässigkeit der Dentin-Komposit-Verbindung mit zwei experimentellen Dentinhaftvermittlern. Dtsch. Zahnärztl. Z 51, 206-210.

**Frankenberger,R., Krämer,N., Sindel,J. (1996b):**

Hafffestigkeit und Zuverlässigkeit der Verbindung Dentin-Komposit und Dentin-Kompomer. Dtsch Zahnärztl Z 51, 556-560.

**Frankenberger,R., Krämer,N., Petschelt,A. (1999a):**

Fatigue behaviour of different dentin adhesives. Clin Oral Invest 3, 11-17.

**Frankenberger,R., Sindel,J. Krämer,N., Petschelt,A. (1999b):**

Dentin bond strength and marginal adaptation: direct composite resins versus ceramic inlays. Oper Dent 24, 147-155.

**Frankenberger,R., Perdigao,J., Rosa,B.T., Lopez,M. (2001):**

`No-bottle`vs `multi-bottle`dentin adhesives – a microtensile bond strength and morphological study. Dent Materials 17, 373-380.

**Frankenberger,R. (2002):**

Zur Dauerhaftigkeit des Dentinverbunds. Dtsch Zahnärztl Z 57, 154-171.

**Frankenberger,R., Pashley,D.H., Reich,S.M., Lohbauer,U., Petschelt,A., Tay,F.R. (2005):**

Characterisation of resin-dentin interfaces by compressive cyclic loading. Biomaterials 26, 2043-2052.

**Friedl,K.-H., Powers,J.M., Hiller,K.A., Schmalz,G. (1995):**

Der Komposit-Dentinverbund nach Anwendung von Dentinadhäsiv-Systemen. Einfluß von Dentintiefe und –feuchtigkeit. Dtsch. Zahnärztl. Z 50, 577-581.

**Gernhardt,Ch.,R., Salhab,J., Schaller,H.-G. (2001):**

Die Zugfestigkeit verschiedener Dentinhaftvermittler auf trockenem und perfundiertem Dentin. Dtsch. Zahnärztl. Z 56, 467-471.

**Glockner,K., Reich,M.E., Kos,S., Keil,C., Ebeleseder,K., Städtler,P. (1998):**

Randadaptation von verschiedenen zahnfarbenen Klasse-II-Restaurationen. Eine In-vitro-Studie mit 10 verschiedenen Materialien. Dtsch Zahnärztl Z 53, 775-780.

**Gordon,V.V., Vargas,M.A., Cobb,D.S., Denehy,G.E. (1998):**

Evaluation of acidic primers in microleakage of Class V composite resin restorations. Oper Dent 23, 244-249.

**Gwinnet,A.J. (1973):**

Human prismless enamel and ist influence on sealant penetration. Arch Oral Biol 18, 441-443.

**Gwinnet,A.J. (1992):**

Moist versus dry dentin: its effect on shear bond strength. Am J Dent 5: 127-129.

**Haller,B. (1992):**

Aktueller Stand der Komposit-Dentinhaftung. Zahnärztl. Mitl. 18, 86-97.

**Haller,B., Hofmann,N., Klaiber,B., Pfannkuch,A. (1993):**

Beständigkeit des Komposit-Dentinverbundes bei künstlicher Alterung.  
Dtsch Zahnärztl Z 48, 100-104.

**Haller,B. (1994):**

Mechanismus und Wirksamkeit von Dentinhaftvermittlern.  
Dtsch. Zahnärztl. Z 49, 750-759.

**Haller,B., Trojanski,A. (1998):**

Effect of multi-step dentin bonding systems and resin-modified glass ionomer cement liner on marginal quality of dentin-bonded resin composite restorations.  
Clin Oral Invest 2, 130-136.

**Haller,B., Fritzenschaft,A. (1999):**

Dentinhaftung von Ein- und Mehrkomponentenhaftvermittlern bei Dry und Moist Bonding in vitro. Dtsch Zahnärztl Z 54, 225-230.

**Haller,B., Schuster,P. (2000):**

Randqualität eines Ormocers (Admira) und eines Feinhybridkomposits (Arabesk Top) in Klasse-II-Kavitäten. Dtsch. Zahnärztl. Z 55, 331-335.

**Haller,B., Blunck,U. (2003):**

Übersicht und Wertung der aktuellen Bondingsysteme. Zahnärztl. Mitl. 93, 808-818.

**Hannig,M., Weinle,S., Albers,H.K. (1991):**

Der Einfluss modifizierter Präparationsformen auf die Randqualität von Kompositinlays aus SR-Isosit. Dtsch Zahnärztl Z 46, 609-611.

**Hannig,M. Kreuzkamp,H. Albers,H.K. (1994a):**

Zur Bedeutung der Wasserlagerung für die marginale Adaptation von Kompositfüllungen. Dtsch Zahnärztl Z 49, 595-600.

**Hannig,M. (1994b):**

Schmelzprismenverlauf und Ätzmuster im approximalen Bereich von Klasse-II-Kavitäten.

Wissenschaftlicher Beitrag, Jahrestagung DGZ, Heidelberg.

**Hannig,M., Bott,B., Möller,O. (1995):**

Das Randschlussverhalten von Kompositfüllungen mit Keramikinserts in dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten. Dtsch. Zahnärztl. Z 50, 828-831.

**Hannig,M., Femerling,T. (1998):**

Influence of Air-Abrasion Treatment on the Interfacial Bond between Composite and Dentin. Oper Dent 23, 258-265.

**Hannig,B., Bott,B., Emmermann,A. (1999a):**

Randschlußverhalten von Klasse-II-Kompositfüllungen nach Schmelzkonditionierung mit selbstätzenden Primern. Dtsch. Zahnärztl. Z 54, 133-136.

**Hannig,B., Reinhardt,K.-J., Bott,B. (1999b):**

Self-Etching Primer vs Phosphoric Acid: An Alternative Concept for Composite-to-Enamel Bonding. Oper Dent 24, 172-180.

**Hannig,M., Bott,B. (2000):**

Randschlußverhalten von plastischen zahnfarbenen Füllungen in dentinbegrenzten Klasse-II-Kavitäten. Dtsch. Zahnärztl. Z 55, 134-138.

**Hannig,M., Stiesch-Scholz,M. (2000):**

In Vitro Study of Enamel and Dentin Marginal Integrity of Composite and Compomer Restorations Placed in Primary Teeth after Diamond or Er: YAG Laser Cavity Preparation. J of Adhes Dent, Vol 2, 213-222.

**Hannig,M., Friedrichs,C. (2001a):**

Comparative in vivo and in vitro investigation of interfacial bond variability. Oper Dent, Vol 26, 3-11.

**Hannig,M., Reinhardt,K.-J., Bott,B. (2001b):**

Composite-to-dentin bond strength, micromorphology of the bonded dentin interface and marginal adaptation of Class II composite resin restorations using self-etching primers. Oper Dent 26, 157-165.

**Hannig,M., Fu,B. (2001c):**

Effect of air abrasion and resin composite on mikroleakage of class V restorations bonded with self-etching primers. J Adhes Dent 3, 265-272.

**Hannig,M., Bock,H., Bott,B., Hoth-Hannig,W. (2002):**

Inter-crystallite nano-retention of self-etching adhesives at enamel imaged by transmission electron microscopy. Eur J Oral Sci 110, 464-470.

**Hashimoto,M., Ohno,H., Kaga,M., Sano,H., Endo,K., Oguchi,H. (2002):**

The extent to which resin can infiltrate dentin by acetone-based adhesives. J Dent Res 81, 74-78.

**Hellwig,E., Klimek,J., Attin,T. (1995):**

Einführung in die Zahnerhaltung.

Urban & Schwarzenberg, München – Wien – Baltimore.

**Hickel,R. (1997):**

Moderne Füllungswerkstoffe. Dtsch. Zahnärztl. Z 52, 572-585.

**Hilton,T.J., Schwartz,R.S., Ferracane,J.L: (1997):**

Microleakage of four Class II resin composite insertion techniques at intraoral temperature. Quintessence Int. 28, 135-144.

**Hilton,T.J., Ferracane, J.L. (1999):**

Cavity preparation factors and microleakage of Class II composite restorations filled at intraoral temperatures. Am J Dent 12, 123-130.

**Hinoura,K., Sectos,J.C., Phillips,R.W. (1988):**

Cavity design and placement techniques for Class II Composites.  
Oper Dent 13, 12-19.

**Huber,K., Fischer,J., Haller,B. (2000):**

Simplified Bonding Systems and New Composites: Effects on Enamel Margins.  
J Dent Res 79 (Spec Iss), 149, Abstr No 41.

**Ibarra,G., Vargas,M.A., Armstrong,S.R., Cobb,D.S. (2002):**

Microtensile bond strength of self-etching adhesives to ground and unground enamel. J Adhes Dent 4, 115-124.

**Inoue,S., Vargas,M.A., Abe,Y., Yoshida,Y., Lambrechts,P., Vanherle,G., Sano,H. & Van Meerbeek (2001):**

Microtensile bond strength of eleven contemporary adhesives to dentin.  
J Adhes Dent 3, 137-245.

**Kaaden,C., Powers,J.M., Friedl,K.H., Schmalz,G. (2002):**

Bond strength of self-etching adhesives to dental hard tissues.  
Clin Oral Invest 6, 155-160.

**Kanca,J. (1992):**

Effect of resin primer solvents and surface wetness on resin composite bond strength to dentin. Am J Dent 5: 213-215.

**Kato,G., Nakabayashi,N. (1998):**

The durability of adhesion to phosphoric acid etched, wet dentin substrates.  
Dent Mater 14, 347-352.

**Kournetas,N., Chakmaklı,M., Kakaboura,A., Rahiotis,C., Geis-Gerstorfer,J. (2004):**

Marginal and internal adaptation of Class II ormocer and hybrid resin composite restorations before and after load cycling. Clin Oral Investig 8, 123-129.

**Krejci,J., Reich,T., Lutz,F., Albertoni,M. (1990a):**

In-vitro-Tesverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme:

1. Computergesteuerter Kausimulator. Schweiz Monatsschr Zahnmed 100, 953-960.

**Krejci,L., Lutz,F. (1990b):**

In-Vitro-Testverfahren zur Testung dentaler Restaurationssysteme:

3.: Korrelation mit In-vivo-Resultaten.

Schweiz Monatsschr Zahnmed 100, 1445-1449.

**Krejci,L. (1992):**

Zahnfarbene Restaurationen. Hanser, München.

**Kubo,S., Yokota,H., Sata,Y., Hayashi,Y. (2001):**

Microleakage of self-etching primers after thermal and flexural load cycling.

Am J Dent 14, 163-169.

**Kullmann,W. (1990):**

Sorptions- und Lösungsvorgänge bei selbst- und lichthärtenden Komposit-Kunststoffen. Dtsch Zahnärztl Z 45, 286-292.

**Kultermann, Espe (2001):**

Moderne Adhäsivsysteme - Fortschritt oder Marketing ? DFZ 5, 36-41.

**Li,H.P., Burrow,M.F., Tyas,M.J. (2001):**

The effect of long-term storage on nanoleakage. Oper Dent 26, 609-616.

**Li,H.P., Burrow,M.F., Tyas,M.J. (2002):**

The effect of load cycling on the nanoleakage of dentin bonding systems.

Dent Mater 18, 111-119.

**Loher,C., Kunzelmann,K.-H., Hickel,R. (1997):**

Klinische Studie mit Hybridglasionomerzement-, Kompomer- und Kompositfüllungen in Klasse-V-Kavitäten. Dtsch Zahnärztl Z 51, 525-529.

**Lösche,A.C. (1991):**

Verbesserung der Randqualität von Kompositfüllungen durch lichtleitende und lichtstreuende Glaskeramikeinsätze - eine In-vitro-Untersuchung. Med. Diss., Berlin.

**Lucena-Martin,C., Gonzalez-Rodriguez,M.P., Ferrer-Luque,C.M., Robles-Gijon,V., Navajas,J.M. (1999):**

Study of the shear bond strength of five one-component adhesives under simulated pulpal pressure. Oper Dent 24, 73-80.

**Luescher,B., Lutz,F., Ochsenbein,H., Mühlemann,H.R. (1977):**

Microleakage and marginal adaptation in conventional and adhesive Class II restorations. J Prosthet Dent 37, 300-309.

**Lussi,A., Schaffner,M., Suter,P., Hotz,P. (1989):**

Toxikologie der Amalgame. Schweiz. Monatsschr. Zahnmed. 99, 55-59.

**Mackert,J.R. (1991):**

Dental amalgam and mercury. J Am Assoc 122, 54-61.

**Manhart,J., Hollwich,B., Mehl,A., Kunzelmann,K.-H., Hickel,R. (1999):**

Randqualität von Ormocer- und Kompositfüllungen in Klasse-II-Kavitäten nach künstlicher Alterung. Dtsch. Zahnärztl. Z 54, 89-95.

**Mazer,R.B., Cury,C., Teixeira,L., Leinfelder,K. (1994):**

Influence of maleic acid on the retention of abfracted lesion restorations. J Dent Res 73, 275, Abstr. No. 1389.

**Mehl,A., Hartl,S., Kunzelmann,K.H., Hickel,R. (1994):**

Quantitative und qualitative Randspaltanalyse zervikaler Füllungen. Dtsch Zahnärztl Z 49, 815-818.

**Miyazaki,M., Sato,M., Onose,H., Moore,B.K. (1998):**

Influence of thermal cycling on dentin bond strength of two-step bonding systems. Am J Dent 11, 118-122.

**Miyazaki,M., Onose,H., Moore,B.K. (2000):**

Effect of operator variability on dentin bond strength of two-step bonding systems.  
Am J Dent 13, 101-104.

**Miyazaki,M., Sato,M, Onose,H. (2000):**

Durability of enamel bond strength of simplified bonding systems.  
Oper Dent 25, 75-80.

**Molla,K., Park,H.J., Haller,B. (2002):**

Bond strength of adhesive/composite combinations to dentin involving total- and self-etch adhesives. J Adhes Dent 4, 171-180.

**Moore,D.H., Vann,W.F. (1988):**

The effect of a cavosurface bevel on microleakage in posterior composite restorations. J Prosthet Dent 59, 21-24.

**Munehika,T., Suzuki,K., Nishiyama,M., Ohashi,M., Horie,K. (1984):**

A comparison of the tensile bond strengths of composite resins to longitudinal and transverse sections of enamel prisms in human teeth. J Dent Res 63, 1079-1082.

**Nikaido,T., Kunzelmann,K.H., Ogata,M., Harada,N., Yamaguchi,S., Cox,C.F., Hickels,R., Tagami, J. (2002):**

The in vitro dentin bond strengths of two adhesive systems in Class I cavities of human molars. J Adhes Dent 4, 31-39.

**Nikolaenko,S.A., Lohbauer,U., Roggendorf,M., Petschelt,A., Dasch,W., Frankenberger,R. (2004):**

Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin.  
Dent Mater 20, 579-585.

**Noack,M.J. (1988):**

Quantitative Füllungsrandanalyse von Frontzahnkompositen im Rasterelektronenmikroskop nach thermischer Wechselbelastung.  
Dtsch Zahnärztl Z 43, 295-299.

**Ogata,M., Nakajima,M., Sano,H., Tagami,J. (1999).**

Effect of primer application on regional bond strength to cervical wedge-shaped cavity walls. Oper Dent 24, 81-88.

**Opdam,N.J.M., Roeters,J.J.M., Kuijs,R., Burgersdijk,R.C.W. (1998):**

Necessity of bevels for box only Class II composite restorations.

J Prosthet. Dent. 80, 274-279.

**Pashley,D.H., Sano,H., Ciucchi,B., Yoshiyama,M., Carvalho,R.M. (1995):**

Adhesion testing of dentin bonding agents: a review. Dent Mater 11, 117-125.

**Pashley,D.H., Tay,F.R. (2001):**

Aggressiveness of contemporary self-etching adhesives. Part II: etching effects on underground enamel. Dent Mat 17, 430-444.

**Perdigao,J., Geraldeli,S., Heymann,H.o., Rosa,B.T. (2000):**

Effect of conditioner and restorative resin on enamel bond strengths.

Am J Dent 13, 88-92.

**Peutzfeldt,A., Asmussen,E. (2004):**

Determinants of in vitro gap formation of resin composites. J Dent 32, 109-115.

**Porte,A., Lutz,F., Lund,M.R., Swartz,M.L., Cochran,M.A. (1984):**

Cavity design for composite resins. Poer Dent 9, 50-56.

**Prati,C., Chersoni,S., Cretti,L., Mongiorgi,R. (1997):**

Marginal morphology of Class V composite restorations. Am J Dent 10, 231-236.

**Rosa,B.T., Perdigao,J. (2000):**

Bond strengths of nonrising adhesives. J Prosthet Dent 83, 353-358.

**Reinhardt,K.J., Vahl,J., Tölle,F. (1984):**

Vergleichende Untersuchungen zur Tauglichkeit von Kompositen im Seitenzahnbereich. Dtsch Zahnärztl Z 39, 105-109.

**Reinhardt,K.J. (1997):**

Aktuelle Perspektiven der Dentin-Haftvermittlung. Phil J 14, 101-112.

**Retief,D.H. (19994):**

Do adhesives prevent microleakage ? Int Dent J 44, 19-26.

**Rosa,B.T., Perdigao,J. (2000):**

Bond strengths of nonrising adhesives. J Prosthet Dent 83, 353-358.

**Rupp,N.W. (1979):**

Clinical placement and performance of composite resin restorations.

J Dent Res 58, 1551-1557

**Sano,H., Takatsu,T. Ciucchi,B., Horner,J.A., Matthews,W.G., Pashley,D.H. (1995):**

Nanoleakage: leakage within the hybrid layer. Oper Dent 20, 18-25.

**Santini,A., Plasschaert,A.J.M., Mitchell,S. (2001):**

Effect of composite resin placement techniques on the microleakage of two self-etching dentin-bonding agents. Am J Dent 14, 132-136.

**Schaller,H.G., Götze,W. (1993):**

Der Einfluß verschiedener Dentinhaftvermittler auf die Dentinpermeabilität.

Dtsch Zahnärztl Z 48, 728-732.

**Schaller,H.G., Kielbassa,A.M., Daiber,B. (1994):**

Die Zughaftung verschiedener Dentinhaftvermittler in Abhängigkeit von der Dentinpermeabilität. Dtsch. Zahnärztl. Z 49, 830-833.

**Schiele,R. (1991):**

Die Amalgamfüllung – Verträglichkeit. Dtsch. Zahnärztl. Z 46, 515-517.

**Schuckar,M., Geurtsen,W. (1997):**

Proximo-cervical adaptation of Class II-composite restorations after thermocycling: a quantitative and qualitative study. J Oral Rehabil. 24, 766-775.

**Seichter,U., Herforth,A. (1980):**

Vergleichende rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen über die Randspaltbreite verschiedener Composite und über die diesbezügliche Wiedergabegenauigkeit unterschiedlicher Replikas. Dtsch Zahnärztl Z 35, 511-515.

**Senawongse,P., Sattabanasuk,V., Shimada,Y., Otsuki,M., Tagami,J. (2004):**

Bond strengths of current adhesive systems on intact and ground enamel. J Esthet Restor Dent 16, 107-115.

**Soltesz,U. (1998):**

Polymerisationsschrumpfung einiger neuerer Komposit-Füllungswerkstoffe. Zahnärztl. Mitl. 88, 1404-1406.

**Soltesz,U. (1999):**

Polymerisationsschrumpfung von „Definite“ – Korrekturwerte. Zahnärztl. Mitl. 89, 58-59.

**Spohr,A.M., Conceicao,E.N., Pacheco,J.F.M. (2001):**

Tensile bond strength of four adhesive systems to dentin. Am J Dent 14, 247-251.

**Stiesch,M., Hannig,M., Albers,H.-K. (1997):**

Randqualität von Kompositfüllungen nach Dentinkonditionierung mit dem Er:YAG-Laser. Eine rasterelektronenmikroskopische Untersuchung an Klasse-II-Kavitäten. Dtsch Zahnärztl. Z 52, 833-835.

**Swift,E.J., Perdigo,J., Heyman,H.O. (1995):**

Bonding to enamel and dentin: a brief history and state of the art. Quintess Int 26, 95-110.

**Szep,S., Kessler,B., May,A., Langner,N., Gernhardt,T., Schriever,A., Becker,J., Heidemann,D. (2001):**

Haftkraft und Randschlussverhalten moderner Dentinhaftvermittlersysteme bei simuliertem Liquordruck in vitro. Dtsch Zahnärztl Z 56, 532-538.

**Tay,F.R., Gwinnett,A.J., Wei,S.H.Y. (1997):**

Ultrastructure of the resin-dentin interface following reversible and irreversible rewetting. Am J Dent 10: 77-82.

**Tay,F.R., King,N.M., Suh,B.I., Pashley,D. (2001):**

Effect of delayed activation of light-cured resin composites on bonding of all-in-one adhesives. J Adhes Dent 3, 207-225.

**Tay,F.R., King,N.M., Chan,K., Pashley,D. (2002a):**

How can nanoleakage occur in self-etching adhesive systems that demineralise and infiltrate simultaneously? J Adhes Dent 4, 255-269.

**Tay,F.R., Pashley,D.H., Yoshiyama,M. (2002b):**

Two modes of nanoleakage expression in single-step adhesives. J Dent Res 81, 472-476.

**Thonemann,BM., Federlin,M., Schmalz,G., Hiller,K.A. (1997):**

SEM analysis of marginal expansion and gap formation in class II composite restorations. Dent Mater 13, 192-197.

**Toledano,M., Osorio,R., de Leonardi,G., Rosales-Leal,J.I., Ceballos,L., Cabrerizo-Vilchez,M.A. (2001):**

Influence of self-etching primer on the resin adhesion to enamel and dentin. Am J Dent 14, 205-210.

**Torstenson,B. Brännström,M. (1988):**

Contraction gap under composite resin restorations: Effect of hygroscopic expansion and thermal stress. Oper Dent 13, 24-31.

**Uno,S., Finger,W.J. (1995):**

Function of the hybrid zone as a stress-absorbing layer in resin-dentinbonding.  
Quintess Int 26, 733-738.

**Van Meerbeek,B., Inokoshi,S., Braem,M., Lambrechts,P., Vanherle,G. (1992):**

Morphological aspects of the resin-dentin interdiffusion zone with different dentin adhesive systems. J Dent Res 71, 1530-1540.

**Van Meerbeek,B., Braem,M., Lambrechts,P., Vanherle,G. (1994):**

Dentinhaftung: Mechanismen und klinische Resultate.  
Dtsch Zahnärztl Z 49, 977-984.

**Van Meerbeek,B., Yoshida.Y., Snauwaert,J., Hellemans,L., Lambrechts,P., Vanherle,G., Wakasa,K., Pashley,D.H. (1999):**

Hybridization effectiveness of a two-step versus a three-step smear layer removing adhesive system examined correlatively by TEM and AFM. J Adhes Dent 1, 7-23.

**Versluis,A., Douglas,W.H., Cross,M., Sakaguchi,R.L. (1996):**

Does an incremental filling technique reduce polymerization shrinkage stresses?  
J Dent Res 75, 871-878.

**Weinle,S. (1993):**

Der Einfluss modifizierter Präparationsformen auf die Randqualität von Kompositinlays aus SR-Isosit. Med. Diss., Kiel.

**Weinmann,W., Thalacker,C., Guggenberger,R. (2005):**

Siloranen in dental composites. Dent Mater 21, 68-74.

**Winkler,M.M., Katona,T.R., Paydar,N.H. (1996):**

Finite element stress analysis of three filling techniques for class V light-cured composite restorations. J Dent Res 75, 1477-1483.

**Yoshikawa,T., Sano,H., Burrow,M.F., Tagami,J., Pashley,D.H. (1999):**

Effects of Dentin Depth and Cavity Configuration on Bond Strength.  
J Dent Res 78, 898-905.

## 9 Anhang

Tab. 1-1 Anwendung der Adhäsivsysteme in den Versuchsgruppen I-VI

Gruppe	Produkt (Hersteller)	Komponenten (Lot)	Anwendung
I, II	<b>Syntac Classic</b> (Ivoclar Vivadent)	Phosphorsäuregel Total Etch TM 37% (D 13745)  Syntac Primer (D 58443)  Syntac Adhäsiv (D 56955)  Heliobond (D 57302)	- Schmelz ätzen für 60 s - absprayen für 30 s, trocknen  - in Dentin einmassieren für 30 s - 15 s einwirken lassen - vorsichtig verblasen für 10 s - in Dentin einmassieren für 30 s - 10 s einwirken lassen - vorsichtig verblasen für 10 s - auf Schmelz und Dentin auftragen - zu einer dünnen Schicht verblasen - 20 s lichthärten von approximal - 20 s lichthärten von okklusal
III	<b>Hermes Bond</b> (3M Espe)	Phosphorsäuregel Total Etch TM 37% (D 13745)  Hermes Bond A (J-173-10/01-A)  Hermes Bond B (J-173-10/01-B)  Hermes Bond C (J-173-10/01-C)	- Schmelz ätzen für 30 s - absprayen für 30 s, trocknen  - Hermes Adhäsiv liquid A, liquid B und Liquid C im Verhältnis 2:2:1 mischen - in Schmelz und Dentin einmassieren für 30 s - vorsichtig verblasen - 10 s lichthärten

<b>IV</b>	<b>Syntac Classic</b> (Ivoclar Vivadent)	Phosphorsäuregel Total Etch TM 37% (D 58417)  Syntac Primer (D 58443)  Syntac Adhäsiv (D 56955)  Heliobond (D 57302)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schmelz ätzen für 60 s</li> <li>- absprayen für 30 s, trocknen</li> <li>- in Dentin einmassieren für 30 s</li> <li>- 15 s einwirken lassen</li> <li>- vorsichtig verblasen für 10 s</li> <li>- in Dentin einmassieren für 30 s</li> <li>- 10 s einwirken lassen</li> <li>- vorsichtig verblasen für 10 s</li> <li>- auf Schmelz und Dentin auftragen</li> <li>- zu einer dünnen Schicht verblasen</li> <li>- 10 s lichthärten von approximal</li> <li>- 10 s lichthärten von okklusal</li> </ul>
<b>V</b>	<b>Admira Bond</b> (Voco)	Phosphorsäuregel Total Etch TM 37% (D 13745 und D 58417)  Admira Bond (15601)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Schmelz ätzen für 30 s</li> <li>- Dentin ätzen für 15 s</li> <li>- absprayen für 20 s, trocknen</li> <li>- Dentin nochmals befeuchten</li> <li>- Admira Bond auf Schmelz und Dentin auftragen für 30 s</li> <li>- vorsichtig verblasen</li> <li>- 20 s lichthärten</li> </ul>

<b>VI</b>	<b>Self Etch Prime &amp; Bonding</b> (Ivoclar Vivadent)	Self Etch Primer (D 47826)  Self Etch Bonding (D 49553)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Self Etch Primer in Schmelz und Dentin einmassieren für 15 s</li><li>- 15 s einwirken lassen</li><li>- vorsichtig verblasen</li><li>- Self Etch Bonding auf Dentin und Schmelz auftragen</li><li>- 10 s einwirken lassen</li><li>- vorsichtig verblasen</li><li>- 20 s lichthärten von approximal</li><li>- 20 s lichthärten von okklusal</li></ul>
-----------	--	---	---

**Tab. 1-2 Anwendung der Kompositmaterialien in den Versuchsgruppen I-VI**

<b>Gruppe</b>	<b>Produkt (Hersteller)</b>	<b>Polymerisations- lampe (Lot)</b>	<b>Anwendung</b>
<b>I, II</b>	<b>Tetric Ceram</b> (Ivoclar Vivadent) I: D 19366 II: D55324 Farbe A2	Epilar Highlight (3M Espe) 2001/355951	- Applikation in 2 mm dicken Schichten - Polymerisation 40 s pro Schicht
<b>III</b>	<b>Hermes</b> (3M Espe) A-05	Astralis 10 (Ivoclar Vivadent) 010903	- Applikation in 2 mm dicken Schichten - Polymerisation 10 s pro Schicht
<b>IV</b>	<b>In Ten-S</b> (Ivoclar Vivadent) D 51683 Farbe A3	Astralis 10	- Applikation in 2 mm dicken Schichten - Polymerisation 10 s pro Schicht
<b>V</b>	<b>Admira</b> (Voco) 15629 Farbe A3	Optilux (Demtron Research Corporation)	- Applikation in 2 mm dicken Schichten - Polymerisation 60 s pro Schicht
<b>VI</b>	<b>In Ten-S</b> (Ivoclar Vivadent) D 51683 Farbe A3	Astralis 10	- Applikation in 2 mm dicken Schichten - Polymerisation 10 s pro Schicht

**Tab. 2 Verwendete Füllungsmaterialien in den Versuchsgruppen I-VI und Inhaltsstoffe ihrer Systemkomponenten**

Gruppe	Produkt (Hersteller)	Komponenten	Inhaltsstoffe
<b>I, II</b>	<b>Syntac Classic</b> (Ivoclar Vivadent; Schaan, Liechtenstein)	Syntac Primer (D 58443)	Tetraethylenglycoldimethacrylat Maleinsäure in wässriger Acetonlösung
		Syntac Adhäsiv (D 56955)	Polyethylenglycoldimethacrylat Glutaraldehyd 50 % in wässriger Lösung
		Heliobond (D 57302)	Bis-GMA TEGDMA
	<b>Tetric ceram</b> (Ivoclar Vivadent; Schaan, Liechtenstein) I: D 19366 II: D55324 Farbe A2	Tetric Ceram	Bis-GMA Urethandimethacrylat Triethylenglycoldimethacrylat Bariumglasfüller, silanisiert Ytterbiumtrifluorid Mischoxid, silanisiert Ba-Al-Fluorosilikatglas, silanisiert Hochdisperses Siliziumdioxid, sil. Additive Katalysatoren und Stabilisatoren Pigmente

<b>III</b>	<b>Hermes Bond</b> (3M Espe; D-Seefeld)  <b>Hermes</b> (3M Espe; D-Seefeld) A-05	Hermes Bond A (J-173-10/01-A)  Hermes Bond B (J-173-10/01-B)  Hermes Bond C (J-173-10/01-C)  Hermes	Phosphorsäuremonomere Comonomere Wasser Initiatoren Stabilisatoren  Siloran-Matrix Füllstoffe (ultrafeiner Quarz und Yttriumfluorid) Initiatoren und Stabilisatoren Farbpigmente
<b>IV</b>	<b>Syntac Classic</b> (Ivoclar Vivadent; Schaan, Liechtenstein)  <b>In Ten-S</b> (Ivoclar Vivadent; Schaan, Liechtenstein) D 51683 Farbe A3	Syntac Primer (D 58443)  Syntac Adhäsiv (D 56955)  Heliobond (D 57302)  In Ten-S	Tetraethylglycoldimethacrylat Maleinsäure in wässriger Acetonlösung  Polyethylglycoldimethacrylat Glutaraldehyd 50 % in wässriger Lösung  Bis-GMA TEGDMA  Dimethacrylate Bariumglasfüller, silanisiert Copolymer Ytterbiumtrifluorid Stabilisatoren, Katalysatoren Additive, Pigmente

<b>V</b>	<b>Admira Bond</b> (Voco; D-Cuxhaven)  <b>Admira</b> (Voco; D-Cuxhaven) 15629 Farbe A3	Admira Bond (15601)  Admira	Ormocere Bis-GMA HEMA BHT Aceton Organische Säuren  Bis-GMA Diurethandimethacrylat BHT TEGDMA Erdalkalisilikatglas Hochdisperses Siliciumdioxid Pigmente, Stabilisatoren, Kampferchinon
<b>VI</b>	<b>Self Etch Prime &amp; Bonding</b> (Ivoclar Vivadent; Schaan, Liechtenstein)  <b>In Ten-S</b> (Ivoclar Vivadent; Schaan, Liechtenstein) D 51683 Farbe A3	Self Etch Primer (D 47826)  Self Etch Bonding (D 49553)  In Ten-S	Phosphonsäureacrylat Bis-Acrylsäureamid Wasser Initiatoren, Stabilisatoren  Dimethacrylate Hydroxyethylmethacrylat Hochdisperses Siliciumdioxid Initiatoren, Stabilisatoren  Dimethacrylate Bariumglasfüller, silanisiert Copolymer Ytterbiumtrifluorid Stabilisatoren, Katalysatoren Additive, Pigmente

Abkürzungen der Inhaltsstoffe der verwendeten Füllungsmaterialien:

- Bis-GMA = Bisphenol-A-diglycidyl-methacrylat
- HEMA = Hydroxyethylmethacrylat
- TEG-DMA = Triethylenglycol-dimethacrylat
- BHT = Butylhydroxytoluol

## 10 Danksagung

Mein hauptsächlicher Dank gilt **Herrn Prof. Dr. M. Hannig** für die Überlassung des Themas und die stets freundliche Unterstützung und jederzeit gewährte Hilfe bei der praktischen Umsetzung und Anfertigung dieser Arbeit.

**Herrn Prof. Dr. Weislämle** von der Berufsakademie Lörrach danke ich für die unerwartet spontane Hilfe bei der statistischen Analyse der Ergebnisse.

Mein besonderer Dank gebührt meiner Mutter **Beate Polkehn** für alles, was sie mir ermöglicht hat, und meinem Mann **Jörg Gärtner**, der mit Verständnis, Rücksichtnahme und liebevoller Unterstützung entscheidend zur erfolgreichen Fertigstellung diese Arbeit beigetragen hat.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Andrea Gärtner, geb. Redweik

Anschrift: Neudorfer Str. 12  
79541 Lörrach  
Tel.: 07621 / 168 771  
Mail : andrea.gaertner@arcor.de

Geburtstag und –ort : 6. Mai 1971 in Berlin  
Staatsangehörigkeit: deutsch  
Familienstand: verheiratet, ein Kind(\*2002)

## Schulbildung

1977 - 1983 Michael- Grzimek- Grundschule in Berlin  
1983 - 1991 Walther- Rathenau- Gymnasium in Berlin  
Juni 1991 Abitur

## Berufsausbildung

Sept.1991 - Sept.1993 Ausbildung zur medizinisch- technischen  
Laboratoriumsassistentin an der Landeslehranstalt  
für technische Assistenten in der Medizin Berlin  
Sept. 1993 Staatsexamen zur MTLA

Okt.1993 - Jan. 2001 Studium der Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde  
an der Freien Universität Berlin  
Januar 2001 Staatsexamen und Approbation als Zahnärztin

## Praktika / Tätigkeiten während des Studiums

1994 / 1995 Regelmäßige stundenweise Arbeit als MTLA in einer  
urologischen Arztpraxis

Juli / August 1998 Zahnärztliches Praktikum an der Universitätsklinik  
Paul – Sabatier in Toulouse / Frankreich

## Berufstätigkeit

März 2001 - März 2002 Assistenz Zahnärztin in einer niedergelassenen  
Zahnarztpraxis im Landkreis Lörrach

April 2002 – Sept. 2003 Elternzeit  
seit Okt. 2003 Assistenz Zahnärztin in einer weiteren niedergelassenen  
Zahnarztpraxis im Landkreis Lörrach

Lörrach, den 25.10.2005