Aus der Abteilung für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Einfluss der Primereinwirkzeit auf die Randqualität von Klasse-V-Kompositfüllungen in Abhängigkeit von der Konditionierungszeit. Eine In-vitro-Studie

zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor medicinae dentariae (Dr. med. dent.)

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Zahnarzt Sebastian Albrecht

aus Berlin

Datum der Promotion: 22.06.2014

Meinen Eltern

INHALTSVERZEICHNIS

1 ABSTRAKT 8

2 ABSTRACT 10

3 EINLEITUNG 12

4 LITERATURÜBERSICHT 14

4.1 KOMPOSITMATERIALIEN 14
4.1.1 ORGANISCHE PHASE 14
4.1.2 ANORGANISCHE PHASE 15
4.1.2.1 Mikrofüllerkomplexe 15
4.1.2.2 Nanofüller 16
4.1.3 VERBUNDPHASE 16
4.1.4 WERKSTOFFKUNDLICHE EIGENSCHAFTEN DER KOMPOSITE 17
4.1.4.1 Polymerisationsschrumpfung 17
4.1.4.2 Flow 18
4.1.4.3 Elastizitätsmodul 18
4.1.4.4 Hygroskopische Expansion 19
4.1.4.5 Thermisches Volumenverhalten 19
4.2 ADHÄSIVTECHNIK 20
4.2.1 STRUKTURMERKMALE DES SCHMELZES 21
4.2.2 DIE ETCH & RINSE-TECHNIK 22
4.2.3 DENTIN 25
4.2.3.1 Aufbau und Struktur des Dentins 25
4.2.3.2 Haftung am Dentin 26
4.2.4 EINTEILUNG DER ADHÄSIVSYSTEME 28

5 ZIELSTELLUNG 30

6 MATERIAL UND METHODE 32

6.1 VERWENDETE ADHÄSIVE UND KOMPOSITE 32
6.2 HERSTELLUNG DER PROBEN 34
6.2.1 VERWENDETE ZÄHNE 34
6.2.2 KAVITÄTENPRÄPARATION 34
6.2.3 KONDITIONIERUNGSZEIT DER PHOSPHORSÄURE IM DENTIN UND SCHMELZ 35
6.2.4 APPLIKATION DER VERSCHIEDENEN PRIMER 35
6.2.5 APPLIKATION DES KOMPOSITMATERIALS 35
6.2.6 AUSARBEITUNG DER PROBEN 36
6.2.7 WASSERLAGERUNG 36
6.2.8 REPLIKAABFORMUNG 36
6.2.9 REPLIKAHERSTELLUNG 37
6.2.10 THERMISCHE WECHSELBADBELASTUNG 37
6.2.11 ERNEUTE REPLIKAHERSTELLUNG 38

6.2.12 QUANTITATIVE RANDANALYSE MIT DEM REM 38
6.3 STATISTISCHE AUSWERTUNG 40

7 ERGEBNISSE 41

7.1 ERGEBNISSE IM BEREICH DENTIN 41
7.1.1 ERGEBNISSE OPTIBOND FL 42
7.1.2 ERGEBNISSE PRIME&BOND NT 43
7.1.3 ERGEBNISSE EXCITE 44
7.1.4 VERGLEICH DER ADHÄSIVE 45
7.1.4.1 Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierungszeit von 15 s 45
7.1.4.2 Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierungszeit von 30 s 46
7.1.4.3 Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierungszeit von 60 s 47
7.2 ERGEBNISSE IM BEREICH SCHMELZ 48

8 DISKUSSION 49

8.1 METHODENKRITISCHER TEIL 49
8.1.1 DIE FUNKTIONELLE UNTERSUCHUNGSMETHODE 50
8.1.2 DIE MORPHOLOGISCHE UNTERSUCHUNGSMETHODE 50
8.1.3 AUSWAHL UND LAGERUNG DER ZÄHNE 51
8.1.4 LAGE UND PRÄPARATIONSFORM DER KAVITÄT 52
8.1.5 AUSWAHL UND VERARBEITUNG DER MATERIALIEN 53
8.1.5.1 Das Kompositmaterial 53
8.1.5.2 Die Adhäsivsysteme 54
8.1.5.3 Ausarbeitung und Politur der Füllungen 56
8.1.5.4 Wasserlagerung 56
8.1.5.5 Thermische Wechselbadbelastung 57
8.1.5.6 Einfluss der Dentintrocknung 57
8.2 DISKUSSION DER ERGEBNISSE 58
8.2.1 EINFLUSS DER KONDITIONIERUNGSZEIT 58
8.2.2 EINFLUSS DER PRIMEREINWIRKZEIT 60
8.2.3 VERGLEICH DER ADHÄSIVPRODUKTE VERSCHIEDENER HERSTELLER 61
8.2.4 EINFLUSS DER TEMPERATURWECHSELBADBELASTUNG 62
8.2.4.1 Einfluss der TWB bei OptiBond FL im Dentin 63
8.2.4.2 Einfluss der TWB bei Prime&Bond NT im Dentin 64
8.2.4.3 Einfluss der TWB bei Excite im Dentin 64

9 SCHLUSSFOLGERUNG 65

10 LITERATURVERZEICHNIS 67

11 ANHANG 85

11.1 ERGEBNISSE DER STATISTISCHEN AUSWERTUNG 85
11.1.1 DESKRIPTIVE STATISTIK 85
11.1.2 NONPARAMETRISCHE VARIANZANALYSE, KRUSKAL-WALLIS-TEST 88
11.1.3 BONFERRONI NACHTESTUNG 89
11.1.4 NONPARAMETRISCHE VARIANZANALYSE, MANN-WHITNEY-U-TEST 90

11.1.5 WILCOXON-TEST 92
11.2 VERWENDETE GERÄTE UND MATERIALIEN 93
11.3 EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG 95
11.4 DANKSAGUNG 96
11.5 LEBENSLAUF 97

1 Abstrakt

Dauerhaft randspaltfreie Kompositrestaurationen in dentinbegrenzten Kavitäten sind aktuell noch immer schwer realisierbar. Ziel der vorliegenden Arbeit war ein Beitrag zur Klärung, ob bei der Anwendung von Etch & Rinse-Adhäsivsystemen eine verlängerte Einwirkzeit des Primers nach verlängerter Konditionierungszeit die Randqualität bei Klasse-V-Füllungen verbessert. Zusätzlich wurde der Einfluss der thermischen Wechselbadbelastung auf die Randqualität untersucht. In dieser In-vitro-Studie wurden 144 kariesfreie humane Prämolaren in 18 Gruppen zu je 8 Proben randomisiert aufgeteilt. 576 Untersuchungen wurden zur Ermittlung der Randqualität durchgeführt. Es wurden standardisierte Klasse-V-Kavitäten präpariert, mit Phosphorsäure konditioniert und nach dem Absprühen, Trocknen und dem Rewetting mit einem Adhäsiv (*OptiBond FL*, *Prime&Bond NT* oder *Excite*) behandelt. Die Konditionierungszeiten betrugen je nach Gruppe 15 s, 30 s oder 60 s und die Primereinwirkzeiten jeweils 30 s oder 60 s.

Das Komposit „Filtek Z250“ wurde in alle Kavitäten eingebracht und ausgearbeitet. Replika der Proben wurden jeweils nach 21 Tagen Wasserlagerung und nach einer thermischen Wechselbadbelastung (2000 Zyklen zwischen 5°C und 55°C, 30s Tauchzeit) hergestellt. Mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) wurden die Replika bei 200facher Vergrößerung nach standardisierten Kriterien untersucht. Die statistische Auswertung der Daten aus der quantitativen Randanalyse erfolgte in Bezug auf die Randqualität „Note 1“, der höchsten Randqualität.

Die Auswertung der Ergebnisse im Bereich Schmelz ergab bei keinem der drei Adhäsive signifikante Unterschiede zwischen den Konditionierungs- und Primereinwirkzeiten. Im Schmelzbereich war eine Konditionierungszeit von 15 s in Kombination mit einer Primereinwirkzeit von 30 s für die getesteten Adhäsive ausreichend. Längere Primereinwirkzeiten verbesserten auch bei längeren Konditionierungszeiten die Randqualität nicht.

Bei der Auswertung der Ergebnisse im Dentin gab es in Bezug auf die Randqualität der „Note 1“ folgende Ergebnisse:

Excite zeigte bei einer Primereinwirkzeit von 60 s und den Konditionierungszeiten von 15 s und 30 s signifikant bessere Ergebnisse im Vergleich zu einer Primereinwirkzeit von nur 30 s. *OptiBond FL* und *Prime&Bond NT* zeigten diesbezüglich keine signifikanten Unterschiede. Nur bei *Excite* führte eine längere Primereinwirkzeit nach einer verlängerten Konditionierungszeit zu einer signifikanten Verbesserung der Randqualität. *Excite* zeigte bei einer Primereinwirkzeit von 30 s und Konditionierungszeiten von 15 s und 30 s signifikant schlechtere Ergebnisse als *OptiBond FL*.

OptiBond FL und *Prime&Bond NT* zeigten signifikant bessere Ergebnisse bei einer Primereinwirkzeit von 30 s und einer Konditionierungszeit von 15 s im Vergleich zu *Excite* und sollten deshalb diesem vorgezogen werden.

2 Abstract

Marginal gap free composite restorations in a cavity with margins in dentin are still a challenge in restorative dentistry. The aim of this study was to evaluate the effect of prolonged application time of primers on the marginal adaption after extended times for demineralising enamel or dentin surfaces with phosphoric acid. Additionally, the influence of thermocycling procedures was investigated.

144 human caries free premolars were subjected to 576 marginal adaption examinations. Standardized class V cavities were prepared into caries-free human premolars. All cavities were conditioned by phosphoric acid for either 15 s, 30 s or 60 s, rewetted and then treated with one of the following etch & rinse adhesives *OptiBond FL*, *Prime&Bond NT*, *Excite* by applying the primer for either 30 s or 60 s.

The composite resin Filtek Z250 was incrementally placed in the cavities. After polishing the samples were stored in water for 21 days and then thermocycled (2000 cycles between 5 °C and 55 °C, exposure time 30 s). Before and after the thermocycling procedure replica were taken for the margin analysis in the SEM at a magnification of 200x using defined criteria.

Statistical evaluation of the quantitative margin analysis using SPSS for enamel showed neither significant differences between the different primer application periods nor between the different etching times regarding “margin quality 1”.

Analysis of dentin obtained the following results: *Excite* showed significantly better results when the primer was applied for 60 s compared to the results for 30 s. *OptiBond FL* and *Prime&Bond NT* did not show any significant differences in marginal adaptation regardless of the phosphoric acid etching and priming times.

There were no statistically significant differences between the results for *OptiBond FL* and *Prime&Bond NT*. Priming time of 60 s showed a significant effect for *Excite* for etching times of 15 s and 30 s. Additionally, only *Excite* showed significantly better results when applying the adhesive for 60 s.

The results showed, that a combination of 15 s phosphoric acid etching and 30 s of priming is sufficient for all tested adhesives in enamel. Extended priming time did not improve the marginal adaption, even if enamel is conditioned up to 60 s.

For dentin the sufficient priming time depended on the adhesive system used. For *Excite* a prolonged priming time for 60 s improved the margin quality after phosphoric acid etching for 15 s and 30 s.

For *OptiBond FL* and *Prime&Bond NT* an extended priming time did not improve the marginal adaption even if dentin is conditioned up to 60 s.

3 Einleitung

Karies ist eine weltweit verbreitete Erkrankung. Unbehandelt kann diese Munderkrankung zu Zahnverlust und damit zur Störung der Funktionsfähigkeit des oro-facialen Systems führen. Die restaurative Therapie der Karies ist trotz vieler erfolgreicher präventiver Maßnahmen immer noch notwendig für den Zahnerhalt. Die Versorgung des Kariesdefektes erfolgt mittels plastischer Füllungen, Inlays und Kronen. Die Füllungstherapie ist dabei die am häufigsten verwendete Therapieform mit dem geringsten Verlust an gesunder Zahnhartsubstanz. Bei der großen Anzahl von verfügbaren plastischen Füllungswerkstoffen werden die Kompositmaterialien inzwischen am häufigsten verwendet. Auch bei diesen modernen Füllungsmaterialien kommt es zu klinischen Misserfolgen, deren Hauptursache in der unzureichenden marginalen Adaptation des Kompositmaterials an die Zahnhartsubstanz zu finden ist [Pieper et al. 1989; Qvist et al. 1990; Browning and Dennison 1996]. Ein wesentliches Kriterium bei der Beurteilung einer zahnärztlichen Restauration aus Komposit ist die Qualität des Randschlusses zur angrenzenden Zahnhartsubstanz [Roulet 1987a; Rueggeberg 1991]. Bei unzureichender Randqualität kann es zum Eindringen von Farbstoffpigmenten und Bakterien kommen. Mögliche Folgen sind Sensibilitätsstörungen, Verfärbungen der Füllungsränder, Sekundärkaries, Füllungsverlust und eine pathologisch veränderte Pulpa [Brännström und Nyborg 1971; Cox 1994; Sasafuchi et al. 1999].

Dabei hat die angrenzende Zahnhartsubstanz einen großen Einfluss auf die Randqualität von adhäsiv befestigten Füllungsmaterialien [Eriksen und Buonocore 1976; Retief et al. 1982; Lösche 1999]. Es können mit modernen Adhäsivsystemen nahezu randspaltfreie Kunstoffrestaurationen in schmelzbegrenzte Kavitäten gelegt werden [Boeckler et al. 2012]. Deutlich schwieriger sind gute Ergebnisse in dentinbegrenzten Kavitäten zu bewerkstelligen [Pashley 1984, Friedl et al. 2000]. Randundichtigkeiten im Bereich des Dentins treten trotz ständiger Weiterentwicklung von

Adhäsivsystemen bis heute auf [Blunck 1988; Blunck und Roulet 1989; Krejci et al. 1991; Ravishanker und Chaitanya 2012]. Unter anderem sind die mit Liquor gefüllten Dentinkanälchen ein Grund für den schlechten Halt der Adhäsive im Dentin. Durch die feuchte Oberfläche können die hydrophoben Monomere keinen so guten Verbund wie im Schmelz erreichen. Durch den Einsatz von Primern erhält man deutlich bessere Verbundeigenschaften, da Primer sowohl hydrophobe als auch hydrophile Anteile besitzen, mit denen eine Verbindung zwischen dem hydrophilen Dentin und dem hydrophoben Komposit hergestellt werden kann [Haller und Trojanski 1998].

Durch Behandlung der Kavität mit Phosphorsäure vor dem Auftragen des Primers wird ein deutlich besserer Verbund hergestellt, sowohl am Schmelz als auch am Dentin [Blunck und Roulet 1989; Gwinnett und Yu 1995]. In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass durch längere Konditionierung der Zahnhartsubstanzen die Qualität des Füllungsrandschlusses vor allem im Dentin abnimmt [Frankenberger 2000; Peschke et al. 2000]. Man geht davon aus, dass die Primer in der Lage sind, durch längere Einwirkzeiten diesem Qualitätsverlust entgegen zu wirken.

Deshalb ist das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Randqualität von Kompositfüllungen in Abhängigkeit von der Kombination aus Konditionierungszeit und Einwirkzeit des Primers zu untersuchen.

4 Literaturübersicht

4.1 Kompositmaterialien

Die Einführung der Kompositmaterialien als Füllungsmaterial in den restaurativen Bereich der Zahnmedizin erfolgte 1958 durch Bowen. Komposite sind Füllungsmaterialien, die sich aus verschiedenen Bestandteilen zusammensetzen. Die Eigenschaften der Komposite unterscheiden sich je nach Zusammensetzung der Inhaltsstoffe [Brostow 1984].
Kompositmaterialien sind füllstoffverstärkte, polymerisierende Acrylate mit einer abgrenzbaren Verbundschicht [Lutz und Phillips 1983; Roulet 1987b; Ruyter 1988]. Man unterteilt den Aufbau der Komposite in die organische Phase, in die anorganische Phase und in die Verbundphase.

4.1.1 Organische Phase

Die organische Phase beinhaltet Monomere aus Di- und Triestern der Methacrylatsäure. Sie sind sehr reaktionsfreudig, können miteinander vernetzen und sehr stabile Strukturen bilden.
Die Monomere weisen geringfügig toxische Nebenwirkungen auf. Sie sind stabil, haben für die Zahnmedizin gute physikalische Eigenschaften und eine gute chemische Beständigkeit [Janda 1988a; Roulet 1987a; Söderholm 1995].
Ein bekannter Vertreter dieser Monomere ist das Bis-GMA (Bisphenol-A-Glycidyl-Methacrylat). Es ist ein hochviskoses, reaktionsfreudiges Monomer, welches sich durch Aufspaltung der Doppelbindungen am Ende des Moleküls zu einer formstabilen Molekularstruktur vernetzt. Durch die Zugabe von Dimethacrylaten konnte die Viskosität des Bis-GMA gesenkt werden. Des Weiteren wurde durch Zugabe von Füllkörpern zu der Monomermischung der Polymerisationsschrumpfung entgegengewirkt [Roulet 1987b; Söderholm 1995].
Der Monomermischung sind außerdem Initiatoren, Additive, Stabilisatoren und Farbpigmente beigefügt.

4.1.2 Anorganische Phase

Die anorganische Phase beinhaltet die Füllstoffe. Sie werden den Kompositen beigemengt, um sowohl die Abriebfestigkeit und Härte von Kompositen zu erhöhen als auch deren Polymerisationsschrumpfung zu verringern [Bowen 1979; Söderholm 1995]. Mit den Füllstoffen konnte der Elastizitätsmodul und der thermische Expansionskoeffizient verbessert sowie die Wasseraufnahme verringert werden

WILLEMS et al. teilen die Hybridkomposite nach Füllstoffdichte und Partikelgröße in mittelgefüllte Hybridkomposite (Füllstoffdichte < 60 %) und hochgefüllte Hybridkomposite (Füllstoffdichte > 60 %) ein [Willems et al. 1993].

Die Einteilung von Hybridkompositen in Bezug auf die mittlere Füllkörpergröße der enthaltenen Makrofüller ist eine weitere Unterscheidungsmöglichkeit [Ernst und Willershausen 2003]. Dabei werden Submikrometer- (< 1 µm), Feinstpartikel- (< 3 µm), Feinpartikel- (< 5 µm) und Hybridkomposite (< 10 µm) unterschieden.

4.1.2.1 Mikrofüllerkomplexe

Man unterscheidet konventionelle, homogene und inhomogene Mikrofüller- sowie Hybridkomposite [Lutz und Phillips 1983]. Die inhomogenen Mikrofüllerkomposite (auch als Mikrofüllerkomplexe bezeichnet) beinhalten als Füllstoffe silanisierte Vorpolymerisate von industriell zermahlenen homogenen Mikrofüllerkompositen und eine mit Siliziumdioxid angereicherte Matrix [Janda 1988b; Lutz und Phillips 1983; Roulet 1986]. Bei den Mikrofüllerkomplexen unterscheidet man splitterförmige und sphärische Vorpolymerisate sowie agglomerierte Mikrofüllerkomplexe. Inhomogene Mikrofüllerkomposite lassen sich gut ausarbeiten, polieren und verarbeiten [Ameye et al. 1981; Birk et al. 1981; Lutz und Phillips 1983; Roulet 1986]. Bei inhomogenen Mikrofüllerkompositen müssen als Nachteil eine erhöhte Polymerisationsschrumpfung und ein höherer thermischer Expansionskoeffizient angesehen werden [Lutz et al. 1983b; Roulet 1987b; Ernst et al. 2002].

Hybridkomposite besitzen neben den Mikrofüllern auch Makrofüller. Die Füllstoffpartikelgröße variiert von 0,01-50 µm. Hybridkomposite haben nach der Aushärtung sehr gute physikalische Eigenschaften, die Oberfläche lässt sich gut polieren und der Verschleiß bei mechanischer Belastung ist gering. Damit die Füllungen beim Röntgen sichtbar werden, wurden röntgenopake Stoffe in den hybriden Kompositmaterialien verarbeitet. Somit lassen sich auch Seitenzahnrestaurationen mit einem Kompositmaterial besser beurteilen und von einer Karies abgrenzen [Hein et al. 1989; Janda 1988b; Roulet 1986].

4.1.2.2 Nanofüller

Nanofüller sind Partikel mit einer Größe von unter 20 nm, welche ein Gewichtsanteil des Komposits von 40 % erreichen können, ohne die Viskosität des Komposits zu ändern. Die Partikel werden im Unterschied zu den anderen genannten Fülllstoffen nicht durch Mahlen, sondern durch das Sol-Gel-Verfahren hergestellt. Bei diesem Verfahren verhindert eine Oberflächenbeschichtung die gegenseitige Anlagerung und Agglomeration der Primärpartikel. Nanofüllerkomposite haben sich in klinischen Studien bewährt [Ernst und Willershausen 2003].

4.1.3 Verbundphase

Die Verbundphase dient der Vernetzung der organischen Phase mit der anorganischen Phase. Die Füllstoffpartikel werden dabei mit organischen Siliziumverbindungen, so genannten Silanen, beschichtet. Am häufigsten wird das Gamma-Methacryloxypropyltrimethoxysilan verwendet [Janda 1988]. Während der Silanisierung der Füllkörper reagieren die OH-Gruppen des Silans mit der Füllstoffpartikeloberfläche, die dadurch hydrophob wird. Die eigentliche Verbindung mit der organischen Phase entsteht durch die Polymerisationsreaktion der Methacrylgruppe des Silans mit dem Monomer. Durch die Verbundphase verbessern sich nach der Aushärtung die physikalischen Eigenschaften, wie Biege-, Druckfestigkeit und Härte des Komposits [Söderholm 1988].

4.1.4 Werkstoffkundliche Eigenschaften der Komposite

4.1.4.1 Polymerisationsschrumpfung

Bei der Polymerisationsreaktion verbinden sich Monomere zu einem Makromolekül. Dabei kommt es zu einer Volumenabnahme, die als Polymerisationsschrumpfung bezeichnet wird.

Sie kann durch verschiedene Messverfahren beschrieben werden. Volumenbezogen wird sie mit 1,5-7,1 Vol.-% [Bausch et al. 1982; Davidson und de Gee 1984; Feilzer et al. 1988] und als lineare Schrumpfung mit 0,42-0,99 lin % angegeben [Hegdahl und Gjerdet 1977; Donly 1990]. Die Größe der Schrumpfung hängt von der Monomergröße, der Konzentration von Füllstoffen, der Konzentration von Initiatoren und den Porositäten im Komposit ab [Asmussen 1975; Roulet 1986; Janda 1988c].

Nicht nur die Polymerisationsschrumpfung selbst, sondern auch die mit ihr einhergehenden Spannungen am Kavitätenrand haben Einfluss auf das Randschlussverhalten des Kompositmaterials an der Zahnhartsubstanz [Bowen 1967; Hegdahl und Gjerdet 1977; Davidson und de Gee 1984]. Die Spannungen am Kavitätenrand können dort zum Verlust der Haftung führen, wodurch Sekundärkaries und Sensibilitäten auftreten können [Retief 1973; Bergenholtz et al. 1982; Brännström 1986; Pashley und Pashley 1991]. Die Spannungsstärke der Polymerisationsschrumpfung hängt maßgeblich vom Fließverhalten des Komposits ab [Feilzer et al. 1990a].

Die durch Licht initiiert polymerisierenden Komposite werden in Schichttechnik aufgebaut und jede einzelne Schicht für sich ausgehärtet. Das hat den Vorteil, dass der zervikale Randschluss bei größeren Füllungen durch eine dichtere Adaptation verbessert wird. Gleichzeitig ist somit eine gleichmäßige Lichtaushärtung der Kompositfüllung garantiert. Bei flachen Zahnhalskavitäten ist auch eine einzelne Kompositschicht vertretbar, da das Polymerisationslicht bis auf den Kavitätenboden in genügendem Maße reicht [Versluis et al. 1996; Winkler et al. 1996; Fortin und Vargas 2000]. Die Polymerisationsschrumpfung folgt nicht dem Polymerisationslichtstrahl, sondern richtet sich nach der Kavitätenform bzw. der Haftfläche [Versluis et al. 1998].

4.1.4.2 Flow

Die im Komposit auftretenden Spannungen während der Abbindung können die elastische Grenze des Materials überschreiten und zu einer plastischen Deformierung führen [Davidson et al. 1997].
In der anfänglichen Phase der Polymerisation schreitet die Kettenbildung in Abhängigkeit vom Initialisierungsmechanismus nur langsam voran. Das Komposit ist noch weich und der Flow kann die Spannungen gut kompensieren. Mit zunehmender Vernetzung wird das Kompositmaterial fester und die Spannungskompensation durch den Flow nimmt ab [Davidson und de Gee 1984]. Die Spannungen im Material werden auf die angrenzenden Kavitätenwände übertragen und können den adhäsiven Verbund beeinträchtigen [Feilzer et al. 1990b; Van Meerbeek et al. 1992b]. Die Polymerisationsspannungen sind dabei von der Kavitätenform abhängig, im Besonderen vom Verhältnis von gebundener zu ungebundener Oberfläche, dem so genannten C-Faktor [Feilzer et al. 1987].

4.1.4.3 Elastizitätsmodul

Die aus dem Verhältnis von Spannung und Dehnung bei Zug- bzw. Druckbelastungen errechnete Materialkonstante wird als Elastizitätsmodul bezeichnet.
Ein großer Elastizitätsmodulwert bedeutet, dass es bei einer definierten Kraft, die auf eine definierte Fläche wirkt, nur zu einer geringen Deformierung des Materials kommt. Komposite mit einem hohen Gehalt an Füllstoffpartikeln haben einen großen Elastizitätsmodul, eine geringe Polymerisationsschrumpfung, aber große Polymerisationsspannungen [Van Meerbeek et al. 1992a]. Für Kompositmaterialien wird ein Elastizitätsmodul in der Größe von 10-27 GPa angegeben. Im Gegensatz zu den Kompositen liegen die Elastizitätsmodulwerte von Kompomeren und Glasionomerzementen im Bereich von 5-20 GPa [Roulet 1988; Willems et al. 1993]. Für die Randqualität von Klasse-V-Füllungen ist ein kleiner Elastizitätsmodul von Vorteil, da die Polymerisationsschrumpfung durch die besondere Form der Kavität

ausgeglichen werden kann [Kemp-Scholte und Davidson 1990].

4.1.4.4 Hygroskopische Expansion

Unter der hygroskopischen Expansion versteht man die Ausdehnung des bereits polymerisierten Komposits durch die Aufnahme von Wasser im Kompositmaterial. Wasser gelangt durch Diffusion in die organische Phase des Komposits. Dieser Prozess führt zu einer Größenänderung des Intermolekularabstandes und geht mit einer Expansion des Materials einher. Durch die Expansion kommt es zu einer Beeinträchtigung der mechanischen Eigenschaften des Komposits [Söderholm 1988].

Die Gesamtmenge des eingelagerten Wassers ist abhängig vom prozentualen Füllstoffgehalt, den Oberflächeneigenschaften der Füllstoffpartikel und den Monomeren in der organischen Phase des Komposits [Janda 1988a; Söderholm 1988]. Vom Zeitpunkt der Füllungslegung erfolgt diese Wassereinlagerung über einen längeren Zeitraum [Momoi und McCabe 1994]. Ob die Volumenzunahme durch die Wassereinlagerung als Kompensation der Polymerisationsschrumpfung angesehen werden darf, wird in der Literatur kontrovers diskutiert [Bowen et al. 1982; Hansen und Asmussen 1989; Feilzer et al. 1990a]. Es ist fraglich, ob diese Kompensation zu einer Verbesserung des Randschlusses führt [Hansen und Asmussen 1989], denn ein Haftverlust im marginalen Bereich kann dadurch nicht wieder rückgängig gemacht werden.

Zu viel aufgenommenes Wasser kann zu Expansionsspannungen führen, die Füllung wölbt sich über den Kavitätenrand und bietet eine Retentionsmöglichkeit für Plaque und Mikroorganismen [Van Meerbeek et al. 1992a].

4.1.4.5 Thermisches Volumenverhalten

Die relative Längenänderung eines Materials bei einer Temperaturänderung von einem Grad Kelvin gibt der lineare thermische Expansionskoeffizient α an. Die Werte bei Kompositmaterialien liegen zwischen 20 x 10^{-6}/K und 60 x 10^{-6}/K

[Dermann et al. 1979]. Dieser Wert ist im Wesentlichen abhängig vom Anteil der Füllkörper im Komposit und deren physikalischen und mechanischen Eigenschaften [Wendt et al. 1992]. Die Werte der natürlichen Zahnhartsubstanz liegen zwischen 8 x 10^{-6}/K und 10 x 10^{-6}/K [Stettmaier et al. 1978]. Diese unterschiedlich großen Expansionskoeffizienten können bei starken Temperaturschwankungen einen negativen Effekt auf die marginale Adaptation haben und es kann im Randbereich der Füllung zu Perkolationseffekten kommen [Asmussen 1974; Eakle 1986; Bullard et al. 1988; Torstenson und Brännström 1988].

4.2 Adhäsivtechnik

Die Haftung einer Füllung auf der Zahnhartsubstanz kann auf zwei verschiedene Arten oder deren Kombination erfolgen [Driessens 1977]. Man unterscheidet die mechanische Retention von der Adhäsion [Phillips 1987].
Die mechanische Retention beruht auf einer Kombination aus geometrischen und rheologischen Effekten. Durch Unterschnitte, Haftreibung und polymerisationsbedingte Dimensionsänderungen wird ein Verbund zwischen Füllwerkstoff und Kavität erreicht [Lutz et al. 1977; Buonocore 1981].
Die Adhäsion ist ein Mechanismus, der zwei Materialien über eine Schnittstelle in Kontakt bringt. Sie wird als Haftkraft an Materialgrenzflächen durch intermolekulare Anziehungskräfte beschrieben [Phillips 1987]. Es handelt sich dabei um physikalische Anziehungskräfte, die auf Grund elektrostatischer Wechselwirkungen zwischen Dipolen entstehen. Es sind Van-der-Waals-Kräfte und Wasserstoffbrückenbindungen. Diese Kräfte treten nur bei atomaren Abständen auf und sind im wässrigen Milieu instabil [Tyas 1989b]. Rein chemische Bindungen wären für den Verbund des Adhäsivs und der Zahnhartsubstanz am günstigsten. Chemische Verbindungen lassen sich aber nur in geringem Maße nachweisen [Yoshida et al. 2000]. Voraussetzung für einen starken adhäsiven Verbund zwischen zwei Materialien sind eine große molekulare Kontaktfläche, eine hohe Retention und die Benetzbarkeit der Oberfläche. Um einen engen Kontakt zwischen dem Adhäsiv und dem

jeweiligen Substrat zu gewährleisten, benötigt das Adhäsiv eine kleinere Oberflächenspannung als das Substrat [Buonocore 1981; Ruyter 1988].
Aufgrund der natürlichen Unterschiede der Zahnhartsubstanzen muss die Adhäsivtechnik für den Schmelz und das Dentin entsprechend modifiziert werden.

4.2.1 Strukturmerkmale des Schmelzes

Zahnschmelz ist die äußerste Schicht der Zahnkrone und liegt dem Dentin auf. Der Zahnschmelz ist das härteste und das am stärksten mineralisierte Gewebe des Menschen. Er unterscheidet sich im Aufbau und in seinen Eigenschaften deutlich von den übrigen Zahnhartgeweben [Gwinnett 1973; Schroeder 1988]. Der Schmelz ist spröde, starr, brüchig und hat ein großen Elastizitätsmodul, aber nur eine geringe Zugfestigkeit [Habelitz et al. 2001].
Er ist zu 95 % anorganisch und besteht hauptsächlich aus Hydroxylapatit aber auch aus Kalzium, Phosphor, Natrium und Karbonat. Der organische Anteil besteht aus Lipiden und Proteinen.
Calcium und Phosphor sind die Hauptbestandteile der kristallinen Struktur und liegen als Hydroxylapatit vor. Einige Hydroxylgruppen des Apatits können durch Fluoridionen oder Chloridionen ersetzt werden [Schroeder 1988].
Der organische Anteil aus Lipiden und Proteinen liegt in Schmelzbüscheln im inneren Drittel des Schmelzmantels vor. Einen kleinen Volumenanteil nimmt das Wasser im Schmelz ein [Robinson et al. 1981]. Es ist kristallin in der Hydratationsschale oder an organische Substanzen gebunden [Schroeder 1988].
Prismenfreie Schmelzareale liegen im Zervikalbereich des Schmelzes in einem Bereich, in dem nur eine sehr dünne Schmelzschicht vorhanden ist [Ripa 1966; Jörgensen und Ono 1984]. Die Schichtstärke des prismenfreien Schmelzes beträgt 5-100 µm [Kodaka et al. 1991].
Um einen optimalen Verbund zwischen dem Adhäsiv und der Schmelzoberfläche zu erhalten, ist eine Vorbehandlung der Kontaktfläche notwendig.

4.2.2 Die Etch & Rinse-Technik

Diese Methode wurde erstmals von BUONOCORE beschrieben [Buonocore 1955]. Er konnte den Verbund zwischen Acrylat und Schmelz verbessern, indem er die Schmelzoberfläche mit einer 85 %igen Phosphorsäure für 30 s vorbehandelt hatte. Es zeigten sich deutlich höhere Haftwerte zwischen Füllung und Zahnschmelz gegenüber dem Verbund ohne vorherige Ätzung mit Phosphorsäure. Durch die Ätzung erfolgt nicht nur eine Oberflächenvergrößerung der Schmelzoberfläche, sondern auch eine Reinigung. Der so genannte „smear layer“, eine iatrogene Verunreinigung der Schmelzoberfläche durch das Präparieren der Zahnhartsubstanz, konnte dadurch deutlich reduziert werden. Die Ätzung des Schmelzes schafft Mikroretentionen, es werden Bakterien abgetötet sowie die Benetzbarkeit der Oberfläche durch die Oberflächenvergrößerung und durch die Erhöhung der Oberflächenenergie verbessert [Retief 1973; Baier 1992].

Eine etwa 10 µm starke Schmelzschicht wird beim Ätzvorgang vollständig entfernt. Es kommt zur selektiven Auflösung der Prismenzentren oder der Prismenperipherien bis in einen Bereich von 5-50 µm [Swift et al. 1995]. Bei prismenfreien Schmelzarealen lässt sich kein Ätzmuster mit Tiefenausdehnung erkennen [Gwinnet 1973].

Es werden Phosphorsäuren hauptsächlich in einer Konzentration von ca. 37 % angewendet [Swift et al. 1995], da diese eine deutliche retentiv strukturierte Schmelzoberfläche erzeugen [Silverstone 1974; Dennison und Craig 1978; Gottlieb et al. 1982; Retief und Deneys 1989].

Die Morphologie des Ätzmusters ist abhängig von der chemischen Zusammensetzung und räumlichen Ausrichtung der Schmelzprismen und ist daher bei jedem Zahn unterschiedlich und nicht voraussagbar [Retief 1973; Silverstone et al. 1975; Schroeder 1988].

Das Ätzmuster ist am deutlichsten, wenn die Schmelzprismen quer getroffen sind [Crawford et al. 1987]. Dazu sollten die schmelzbegrenzten Kavitätenränder angeschrägt werden [Lutz 1975]. Durch die Anschrägung der Schmelzränder wird die Oberfläche weiter vergrößert und die Haftung erhöht [Sockwell 1976; Schneider et al. 1981; Bowen et al. 1982; Bagheri und Denehy

1985; Geurtsen et al. 1990]. Außerdem wird das Risiko von Frakturen am Schmelzrand durch die Randanschrägung gemindert [Mitchem und Granum 1976; Bowen et al. 1982; Lutz et al. 1984; Munechika et al. 1984]. Dadurch wird die marginale Adaptation erhöht [Eriksen und Buonocore 1976; Crawford et al. 1987] und eine Verbesserung der Ästhetik erzielt [Torney 1978].

Es bestand lange Zeit die Forderung den Schmelz für 60 s zu ätzen [Dennison und Craig 1978], auch wenn identische Oberflächenveränderungen schon bei kürzeren Einwirkzeiten von 10 s und 15 s beobachtet wurden [Brännström und Nordenvall 1978; Barkmeier et al. 1985; Barkmeier et al. 1986; Glasspoole und Erickson 1986]. Der Randschluss und die Haftwerte lassen bei diesen kurzen Zeiten keine signifikanten Unterschiede erkennen [Crim und Shay 1987; Gilpatrick et al. 1991; Wang und Lu 1991; Guba et al. 1994; Triolo et al. 1993].

Die Konditionierung der Schmelzoberfläche erfolgt heutzutage mit Ätzgelen, die sich aufgrund ihrer definierten und ortsstabilen Applikationsmöglichkeit und gleichen Konditionierungsergebnissen gegenüber Ätzflüssigkeiten durchgesetzt haben [Brännström et al. 1978; Noack und Roulet 1987; Tagami et al. 1988; Guba et al. 1994].

Die Absprühzeit des Ätzgeles von der Schmelzoberfläche hat Einfluss auf den adhäsiven Verbund zwischen Füllung und Schmelz. Man konnte bei 10 s und 30 s Absprühzeit vergleichbare Haftwerte des adhäsiven Verbundes beobachten [Mixson et al. 1988]. Verunreinigungen und Lösungsprodukte werden bei 5 s Absprühzeit nicht vollständig entfernt, außerdem sind die Haftwerte im Vergleich zu einer Absprühzeit von 15 s geringer [Bates et al. 1982]. Das Reinigungsergebnis bei einer definierten Absprühzeit ist darüber hinaus abhängig von dem verwendeten Wasserdruck [Tagami et al. 1988].

Nach dem Absprühen des Ätzgeles wird die Schmelzoberfläche im Luftstrom von Feuchtigkeit befreit. Die Dauer der Trocknung zeigt keinen signifikanten Einfluss im Verbund zwischen Komposit und Schmelz bei Scherkraftuntersuchungen [Ichiki et al. 1990].

Wasser hat eine höhere Adsorptionsenergie zum Schmelz als Kunststoffe [Lee 1969]. Polymermoleküle werden von Wassermolekülen daher von der Schmelzoberfläche verdrängt [Ruyter 1988]. Aus diesem Grund wird bei der

Schmelzätztechnik die absolute Trockenlegung mittels Kofferdam empfohlen. Speichel, der auf die angeätzte Schmelzoberfläche gelangt, verringert die Oberflächenenergie des Schmelzes derart, dass sie dem Ausgangswert vor der Ätzung entspricht [Jendresen und Glantz 1981].

Auch unter dem REM lässt sich nach der Speichelkontamination ein Film von Glykoproteinen auf der Schmelzoberfläche erkennen [Diedrich 1979; Jendresen und Glantz 1981; Silverstone et al. 1985]. Die Haftwerte des Komposits am Schmelz sind durch die Einwirkung des Speichels signifikant geringer [Hormati et al. 1980; Thomson et al. 1981; Bates et al. 1982]. Nach einer Speichelkontamination wird empfohlen, den Schmelz noch einmal mit Phosphorsäure für 10-20 s zu konditionieren [Hormati et al. 1980; Bates et al. 1982; Silverstone et al. 1985], da sich die Speichelprodukte auf dem Schmelz sonst nicht vollständig entfernen lassen [Meurman 1976; Silverstone et al. 1985].

4.2.3 Dentin

4.2.3.1 Aufbau und Struktur des Dentins

In seinem Aufbau unterscheidet sich das Dentin grundlegend vom Schmelz. Das Dentin besteht zur Hälfte aus anorganischem und zu einem Drittel aus organischem Material. Der Rest besteht aus dem wasser- und proteinhaltigen Dentinliquor [Schroeder 1988; Marshall et al. 1997].

Der anorganische Teil besteht aus Hydroxylapatitkristallen, die in einer kollagenen Matrix liegen [Marshall 1993]. Die Hydroxylapatitkristalle des Dentins sind im Unterschied zu den Kristallen im Schmelz carbonathaltiger und kalziumärmer. Daher sind sie nicht so hart wie die Hydroxylapatitkristalle im Schmelz.

Den organischen Teil bildet die kollagene Matrix. Sie besteht aus Kollagen vom Typ 1 und einem kleinen Teil nicht kollagener Grundsubstanz [Schroeder 1988].

Das Dentin wird von Tubuli durchzogen. In den Dentintubuli befinden sich Odontoblastenfortsätze und der Dentinliquor. Werden die Dentinkanälchen beim Präparieren eröffnet, tritt der Dentinliquor mit einem Druck, der einer Wassersäule von 15 cm entspricht, aus der Öffnung [Marshall et al. 1997]. Flüssigkeitsbewegungen innerhalb der Dentintubuli werden über die Odontoblastenfortsätze an die Pulpa in Form von Schmerz übertragen.

Das peritubuläre Dentin ist im Gegensatz zum intertubulären Dentin stark mineralisiert und besteht zu 90 % aus Hydroxylapatitkristallen. Aufgrund der kleinen Kristallgröße bietet das peritubuläre Dentin schwachen Säuren kaum Widerstand [Schroeder 1988]. Das intertubuläre Dentin ist nicht so stark mineralisiert, es enthält aber deutlich mehr kollagene Fasern vom Typ 1, die sich quer zu den Dentintubuli erstrecken [Schroeder 1988]. Im Bereich der Wurzel findet man stärker verzweigte Odontoblastenfortsätze, das Wurzeldentin ist schwächer mineralisiert und weist eine geringere Härte auf. Die Härte nimmt mit der Nähe zur Pulpa zu [Schroeder 1988]. Die Odontoblastenfortsätze sind selbst nach Abschluss der Zahnentwicklung fähig, Dentin zu bilden. Das im

Alterungsprozess physiologisch gebildete Dentin ist das Sekundärdentin [Schroeder 1988; Gängler et al. 1988]. Auf bakterielle, chemische oder physikalische Reize reagieren sowohl die Odontoblastenfortsätze als auch die Pulpa. Zunächst verringert sich der Querschnitt der Dentintubuli durch beschleunigte peritubuläre Dentinbildung, bis es zur tubulären Sklerose kommt. Bei dieser Schutzmaßnahme ziehen sich die Odontoblastenfortsätze immer mehr zurück. Ist der Reiz so stark, dass die Odontoblasten absterben, können sich an der Pulpaperipherie Zellen differenzieren, die Tertiärdentin bilden. [Schroeder 1988]. Es unterscheidet sich deutlich vom Aufbau des Primär- und Sekundärdentins. Das Tertiärdentin hat kaum Dentintubuli und einen irregulären Aufbau [Schroeder 1988]. Einige Autoren bezeichnen es daher auch als irreguläres Sekundärdentin oder Reparaturdentin.

4.2.3.2 Haftung am Dentin

BUONOCORE hat 1955 nahezu zeitgleich zur Schmelz-Ätz-Technik vorgeschlagen, auch das Dentin mit Säuren zu konditionieren [Buonocore 1955]. Danach sollte die ungeschützte Dentinoberfläche mit einem Kunststoffversiegler geschützt werden. Doch die Haftwerte am Dentin zeigten keine zufriedenstellenden Ergebnisse. Außerdem wurde die Applikation der Säure auf das vitale Dentingewebe mit einer eventuellen Reizung und Gefährdung der Pulpa sehr kritisch betrachtet [Retief und Austin 1974; Stanley et al. 1975]. Das Dentin hat eine wasserhaltige Oberfläche und hydrophobe Materialien können nur sehr schlecht an dieser verankert werden [Erickson 1992]. Die Dentinoberfläche kann nicht vollständig getrocknet werden, da durch die Dentinkanälchen weiter Dentinliquor austritt [Marshall 1993], der eine Benetzung mit einem hydrophoben Material erschwert [Erickson 1992]. Deshalb müssen die Komponenten eines Dentinadhäsivs hydrophil und wasserkompatibel sein.

Häufig findet man in Primern die Monomere „4-Meta“ (4-Methacryloxyethyltrimellitatanhydrid) und „Hema“ (Hydroxyethylmethacrylat). Es

sind hydrophile Monomere, die eine hohe Benetzung und eine sehr gute Penetrationsfähigkeit ins Dentin aufweisen.

Kleinste morphologische Verankerungen durch das Eindringen dieser Monomere in die Dentintubuli in Form von Kunststofftags konnten nachgewiesen und später in Untersuchungen am REM bestätigt werden [Kanca und Gwinnet 1994; Chappell et al. 1994].

Durch das Eindringen der hydrophilen Monomere in die demineralisierte Zone des Dentins und in das Kollagengeflecht bildet sich die sogenannte Hybridschicht aus. Diese Hybridschicht ist ein Gemisch aus den aufgetragenen Monomeren und dem Kollagengeflecht des Dentins. Die Monomere dringen in das Dentin ein, bilden die Hybridschicht und verschließen somit die trichterförmig eröffneten Dentintubuli [Nakabayashi et al. 1991; Van Meerbeek et al. 1993]. Die Hybridschicht bildet sich nur in den oberflächlichen Bereichen des Dentins. Es wird vermutet, dass die Hybridschicht in diesem Bereich gegenüber den Kunststofftags einen größeren Anteil der Haftung ausmacht [Pashley et al. 1995].

Die Etch & Rinse-Technik ist empfindlich gegenüber Anwendungsfehlern, wie z.B. zu langes Ätzen des Dentins, ungenügendes Absprühen der Oberfläche nach dem Ätzen sowie Übertrocknen des Dentins vor dem Auftragen des Primers. Zu langes Ätzen kann in der Tiefe des Dentins zu einem Bereich führen, der vom Primer nicht mehr ausgefüllt werden kann und somit zu einem kollabierfähigen Kollagennetzwerk führt. Ungenügendes Absprühen der Dentinoberfläche kann zu Rückständen der Präzipitate auf dem Dentin führen und die Haftung vermindern. Eine zu stark getrocknete Dentinoberfläche lässt das Kollagengerüst kollabieren und hindert somit das Eindringen des Primers in das Dentin. Der Primer sollte entsprechend lang im Dentin einwirken, um alle demineralisierten Bereiche zu durchdringen. Zu kurze Einwirkzeiten des Primers können ebenfalls zu kollabierfähigen Kollagennetzwerkbereichen und zu schlechteren Haftwerten führen [Frankenberger et al. 2000; Lambrechts et al. 2001].

Selbstkonditionierende Adhäsivsysteme haben den Vorteil, das Dentin zu demineralisieren und zeitgleich vollständig zu infiltrieren [Albaladejo et al. 2010].

Ein Hindernis für beide Adhäsivsysteme stellt die Schmierschicht auf dem Dentin dar. Sie verhindert den direkten Kontakt und die Haftung zwischen dem Primer/Adhäsiv- Gemisch und der Dentinoberfläche [Toledano et al. 2004].

4.2.4 Einteilung der Adhäsivsysteme

Berücksichtigt man die Art und Weise, wie mit der Schmierschicht verfahren wird, so lassen sich drei verschiedene Prinzipien unterscheiden [Van Meerbeek 1997]:

Erhalt der Schmierschicht:
Hydrophile Monomere der Dentinadhäsive durchdringen die Schmierschicht und stabilisieren dieselbe.

Modifizierung der Schmierschicht:
Die Schmierschicht modifizierenden Adhäsivsysteme enthalten hydrophile Monomere in saurer Lösung. Sie können in und durch die Schmierschicht dringen, polymerisieren und so effizient die Dentinoberfläche benetzen.

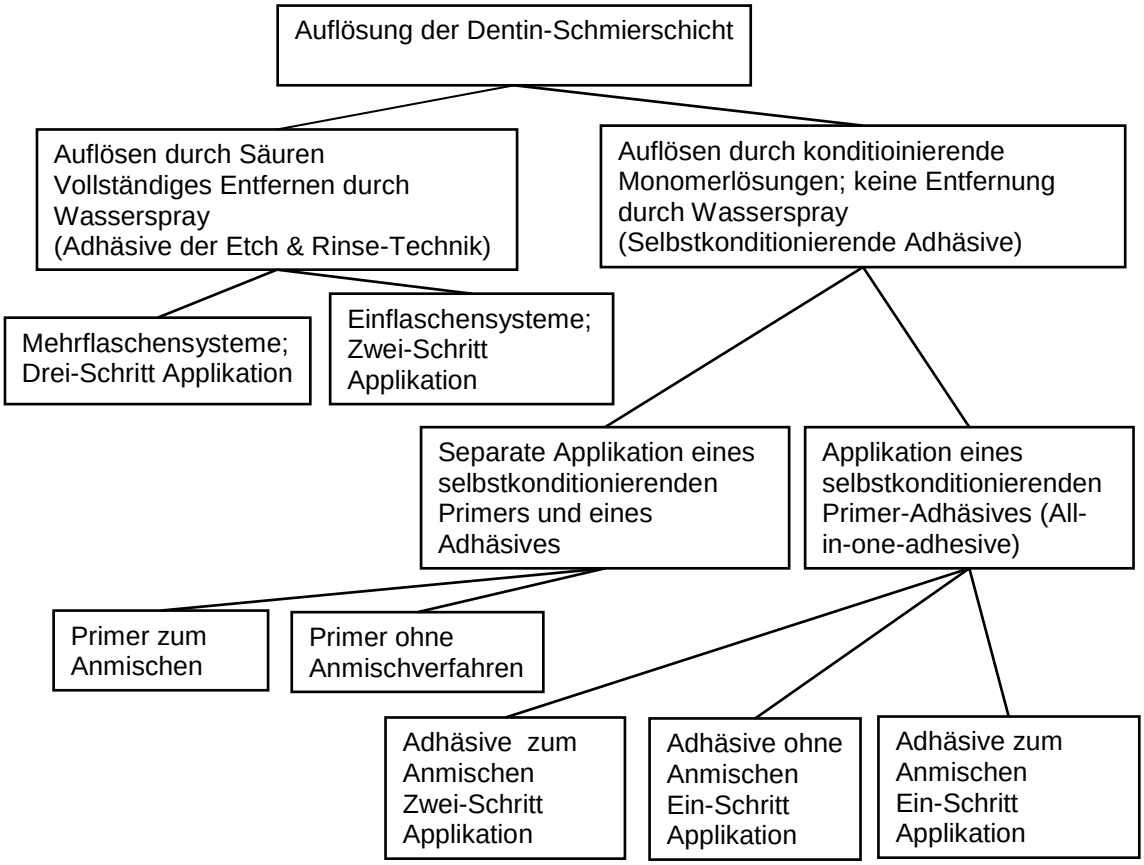
Entfernung der Schmierschicht:
Die Schmierschicht auflösenden Adhäsivsysteme arbeiten in Kombination mit der Etch & Rinse-Technik. Das hat den Vorteil, dass die Schmierschicht entfernt wird und das Dentin und der Schmelz zugleich konditioniert werden.

Es wurden die Adhäsivsysteme auch in Generationen eingeteilt. Die entwicklungstechnischen Unterschiede zwischen den Adhäsiven waren ursprünglich so groß, dass man jeweils von einer neuen Generation von Adhäsiven sprach [Dunn 2004]. Diese Einteilung ist aber nicht mehr zeitgemäß und passt nicht mehr zu den moderneren Adhäsivsystemen [Frankenberger 2008].

Nach Blunck und Haller werden die Bondingsysteme in Systeme mit Etch & Rinse-Technik und in selbstkonditionierende Systeme unterteilt.

Weiterhin werden die erstgenannten in Untergruppen nach Ein- und Mehrflaschensystemen unterteilt [Blunck und Haller 1999].
Die selbstkonditionierenden Systeme werden unterschieden in Systeme
a) mit separater Applikation von Primer und Adhäsiv und b) mit All-in-one-Adhäsive. Die All-in-one-Adhäsive werden weiterhin gegliedert in Systeme zum Anmischen und in Systeme ohne vorheriges Anmischen [Haller und Blunck 2003]. Die Vielzahl der zurzeit marktüblichen Produkte und Systeme lässt sich vollständig mit dieser Einteilung einordnen.

Abbildung 2.1: Einteilung der Adhäsive nach Blunck und Haller 1999 und Haller und Blunck 2003



5 Zielstellung

Ziel dieser Arbeit ist, die Auswirkungen der Primereinwirkzeit bei verschiedenen Konditionierungszeiten auf die Randqualität von Klasse-V-Restaurationen zu ermitteln.
Nullhypothese: Längere Konditionierungszeiten im Schmelz und Dentin haben keinen Einfluss auf die Haftung.
Arbeitshypothese: Es wird erwartet, dass eine längere Einwirkzeit des Primers dazu führt, tief demineralisiertes Dentin vollständig zu infiltrieren und sich trotz tiefer Dentindemineralisierung ein gutes Randverhalten zwischen Dentin und Komposit zeigt. Zusätzlich geht man davon aus, dass die Primer unterschiedlicher Adhäsivsysteme auch unterschiedlich starke Dentin-Infiltrationseigenschaften haben, die sich auch auf den Haftverbund zwischen Dentin und Komposit auswirken. Es wird auch erwartet, dass eine längere Einwirkzeit des Primers im Schmelz bei längeren Konditionierungszeiten zu einem besseren Randverhalten als bei kürzeren Primereinwirkzeiten führt.

Folgende Fragestellungen sind von besonderem Interesse in Bezug auf die drei Adhäsive *OptiBond FL*, *Prime&Bond NT* und *Excite*:

- Hat eine längere Konditionierungszeit des Dentins Einfluss auf die Randqualität?
- Ist durch eine längere Einwirkzeit des Primers die Abnahme der Randqualität bei längeren Konditionierungszeiten auszugleichen oder zu verringern?
- Wie lange ist die optimale Primereinwirkzeit für das jeweilige Adhäsiv?
- Gibt es bezüglich der Primereinwirkzeit Unterschiede zwischen den verschiedenen Adhäsivsystemen bei gleichen Konditionierungszeiten?
- Wie verhält sich die Füllungsrandqualität bei thermischen Belastungen bei verschiedenen Konditionierungs- und Primereinwirkzeiten?

- Treten diesbezüglich Unterschiede zwischen den verschiedenen Adhäsivsystemen auf?
- Gibt es Unterschiede an Schmelz und Dentin in Bezug auf die Konditionierungszeit und die Primereinwirkzeit?

6 Material und Methode

6.1 Verwendete Adhäsive und Komposite

In 144 extrahierten humanen Prämolaren wurden standardisierte Klasse-V-Kavitäten präpariert und diese mit Kompositfüllungen versorgt. Zur Anwendung kamen 3 unterschiedliche Adhäsive:

- *OptiBond FL* (Fa. Kerr)[10,11]
- *Prime&Bond NT* (Fa. Dentsply De Trey)[12]
- *Excite* (Fa. Vivadent)[13].

Die Adhäsivsysteme wurden in 18 verschiedenen Testgruppen mit jeweils 8 Proben eingesetzt. Den Versuchsaufbau stellt die nachfolgende Abbildung 6.1 schematisiert dar. Zwischen den Gruppen wurde sowohl die Dauer der Konditionierung als auch die Einwirkzeit des Adhäsivs variiert. Eine Übersicht zeigt die folgende Tabelle 6.1.
Als Kompositfüllungsmaterial wurde in allen Fällen Filtek Z250[14] (Fa. 3M ESPE) verwendet. Die mit Komposit gefüllten und ausgearbeiteten Zähne wurden nach 21 Tagen Wasserlagerung einer thermischen Wechselbadbelastung (TWB)[21] ausgesetzt. Es wurden Replika nach der Wasserlagerung und nach der TWB[21] von den Prämolaren hergestellt. Diese Replika wurden unter dem REM[16] betrachtet. Sowohl der Rand zwischen Kompositfüllung und Dentin als auch zwischen Kompositfüllung und Schmelz wurde qualitativ bewertet. Die Füllungsrandqualitäten wurden quantitativ ausgewertet.

Abbildung 6.1: Ablaufschema

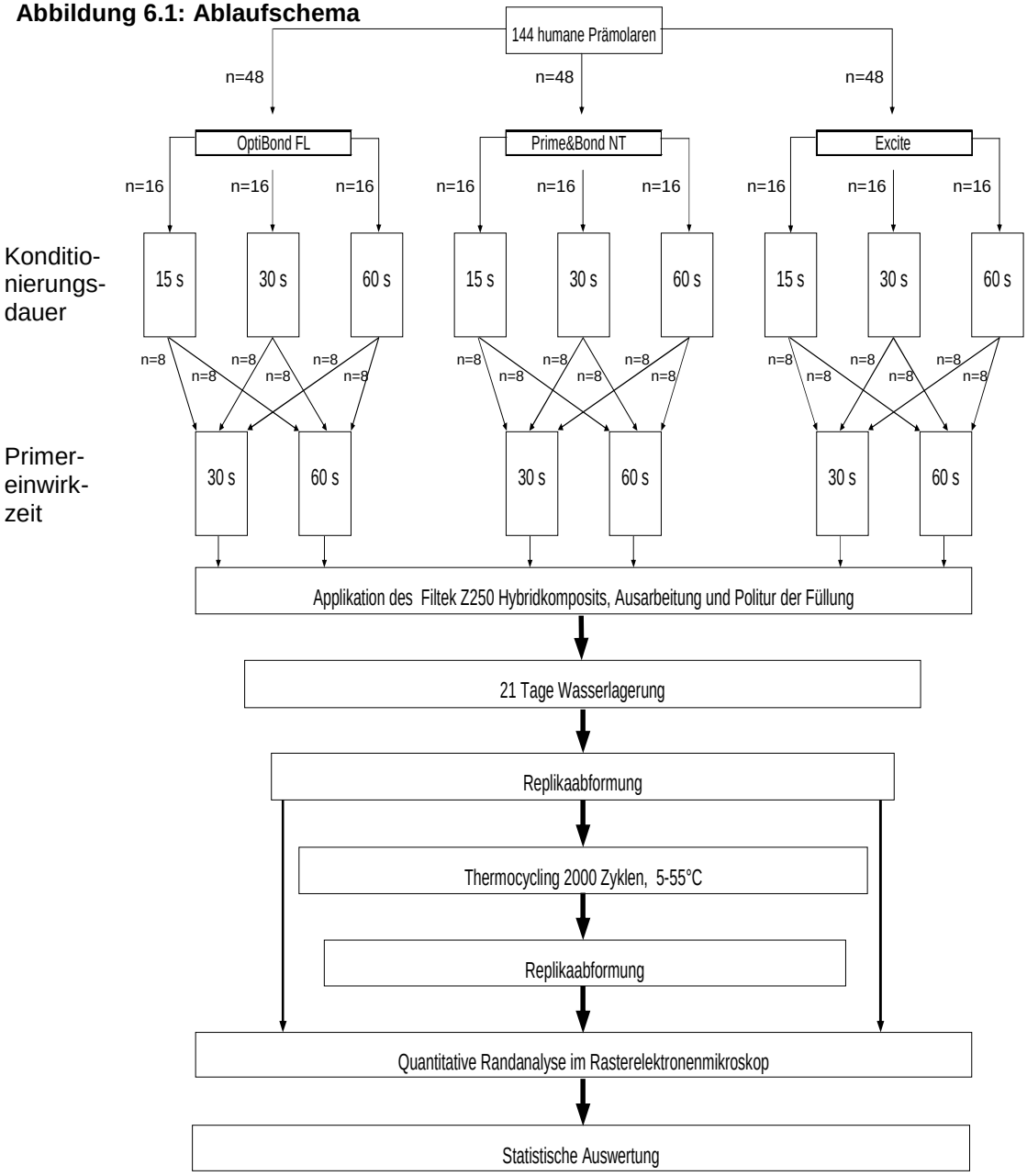


Tabelle 6.1: Einteilung der Gruppen

	Material			Einwirkzeit der Phosphorsäure [s]	Einwirkzeit des Primers [s]
	OptiBond FL	Prime&Bond NT	Excite		
Gruppen	1	7	13	15	30
	2	8	14	30	30
	3	9	15	60	30
	4	10	16	15	60
	5	11	17	30	60
	6	12	18	60	60

6.2 Herstellung der Proben

6.2.1 Verwendete Zähne

Es wurden humane Prämolaren annähernd gleicher Größe verwendet. Eine eindeutige, gleichmäßig verlaufende Schmelz-Zement-Grenze und eine ausreichend glatte und große Wurzeloberfläche für die spätere Ausarbeitung waren weitere Auswahlkriterien, um sie als Proben zu verwenden. Vom Zeitpunkt der Extraktion bis zum Zeitpunkt der Untersuchung befanden sich die Zähne in einer 0,5 %igen Chloramin-T-Lösung.

Die Zähne wurden zunächst schonend mit einer Kürette von Zahnstein, von Konkrementen und desmodontalen Geweberesten gesäubert. Danach wurden die kürettierten Flächen der Zähne mit Polierkelchen[25] und fluoridfreier Polierpaste[26] geglättet. Auf der bukkalen Seite des Zahnes wurde mit einem feinen Diamanten[3] eine kleine Stelle plan geschliffen und die jeweilige Probennummer graviert, so dass die Nummern nach der Abformung deutlich auf den Replika sichtbar waren.

Mit Hilfe einer Zufallstabelle wurden die Zähne in 18 Gruppen zu je 8 Proben randomisiert verteilt. Während des gesamten Versuchablaufes wurden die Proben in einer 0,5 %igen Chloramin-T-Lösung gelagert.

6.2.2 Kavitätenpräparation

Die Kavitätenpräparation erfolgte bukkal an der Schmelz-Dentin-Grenze. Mit einem Präparierdiamanten[2] wurde unter maximaler Wasserkühlung eine standardisierte Größe der Kavität präpariert. Anschließend wurden die Kavitätenwände mit einem feineren Finierdiamanten[3] geglättet. Die Grundform der Klasse-V-Kavität war oval. Das Ausmaß der Kavität betrug in korono-apikaler Richtung 4 mm, davon 2 mm unterhalb der Schmelz-Dentin-Grenze. Die mesio-distale Breite betrug 3 mm und die Kavitätentiefe betrug 1,5 mm. Entlang des Schmelzrandes wurde eine ca. 1 mm breite Anschrägung präpariert.

6.2.3 Konditionierungszeit der Phosphorsäure im Dentin und Schmelz

Die Einwirkzeit der Phosphorsäure[9] im Dentin und Schmelz entsprechend der Etch & Rinse-Technik betrug je nach Gruppe 15 s, 30 s oder 60 s (siehe Tabelle 6.1).
Mit einem Wasserspray wurde die Phosphorsäure[9] 30 s abgesprüht. Dann wurde die Kavität mit einem leichtem Luftstrom getrocknet. Zur Aufrichtung des Kollagengerüstes wurde die Dentinoberfläche mit Hilfe eines Applikatorpinsels[8] befeuchtet. Dazu wurde der nasse Applikatorpinsel[8] zuvor zweimal auf ein trockenes Papiertuch getupft, um eine standardisierte Feuchtigkeit auf der Dentinoberfläche zu erzeugen. Das Dentin besaß nach dem Rewetten eine leicht glänzende Oberfläche.

6.2.4 Applikation der verschiedenen Primer

Je nach Gruppe wurden die Primer für 30 s bzw. 60 s mit einem Microbrush[8] auf Schmelz und Dentin appliziert und in Bewegung gehalten. Anschließend wurden die Primer im Luftstrom leicht verblasen, bis sich eine leicht glänzende Oberfläche mit dem Luftstrom nicht mehr bewegen ließ.
Nach Applikation des Primers und des Adhäsivs auf Schmelz und Dentin wurden mit Hilfe der Polymerisationslampe[15] die Adhäsive für 30 s ausgehärtet.

6.2.5 Applikation des Kompositmaterials

Das Komposit Filtek Z250[14] (3M Espe) wurde mit einem Heidemann-Spatel[5] in zwei aufeinander folgenden Schichten in die Kavität eingebracht und ausmodelliert. Die erste Schicht wurde vom zervikalen Füllungsrand zum pulpo-koronalen Kavitätenrand auslaufend modelliert und für 40 s lichtgehärtet[15]. Mit der zweiten Kompositschicht wurde der Rest der Kavität aufgefüllt. Diese wurde ebenfalls für 40 s lichtgehärtet[15].

6.2.6 Ausarbeitung der Proben

Die Ausarbeitung und Politur erfolgte bei allen Proben auf die gleiche Art. Grobe Kompositüberschüsse wurden mit einem sehr feinen Finierdiamanten[3] unter Wasserkühlung mit einem Schnellläufer[24] entfernt. Anschließend wurden die Füllungen mit Soflex-Scheiben[4] unterschiedlicher Körnung von grob (dunkelblau) über fein (blau) nach superfein (hellblau) unter Wasserkühlung mit einem blau markierten Winkelstück[27] ausgearbeitet. Großer Wert wurde auf das Vermeiden von Kompositüber- und -unterschüssen gelegt. Mit einem feinen flammenförmigen Finierdiamanten[3] wurde die Schmelz-Dentin-Grenze am Rand der Füllung anschließend gekennzeichnet, um die Schmelz-Dentin-Grenze im REM[16] eindeutig erkennen zu können.

6.2.7 Wasserlagerung

Gleich nach der Ausarbeitung der Füllungen wurden die Proben 21 Tage lang in Wasser bei Raumtemperatur gelagert.

6.2.8 Replikaabformung

Nach der Wasserlagerung wurden Abformungen mit einem dünnfließenden, additionsvernetzenden Silikon[17] genommen. Die erste Schicht wurde nach dem Applizieren auf der Zahnoberfläche durch Verblasen ausgedünnt. Danach wurde eine zweite Schicht mit derselben Abformmasse zur Stabilisierung dick aufgetragen. Die Proben wurden unmittelbar nach dem Aushärten und dem Erreichen der Primärstabilität der Abformmasse[17] aus den Formen entfernt. Nach dem Ausbetten der Zähne wurden die Abformungen in eine festere Silikonabformmasse[18] eingebettet und beschriftet. Nach 24 Stunden wurden die Abformungen zunächst mit Alkohol, dann mit Chloroform gereinigt, entfettet und stark mit Druckluft ausgeblasen. Gleich im Anschluss folgte die Replikaherstellung.

6.2.9 Replikaherstellung

Mit einem sehr flüssigen Epoxidharz[19] wurden die Abformungen ausgegossen. Das Epoxidharz[19] wurde zuvor aus zwei Komponenten zusammengemischt. In einem Vakuumexsiccator wurde mit Hilfe von Unterdruck die beim Mischen eingeschlossene Luft aus dem Epoxidharz[19] entfernt. Nachdem das Epoxidharz[19] komplett blasenfrei war, nach ca. 20 Minuten, wurde der Unterdruck aufgehoben, das Gefäß mit dem Epoxidharz[19] entnommen und in einen 50 °C heißen Ofen für weitere 20 Minuten gestellt, um eine höhere Fließfähigkeit des Epoxidharzes[19] zu erreichen. Die Abformungen wurden blasenfrei ausgegossen. Nach einer Aushärtungszeit von 24 Stunden wurden die Replika auf einem Objektträger für das REM[16] mit einem handelsüblichen, leitfähigen Sekundenkleber fixiert. Anschließend wurden die Replika ausgebettet und grobe Harzüberschüsse entfernt. Nach dem Ausbetten und Ausarbeiten der Replika wurden diese in der Sputteranlage[20] bei einem Unterdruck von 0,05 bar und einer Stromstärke von 40 mA für 120 s in Argongas mit Gold beschichtet. Die Sputteranlage[20] wurde zuvor dreimal mit Argongas „gewaschen“, um Luftrückstände in der Anlage zu reduzieren. Nach dem Sputtervorgang befand sich eine ca. 20 nm starke Goldschicht auf den Replika.

6.2.10 Thermische Wechselbadbelastung

Von einem Mikroprozessor gesteuerten Thermocycling-Gerät[21] wurden die Zahnproben abwechselnd in ein Warmwasserbad mit 55 °C und in ein Kaltwasserbad mit 5 °C für jeweils 30 s getaucht. Die Transferphase der Thermischen Wechselbadbelastung (TWB) zwischen den beiden Tauchbädern betrug 15 s. Dieser Zyklus wiederholte sich zweitausend Mal.

6.2.11 Erneute Replikaherstellung

Nach TWB erfolgte eine weitere Replikaherstellung im selben Verfahren, wie unter 6.2.9 beschrieben.
Die Replika TWB wurden mit T1 gekennzeichnet, die Replika nach TWB mit T2.

6.2.12 Quantitative Randanalyse mit dem REM

Die Erfassung verschiedener Randqualitäten erfolgte nach der von ROULET beschriebenen Methode der quantitativen Randanalyse im REM[16] [Roulet 1987a]. Mit dem von BLUNCK aufgestellten Kriterienkatalog konnten die Füllungsrandstrukturen den sieben unterschiedlichen Randqualitäten zugeordnet werden [Blunck 1987]. Eine Übersicht über den von BLUNCK aufgestellten Kriterienkatalog mit der Definition der Randqualitäten zeigt Tabelle 6.2.

Tabelle 6.2: Definition der Randqualitäten nach Blunck, U. (1987)

Randqualität	Definition (Schmelz und Dentin)
1	Rand nicht oder kaum erkennbar, keine Randunregelmäßigkeiten*, kein Randspalt
2	Rand erkennbar, geringe Randunregelmäßigkeiten*
3	kein Randspalt, massive Randunregelmäßigkeiten*
4	Randspalt erkennbar (als Haarriss unter 2 µm)
5	Randspalt über 2 µm, aber unter 5 µm, keine Randunregelmäßigkeiten*
6	Randspalt unter 5 µm, massive Randunregelmäßigkeiten*
7	Randspalt über 5 µm, mit und ohne Randunregelmäßigkeiten*

*Randunregelmäßigkeiten umfassen Porositäten und Aufwölbungen des Füllungsmaterials

Die Abbildung 6.2 bis Abbildung 6.8 zeigen typische Beispiele der sieben unterschiedlichen Randqualitäten im REM[16] bei 200facher Vergrößerung.

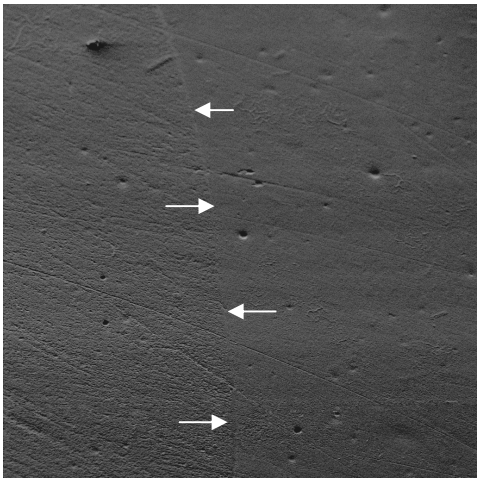


Abbildung 6.2: Randqualität 1

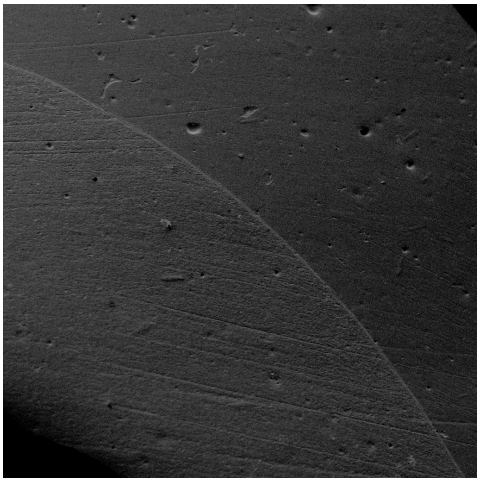


Abbildung 6.3: Randqualität 2

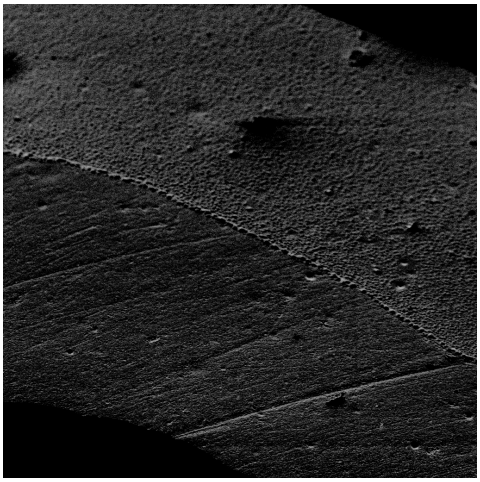


Abbildung 6.4: Randqualität 3

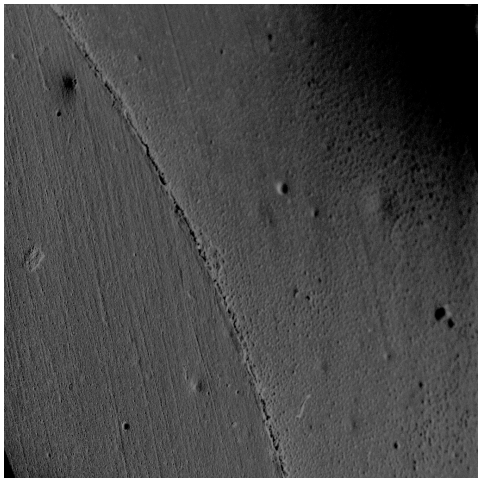


Abbildung 6.5: Randqualität 4

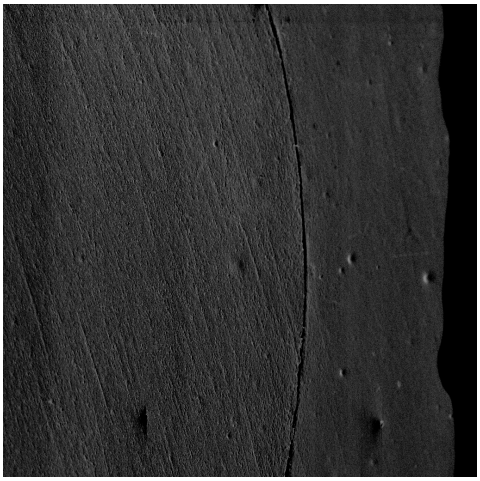


Abbildung 6.6: Randqualität 5

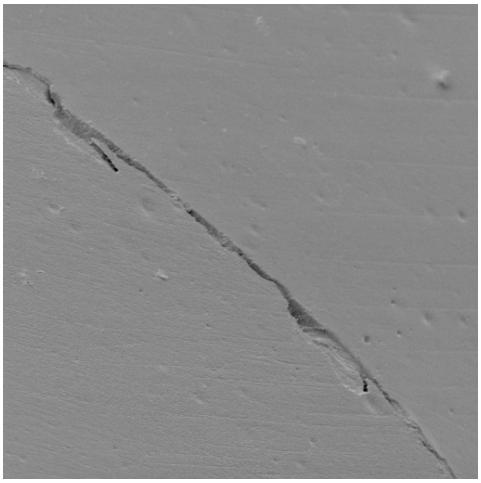


Abbildung 6.7: Randqualität 6

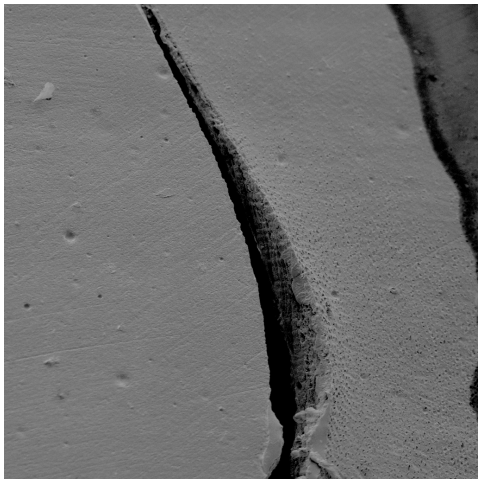


Abbildung 6.8: Randqualität 7

6.3 Statistische Auswertung

Für die Datenauswertung der quantitativen Randanalyse wurden die in Tabelle 6.2 beschriebenen Randqualitäten teilweise zusammengefasst und mit Schulnoten bewertet. Die „Note 1“ umfasst dabei die Randqualitäten 1 und 2, die Note 2 entspricht der Randqualität 3, die Note 3 entspricht der Randqualität 4 und unter der Note 4 wurden die Randqualitäten 5 bis 7 zusammengefasst. Zusätzlich beschreibt der Begriff „Randspalt“ die Randqualitäten 4 bis 7.

Die statistische Auswertung der Daten aus der quantitativen Randanalyse erfolgte mit nonparametrischen Tests innerhalb der Software SPSS[23]. Das Signifikanzniveau wurde auf 5 % ($p = 0,05$) festgelegt. Zum Vergleich der Gruppen untereinander kam der Kruskal-Wallis-Test mit der Bonferroni-Nachtestung zur Anwendung. Gruppenspezifische Unterschiede aller Gruppen im Vergleich wurden zusätzlich mit dem MANN-WHITNEY-U-Test mit α-Adjustierung dargestellt, sofern die Bonferroni-Nachtestung keine Signifikanzen nachweisen konnte. Die Werte innerhalb einer Gruppe vor und nach der Temperaturwechselbadbelastung wurden mit dem WILCOXON-Test ausgewertet. Ausreißer in den Werten werden in den Abbildungen mit einem Sternchen oder einem Kreis gekennzeichnet.

7 Ergebnisse

Die Ergebnisse der quantitativen Randanalyse werden graphisch als Boxplotdiagramm dargestellt. In dem Diagramm fasst der Boxplot verschiedene Maße wie die zentrale Tendenz, die Streuung und die mathematische Schiefe zusammen.

7.1 Ergebnisse im Bereich Dentin

Der Kruskal-Wallis-Test ergab über alle 18 Gruppen signifikante Unterschiede ($p < 0,05$ nach TWB siehe Anhang Tabelle 11.10 und $p < 0,05$ vor TWB siehe Anhang Tabelle 11.11).

7.1.1 Ergebnisse OptiBond FL

Nach dem Mann-Whitney-U-Test zeigt unabhängig von der Konditionierungszeit eine Primereinwirkzeit von 60 s bei *OptiBond FL* keinen signifikanten Vorteil gegenüber einer Primereinwirkzeit von 30 s (siehe Anhang Tabelle 11.14).
Bei einer Primereinwirkzeit von 30 s und den Konditionierungszeiten von 30 s (Gruppe 2) und 60 s (Gruppe 3) sowie bei einer Primereinwirkzeit von 60 s und einer Konditionierungszeit von 30 s (Gruppe 5) ergaben sich signifikante Unterschiede vor und nach TWB (siehe Wilcoxon-Test Anhang Tabelle 11.15).

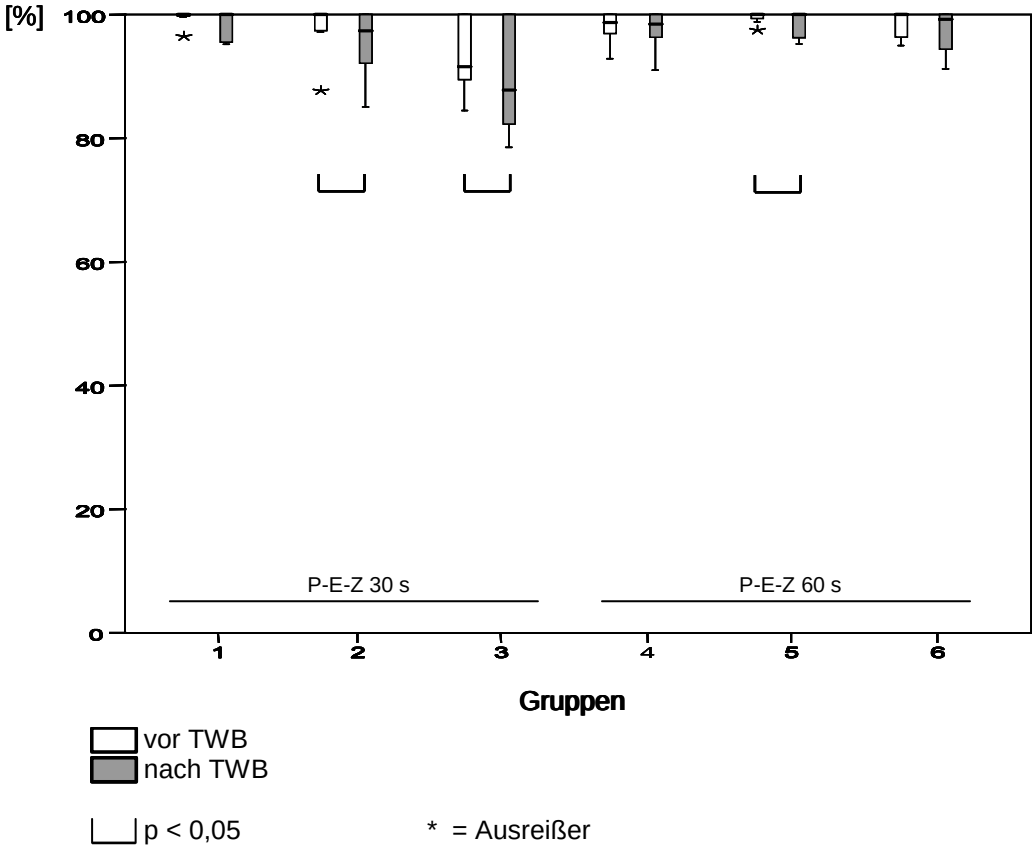


Abbildung 7.1: *OptiBond FL* vor und nach der TWB
Prozentualer Anteil der „Note 1“ an der Füllungsrandlänge im Dentin vor (weiße Boxplots) und nach (graue Boxplots) TWB. Die Einwirkzeit der Phosphorsäure beträgt 15 s bei den Gruppen 1 und 4, 30 s bei den Gruppen 2 und 5 und 60 s bei den Gruppen 3 und 6. Die Primereinwirkzeit (P-E-Z) beträgt 30 s bei den Gruppen 1 bis 3 und 60 s bei den Gruppen 4 bis 6. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) nach dem Wilcoxon-Test werden mit Signifikanzbalken dargestellt.

7.1.2 Ergebnisse Prime&Bond NT

Der Wilcoxon-Test ergab sowohl bei den Gruppen 7 bis 9 (Primereinwirkzeit 30 s) als auch bei den Gruppen 10 bis 12 (Primereinwirkzeit 60 s) vor und nach TWB signifikante Unterschiede (siehe Anhang Tabelle 11.15).

Unabhängig von der Konditionierungszeit zeigt der Mann-Whitney-U-Test keinen signifikanten Vorteil einer Primereinwirkzeit von 60 s gegenüber einer Primereinwirkzeit von 30 s (siehe Anhang Tabelle 11.14).

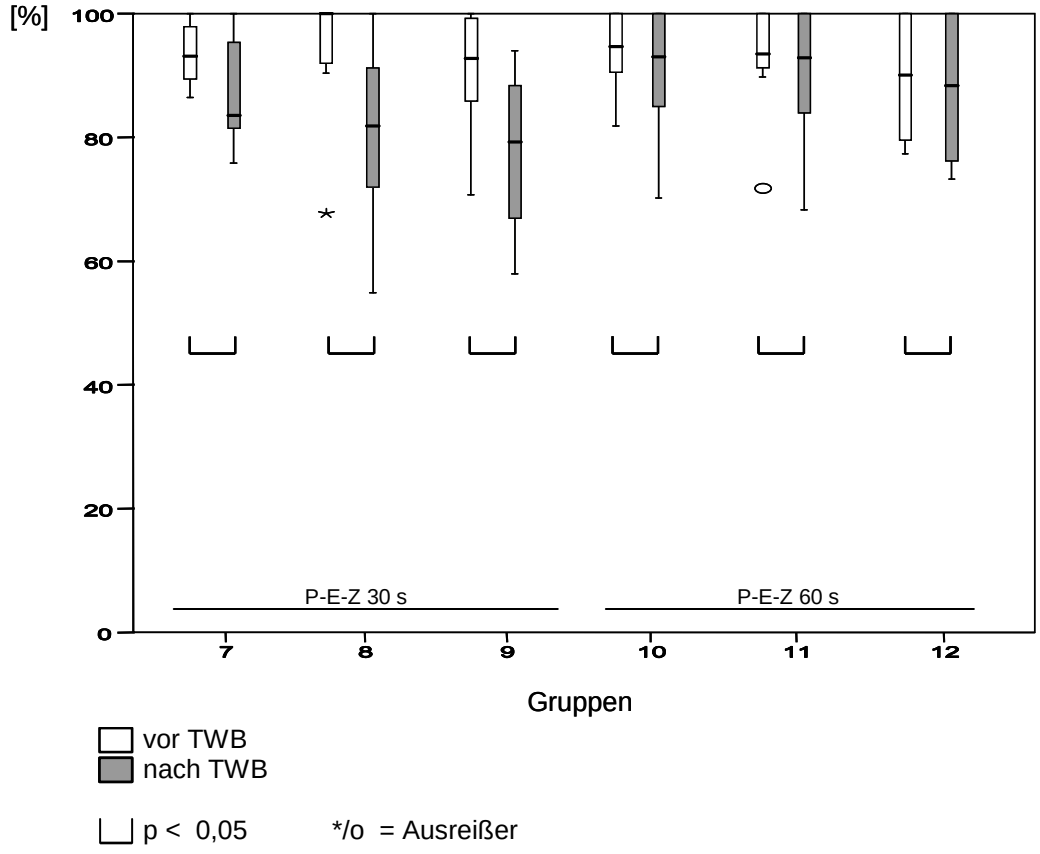


Abbildung 7.2: Prime&Bond NT vor und nach TWB
Prozentualer Anteil der „Note 1“ an der Füllungsrandlänge im Dentin vor (weiße Boxplots) und nach (graue Boxplots) TWB. Die Einwirkzeit der Phosphorsäure beträgt 15 s bei den Gruppen 7 und 10, 30 s bei den Gruppen 8 und 11 und 60 s bei den Gruppen 9 und 12. Die Primereinwirkzeit (P-E-Z) beträgt 30 s bei den Gruppen 7 bis 9 und 60 s bei den Gruppen 10 bis 12. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) nach dem Wilcoxon-Test werden mit Signifikanzbalken dargestellt.

7.1.3 Ergebnisse Excite

Der Wilcoxon-Test ergab bei den Gruppen 13 bis 16 vor und nach TWB signifikante Unterschiede (siehe Anhang Tabelle 11.15).

Der Mann-Whitney-U-Test zeigt nach TWB signifikante Vorteile einer Primereinwirkzeit von 60 s bei den Konditionierungszeiten von 15 s und 30 s gegenüber einer Primereinwirkzeit von 30 s (siehe Anhang Tabelle 11.14). Eine Primereinwirkzeit von 60 s bei einer Konditionierungszeit von 15 s zeigt einen signifikanten Vorteil gegenüber einer Primereinwirkzeit von 30 s vor TWB (siehe Anhang Tabelle 11.14).

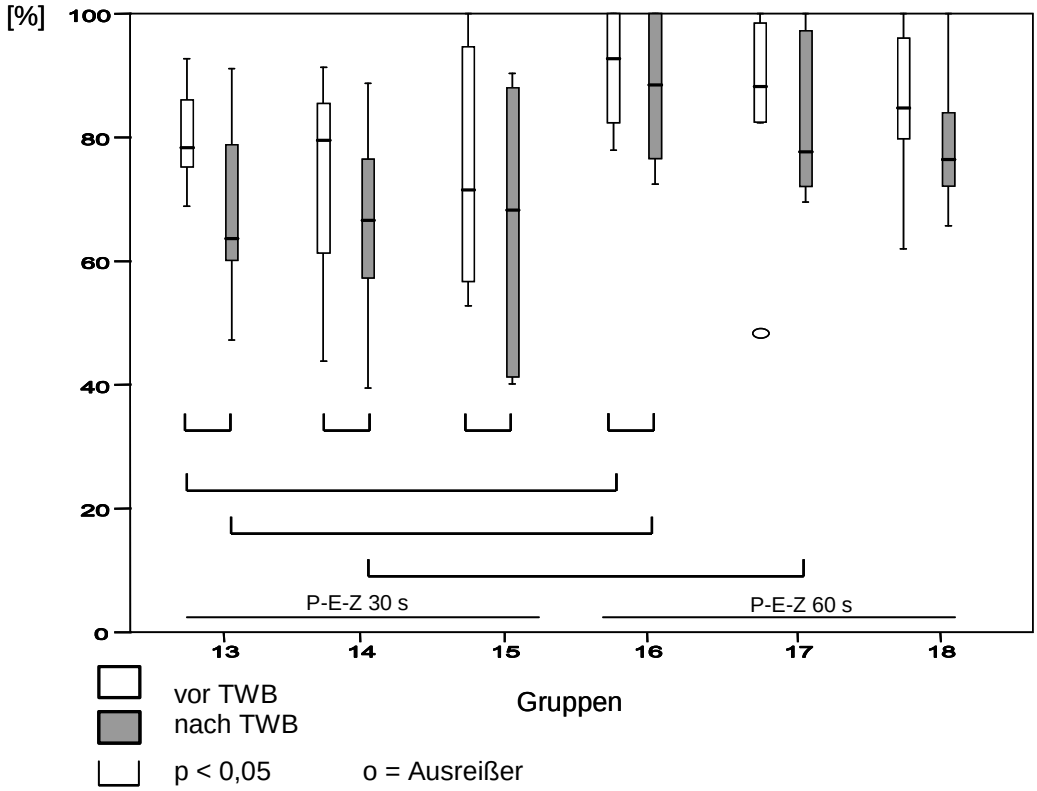


Abbildung 7.3: Excite vor und nach TWB
Prozentualer Anteil der „Note 1“ an der Füllungsrandlänge im Dentin vor (weiße Boxplots) und nach (graue Boxplots) TWB. Die Einwirkzeit der Phosphorsäure beträgt 15 s bei den Gruppen 13 und 16, 30 s bei den Gruppen 14 und 17 und 60 s bei den Gruppen 15 und 18. Die Primereinwirkzeit (P-E-Z) beträgt 30 s bei den Gruppen 13 bis 15 und 60 s bei den Gruppen 16 bis 18. Signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) nach dem Wilcoxon-Test vor und nach TWB werden mit Signifikanzbalken (kurz) dargestellt. Beim Vergleich P-E-Z 30 s und 60 s werden signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) nach dem Mann-Whitney-U-Test mit Signifikanzbalken (lang) dargestellt.

7.1.4 Vergleich der Adhäsive

7.1.4.1 Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierungszeit von 15 s

Der Mann-Whitney-U-Test zeigt signifikante Unterschiede nach TWB zwischen den Gruppen 13 und 16 ($p<0,05$). Der Kruskal-Wallis-Test mit Bonferroni-Korrektur zeigt signifikante Unterschiede nach TWB zwischen den Gruppen 1 und 13 ($p < 0,05$) sowie zwischen den Gruppen 7 und 13 ($p<0,05$).

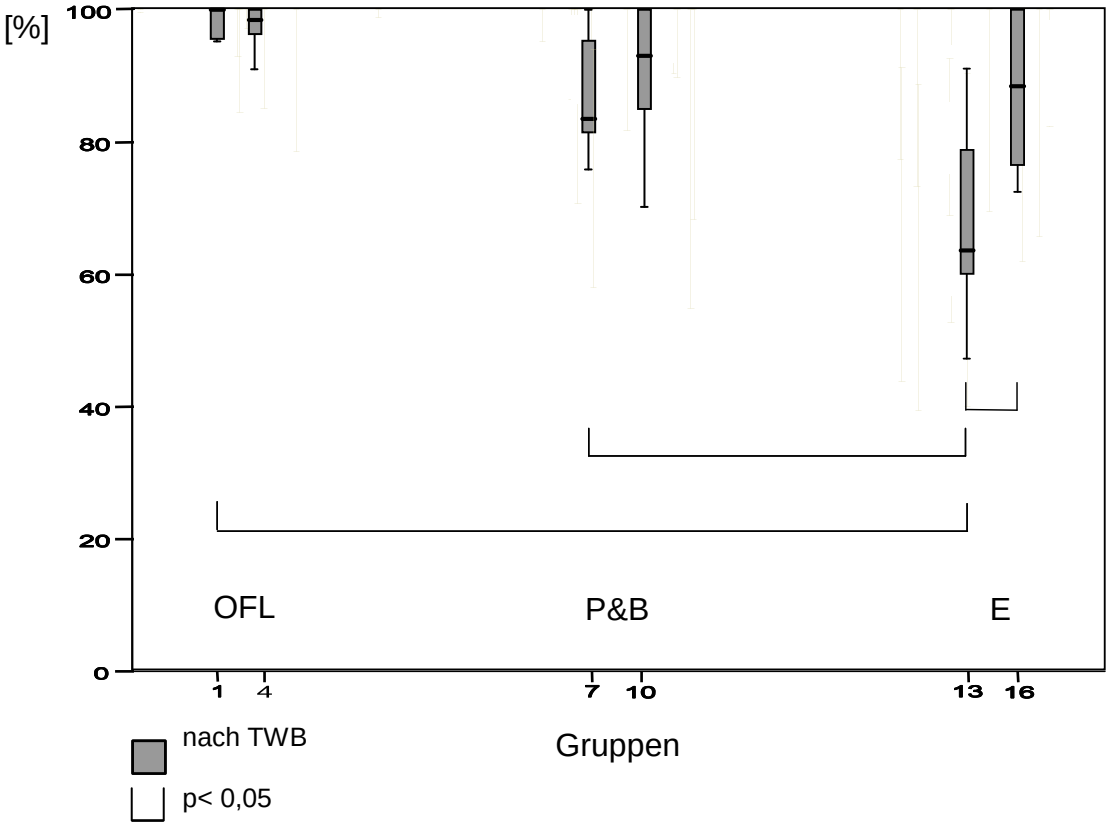


Abbildung 7.4: Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierung von 15 s
Prozentualer Anteil der „Note 1“ an der Gesamtfüllungsrandlänge im Dentin nach TWB bei den Proben mit *OptiBond FL* (OFL, Gruppen 1 und 4), *Prime&Bond NT* (P&B, Gruppen 7 und 10) und *Excite* (E, Gruppen 13 und 16). Die Primereinwirkzeit beträgt 30 s bei den Gruppen 1, 7 und 13 und 60 s bei den Gruppen 4, 10 und 16. Der signifikante Unterschied nach dem Mann-Whitney-U-Test ($p < 0,05$) wird mit kurzem Signifikanzbalken dargestellt. Signifikante Unterschiede nach dem Kruskal-Wallis-Test ($p < 0,05$) werden mit langen Signifikanzbalken dargestellt.

7.1.4.2 Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierungszeit von 30 s

Die Unterschiede der Ergebnisse des Mann-Whitney-U-Test sind für die Gruppen 14 und 17 signifikant. Ebenso sind die Unterschiede der Ergebnisse des Kruskal-Wallis-Test mit Bonferroni-Korrektur zwischen denen der Gruppen 2 und 14 nach TWB signifikant ($p < 0,05$).

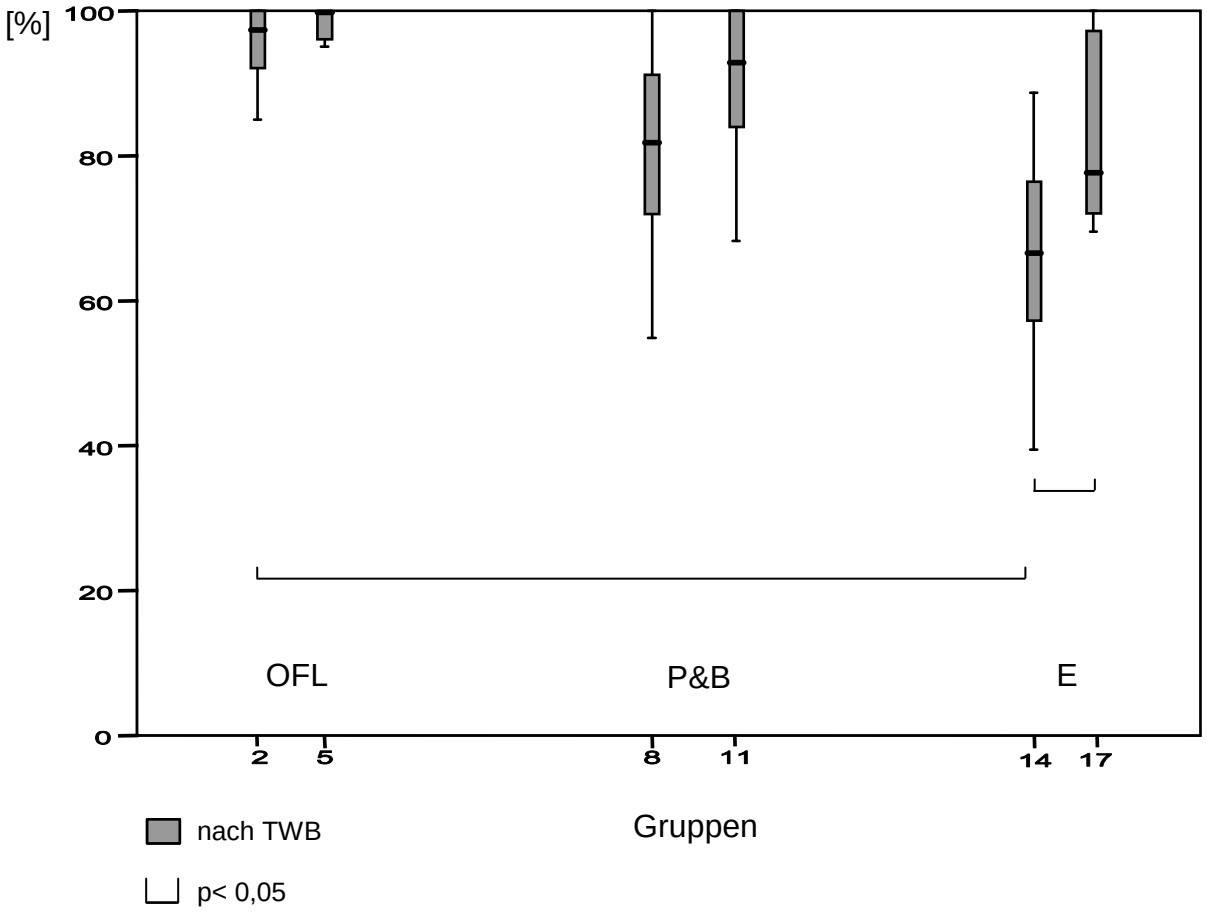


Abbildung 7.5: Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierung von 30 s
Prozentualer Anteil der „Note 1“ an der Füllungsrandlänge im Dentin nach TWB bei den Proben mit *OptiBond FL* (OFL, Gruppen 2 und 5), *Prime&Bond NT* (P&B, Gruppen 8 und 11) und *Excite* (E, Gruppen 14 und 17). Der signifikante Unterschied nach dem Mann-Whitney-U-Test ($p < 0,05$) wird mit kurzem Signifikanzbalken dargestellt. Signifikante Unterschiede nach dem Kruskal-Wallis-Test ($p < 0,05$) werden mit langen Signifikanzbalken dargestellt.

7.1.4.3 Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierungszeit von 60 s

Unabhängig von der Primereinwirkzeit ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen von *OptiBond FL* und *Prime&Bond NT*, sowie zwischen denen von *Prime&Bond NT* und *Excite.*

Der Kruskal-Wallis-Test mit Bonferroni-Korrektur zeigt einen signifikanten Unterschied nach TWB bei einer Primereinwirkzeit von 60 s zwischen den Ergebnissen der Gruppen 6 (*OptiBond FL*) und 18 (*Excite*).

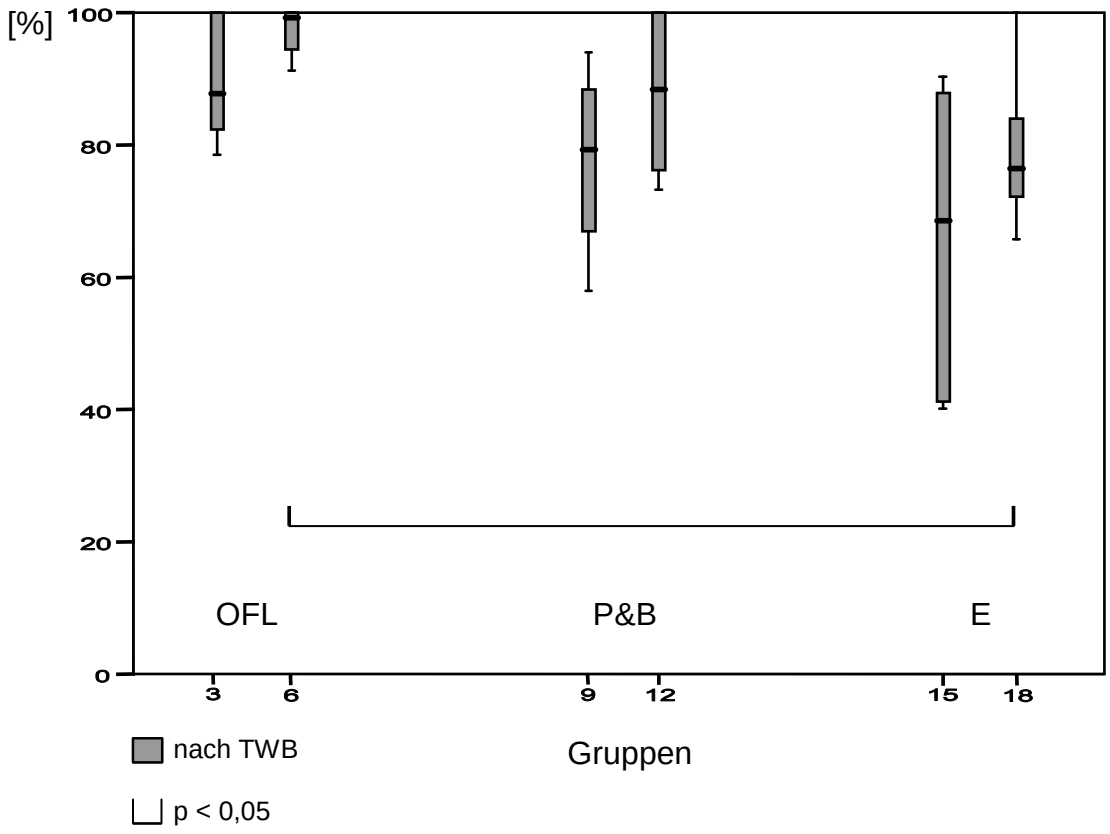


Abbildung 7.6: Einfluss der Primereinwirkzeit bei einer Konditionierung von 60 s
Die Primereinwirkzeit beträgt 30 s bei den Gruppen 3, 9 und 15 und 60 s bei den Gruppen 6, 12 und 18. Prozentualer Anteil der „Note 1“ an der Füllungsrandlänge im Dentin nach TWB bei den Proben mit *OptiBond FL* (OFL, Gruppen 3 und 6), *Prime&Bond NT* (P&B, Gruppen 9 und 12) und *Excite* (E, Gruppen 15 und 18). Der signifikante Unterschied ($p < 0,05$) nach dem Kruskal-Wallis-Test wird mit einem Signifikanzbalken dargestellt.

7.2 Ergebnisse im Bereich Schmelz

Der Kruskal-Wallis-Test ergab über alle 18 Gruppen keine signifikanten Unterschiede in den Ergebnissen im Schmelz nach TWB (siehe Anhang Tabelle 11.9).

Die folgende Abbildung 7.7 zeigt grafisch die Ergebnisse der REM-Randanalyse im Bereich Schmelz nach TWB.

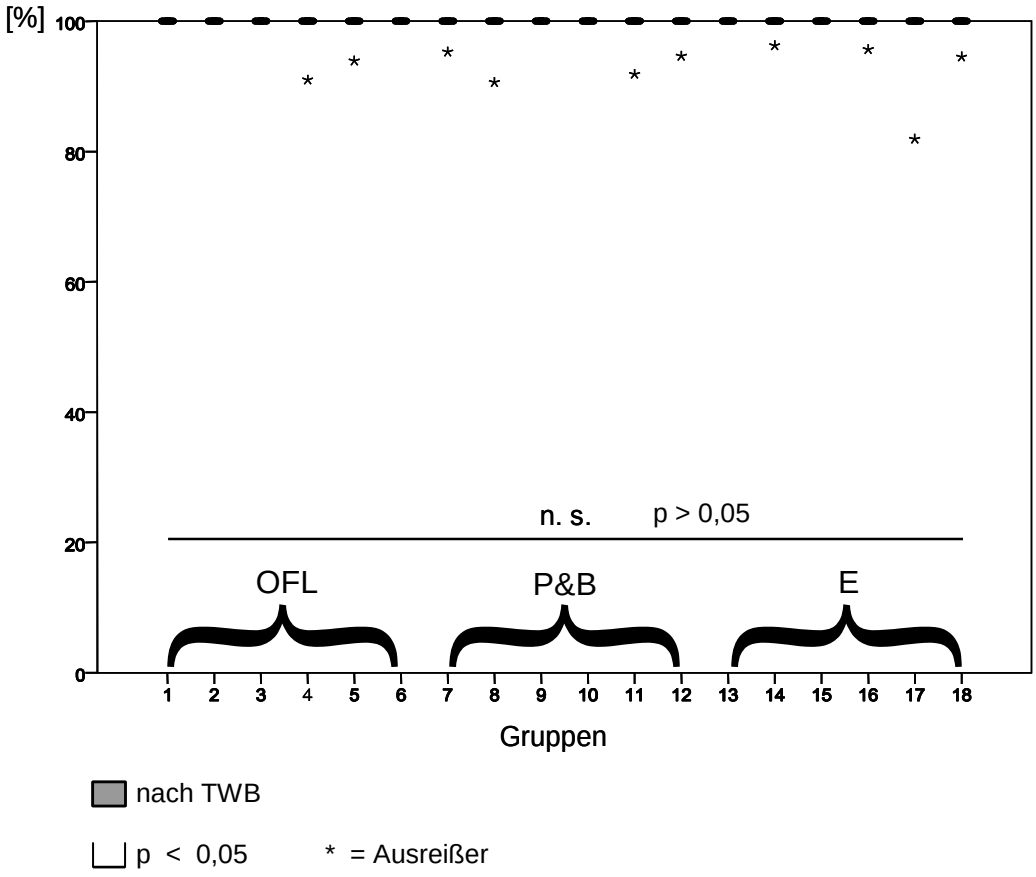


Abbildung 7.7: Einfluss der Primereinwirkzeit bei verschiedenen Konditionierungszeiten
Prozentualer Anteil der „Note 1“ an der Füllungsrandlänge im Schmelz nach der TWB bei den Proben mit *OptiBond FL* (OFL, Gruppen 1 bis 6), *Prime&Bond NT* (P&B, Gruppen 7 bis 12) und *Excite* (E, Gruppen 13 bis 18). Nicht signifikante (n.s.) Unterschiede mit p > 0,05 wurde als Linie dargestellt.

8 Diskussion

8.1 Methodenkritischer Teil

Der Anspruch an die Qualität einer Füllungsrestauration ist im Laufe der letzten Jahrzehnte gestiegen. Durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse, neue Methoden und neue Füllungswerkstoffe konnten in der Füllungstherapie große Erfolge erzielt werden. Dabei versteht man unter dem Erfolg einer Füllungsrestauration die Fähigkeit zur Abdichtung des Pulpa-Dentin-Komplexes [Brännström und Nyborg 1971; Bergenholtz 1982].

Die Haftung am Dentin und Schmelz ist, neben dem Verschleißverhalten, der entscheidende Punkt für die Überlebensrate einer Kompositfüllung. Die Schmelzhaftung gilt dabei als zuverlässig und randspaltvermeidend [Dietschi et al. 1995; Frankenberger und Kern 2003].

Die Haftung wird stark durch Polymerisationsschrumpfung und durch das ungleiche Expansionsverhalten von Komposit und Zahnhartsubstanz bei Temperaturschwankungen belastet [Eick et al. 1991, Sano et al. 1995b]. Ob es sich um eine effektive Haftung handelt, die diesen Belastungen standhält, kann mit verschiedenen Untersuchungsmethoden getestet werden. Dabei gehören die „In-vitro-Untersuchungen“ der Randqualität zu den Standardverfahren, obwohl eine direkte Übertragbarkeit der Daten auf das zu erwartende klinische Verhalten limitiert ist [Roulet 1994]. Vergleicht man die Ergebnisse der In-vitro-Untersuchungen mit denen von klinischen Untersuchungen, so weisen die klinischen Ergebnisse größere Schwankungen auf [Heintze et al. 2009].

Um den Verbund zwischen der Kompositfüllung und der Zahnhartsubstanz zu testen, haben sich verschiedene Methoden der Randanalyse in der Forschung durchgesetzt. Man unterscheidet funktionelle von morphologischen Untersuchungsmethoden, die im Folgenden näher diskutiert werden.

8.1.1 Die funktionelle Untersuchungsmethode

Die am häufigsten verwendete funktionelle Untersuchungsmethode ist die Farbstoffpenetrationsmethode. Dabei wurden früher als Farbstoffe Eosin, Quecksilberchlorid, Chromatrop 2R und der Anilinfarbstoff verwendet [Going 1972]. Diese Farbstoffe werden jedoch nur noch selten genutzt [Taylor und Lynch 1992]. Man verwendet häufiger basisches Fuchsin, Methylenblau und Silbernitratlösungen [Raskin et al. 2001]. Auch fluoreszierende Farbstoffe werden zur Darstellung eines Randspaltes herangezogen. Die Darstellung erfolgt bei dieser Methode mit UV-Licht und fotografischer Dokumentation [Taylor und Lynch 1992].
Es werden auch Darstellungen des Randspaltes mit radioaktiven Isotopen und Bakterien beschrieben [Going 1972; Taylor und Lynch 1992]. Die Auswertungen der meisten Farbstoffpenetrationsmethoden erfolgen unter dem Lichtmikroskop. Um die Eindringtiefe des Farbstoffes durch den Randspalt zu erfassen, müssen feine Sägeschnittmodelle hergestellt werden. Durch die Sägeschnittmodell-herstellung entstehende mögliche Artefakte und durch die mögliche Bildung von Farbschleiern ist die Auswertung oft problematisch [Noack und Roulet 1987]. Es werden andererseits In-vivo-Studien diskutiert: So stellten IWAMI et al. eine Methode vor, in der sie sich zur Darstellung der Randspalten die unterschiedlichen elektrischen Widerstände zwischen der intakten Zahnhartsubstanz und den in den Randspalt penetrierten Elektrolyten zu Nutze machten [Iwami et al. 2000; Iwami et al. 2007].

8.1.2 Die morphologische Untersuchungsmethode

Bei den morphologischen Untersuchungsmethoden unterscheidet man direkte und indirekte Methoden. Zu der direkten Methode zählt die Beurteilung des Füllungsrandes mit Sonde und Spiegel. Sie wird bei vielen großen klinischen Studien benutzt [Feller et al. 1987]. Diese Methode stellt eine sehr subjektive Beurteilung dar und lässt sich nur in geringem Maße standardisieren. Eine weitere direkte Methode ist die Untersuchung mit dem Lichtmikroskop, dabei ist die Detailgenauigkeit des Füllungsrandes durch den limitierten

Vergrößerungsfaktor kritisch zu betrachten. Lichtmikroskopische Untersuchungen dienen vorrangig der Auswertung von Proben des Farbstoffpenetrationstests [Going 1972].
Die Randanalyse im REM, so wie sie in dieser Arbeit genutzt wurde, ist eine morphologisch indirekte Untersuchungsmethode. Bei dieser Untersuchungsmethode lässt sich sowohl die Randqualität als auch die Quantität der Randqualität des Füllungsrandes beurteilen [Roulet 1988].
Die Auswertung mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie gilt als Standardmethode in der quantitativen Randanalyse [Raskin et al. 2001]. Durch die Herstellung von Epoxidharzreplika entstehen exakte, unempfindliche und originalgetreue Nachbildungen der Proben, die den Vakuumbedingungen des Elektronenmikroskopes standhalten. Durch die Verwendung von Replika können auch In-vivo-Studien mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie ausgewertet werden. Die Replika lassen sich gut archivieren und sind leicht zu reproduzieren. Bei der Betrachtung der Proben unter dem REM wird der Rand segmentweise und computerunterstützt nach klaren, einfachen und reproduzierbaren Kriterien beurteilt. Der jeweiligen Randqualität werden nach einem Kriterienkatalog klar definierte Noten zugeordnet. Um eine gleichbleibende Qualität der Beurteilung zu gewährleisten, muss jeder Anwender praktische Erfahrung unter sachkundiger Anleitung sammeln.
Diese Methode erlaubt eine komfortable, präzise und reproduzierbare Bewertung der Randqualität [Lutz et al. 1984, Blunck und Roulet 1989].

8.1.3 Auswahl und Lagerung der Zähne

Leicht verfügbare Zähne von Rindern weisen Unterschiede im Haftverbund gegenüber humanen Zähnen auf [Finger 1988], deshalb wurden in der vorliegenden Arbeit 144 humane kariesfreie Prämolaren verwendet. Prämolaren wurden ausgewählt, um eine Vergleichbarkeit zu anderen Studien zu gewährleisten, in denen ebenfalls Prämolaren verwendet wurden. Die verwendeten Zähne sollten annähernd die gleiche Form und Größe aufweisen, um standardisierte Kavitäten herstellen zu können. Da für diese Studie

kariesfreie Zähne verwendet werden sollten, wurden Prämolaren verwendet, die oft aus kieferorthopädischen Gründen völlig kariesfrei entfernt werden. Gründe der Extraktion, Alter und der Extraktionszeitpunkt der verwendeten Prämolaren waren nicht bekannt. Die Zähne wurden nach der Extraktion bis zum Beginn der Versuche in 0,5 %iger Chloramin-T-Lösung gelagert, da unterschiedliche Lagerbedingungen von extrahierten Zähnen die späteren Ergebnisse beeinflussen können [Goodis et al. 1993]. Die Auswirkungen der unterschiedlichen Lagerungszeiten auf die Ergebnisse von Adhäsivsystemen hinsichtlich Haftfestigkeit und marginaler Adaptation gelten als nicht signifikant [Pashley et al. 1988, Goodis et al. 1993]. Auch das Alter der Zähne hat keinen signifikanten Einfluss auf die Randqualität von Kompositfüllungen [Mixson et al. 1993].

Durch die willkürliche Nummerierung der Zähne und durch randomisierte Zuteilung der Zähne auf die Versuchsgruppen sollte eine Beeinflussung der Ergebnisse durch eine Vorauswahl vermieden werden. Chloramin-T-Lösung wurde in dieser Studie als Lagermedium verwendet, da es die Eigenschaften von Schmelz und Dentin nicht beeinflusst.

8.1.4 Lage und Präparationsform der Kavität

Um den Haftverbund der unterschiedlichen Adhäsive sowohl im Schmelz als auch im Dentin zu prüfen, boten sich Füllungen der Klasse V an. Die Kavitätenform und -größe wurde den klinisch zu erwartenden Zahnhalskavitäten und den Ausmaßen von Zahnhalsfüllungen anderer Studien angepasst [Blunck 1988; Blunck und Roulet 1989; Kemp-Scholte und Davidson 1990; Krejci et al. 1991].

Die Kontraktionsspannung ist im Wesentlichen abhängig von dem Verhältnis der gebundenen zur ungebundenen Oberfläche einer Kompositfüllung (C-Faktor) [Feilzer et al. 1987]. Um die Kontraktionsspannung bei der späteren Polymerisation des Komposits gering zu halten, wurden die Ausmaße der Kavitätenform streng eingehalten.

Der Schmelzrand wurde nach der Präparation angeschrägt, um eine Optimierung der marginalen Adaptation zu gewährleisten [Eriksen und Buonocore 1976; Lüscher et al. 1978; Bowen et al. 1982; Crawford et al. 1987].
Im Dentin wurde der rechtwinklige Präparationsrand nicht angeschrägt, da durch diese Maßnahme keine Verbesserung der Randqualität zu erwarten ist [Seichter 1986; Blunck 1988; Blunck und Roulet 1989].
Laut den Untersuchungen von PASHLEY et al. beeinflusst die Kavitätentiefe den Haftverbund zwischen dem Dentin und der Kompositfüllung [Pashley et al. 1991]. Grund für den geringeren Haftverbund mit zunehmender Kavitätentiefe soll der zunehmende Anteil an Dentintubuli mit gesteigertem Ausstrom des Dentinliquors sein [Haller 1992]. SOH et al. zeigen allerdings, dass die Kavitätentiefe bei Kompositfüllungen im Dentin keinen signifikanten Einfluss auf die Randqualität hat [Soh et al. 1988].

8.1.5 Auswahl und Verarbeitung der Materialien

8.1.5.1 Das Kompositmaterial

Hinsichtlich ihrer werkstoffkundlichen Eigenschaften unterscheiden sich Kompositmaterialien nur wenig voneinander und fast alle besitzen hohe Qualitätsstandards [Kunzelmann und Hickel 2001].
Aufgrund der guten optischen und physikalischen Eigenschaften der Hybridkomposite [Lutz et al. 1983a; Janda 1988c] wurde in dieser Studie ausschließlich ein Feinpartikel-Hybridkomposit verwendet.
Im direkten Vergleich konnten HALLER und GÜNTHER zeigen, dass bei Kompositfüllungen unter Verwendung desselben Haftvermittlers eine größere Randqualität entsteht als bei Kompomerfüllungen [Haller und Günther 1998].
Die physikalisch-mechanischen Eigenschaften eines Komposits werden hauptsächlich durch die anorganische Phase bestimmt. Hybridkomposite sind durch ihre physikalischen Eigenschaften und durch die geringere Volumenausdehnung bei thermischer Belastung den anderen Kompositen überlegen und damit die erste Wahl für zahnfarbene plastische Restaurationen

[Kullmann und Pötters 1984; Staninec et al. 1986; Roulet 1987a]. Im Vergleich zu mikrogefüllten Kompositen lassen sich bei Hybridkompositen größere Polymerisationstiefen erreichen, wodurch höhere Härtewerte und eine geringere Wasseraufnahme erzielt werden [Roulet 1987a; Torstenson und Brännström 1988].

Zusätzlich ist die Polierbarkeit durch den geringeren Durchmesser der Makrofüller in den modernen Feinpartikel-Hybridkompositen ähnlich gut wie bei mikrogefüllten Kompositen [Tjan und Chan 1989].

Eine große Belastung für den Haftverbund zwischen dem Komposit und der Zahnhartsubstanz ist die Polymerisationsschrumpfung [Feilzer et al. 1988].

Die Größe der Polymerisationsschrumpfung hängt dabei von der Füllstoffart, dem Füllstoffgehalt und dem Monomertyp ab, aber auch vom Polymerisationsgrad und dem Initiatorgehalt. Auch Lufteinschlüsse beim Legen der Füllung beeinflussen die Polymerisationsschrumpfung des Kompositmaterials [Asmussen 1975; Roulet 1987b]. Das Verhältnis der gebundenen zur ungebundenen Oberfläche einer Kompositfüllung (C-Faktor) [Feilzer et al. 1987] und die als Flow bezeichneten Kompositeigenschaften beeinflussen das Ausmaß der Polymerisationsschrumpfung [Asmussen 1975; Davidson und de Gee 1984; Feilzer et al. 1990a]. Die Spannungsentwicklung innerhalb der Kompositmasse ist abhängig von der Polymerisationskontraktion, vom C-Faktor und vom Elastizitätsmodul. Das Hybridkomposit Filtek Z250 von der Firma 3M ESPE hat ein Elastizitätsmodul nahe dem des Dentins und ist seit Jahren das Standardmaterial in vielen In-vitro-Versuchen und wurde in dieser Studie verwendet, um eine Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen anderer Studien zu erreichen.

8.1.5.2 Die Adhäsivsysteme

In dieser Studie wurden drei verschiedene Adhäsivsysteme jeweils mit demselben Komposit kombiniert. Es wurden drei verschiedene Vertreter von Adhäsiven aus unterschiedlichen Kategorien mit unterschiedlichem Aufbau in dieser Studie verwendet.

Das *OptiBond FL* ist ein Zweikomponenten-Adhäsivsystem, dessen Primer auf Wasser-Alkohol-Komponenten basiert. Es hat in zahlreichen Studien erfolgreich abgeschnitten [Haller et al. 1995; Swift et al. 1996; Blunck und Roulet 1997] und wird in vielen Studien als sogenannter Goldstandard genutzt [Peumans et al. 2005; 2012].

Das System wird in zwei klar unterscheidbaren Flaschen geliefert. In der einen Flasche befindet sich ein sehr dünnflüssiger Primer, in der anderen ein dickflüssiges Bonding. Die Flüssigkeiten lassen sich aufgrund der unterschiedlichen Konsistenz und Farbe gut unterscheiden. Das Risiko eines Verarbeitungsfehlers durch ein versehentliches Verwechseln der Flüssigkeiten ist dadurch minimiert.

Der dünnflüssige Primer besitzt eine hohe Penetrationsfähigkeit im Dentin, während das Bonding nach der Polymerisation als mechanisch sehr belastbare Verbindungsschicht zwischen Primer und Komposit dient [Haller 1994; Eick et al. 1991; Frankenberger et al. 1997]. Die Verarbeitung von *OptiBond FL* besteht aus mehreren aufeinander folgenden Arbeitsschritten: dem Konditionieren im Sinne der Etch & Rinse-Technik mit Phosphorsäure, dem Absprühen der Säure mit Wasser (Rinsing), dem vorsichtigen Trocknen der Kavität im seichten Luftstrom, dem Rewetten, dem Auftragen des Primers, der anschließenden Applikation des Bondings und der Polymerisation des Adhäsivsystems mit einer Polymerisationslampe.

CIUCCHI et al. halten die Trennung der unterschiedlichen funktionalen Komponenten in der Praxis für zu kompliziert und teilweise verwirrend [Ciucchi et al. 1997]. Daraus ergibt sich die Nachfrage nach einem einfachen Einflaschensystem, das eine gute Penetrationsfähigkeit besitzt und eine gute Verbindungsschicht ausbildet. *Prime&Bond NT* ist ein acetonbasiertes Adhäsivsystem, welches in Verbindung mit der Etch & Rinse-Technik empfohlen wird. Das System vereinfacht die Applikation und verringert somit den Zeitaufwand. Verarbeitungsfehler durch Verwechslung der Komponenten sind durch das Einflaschensystem ausgeschlossen.

Prime&Bond NT enthält Aceton als Lösungsmittel. Es besitzt eine hohe Flüchtigkeit, welche sich positiv auf die Trocknung der aufgetragenen

Adhäsivschicht auswirkt. Acetonhaltige Adhäsive brauchen allerdings eine leicht feuchte Dentinoberfläche, um eine gute Haftung aufzubauen [Kanca 1992].
Das ethanolhaltige und acetonfreie *Excite* lässt sich gut trocknen und funktioniert auf unterschiedlich feuchtem Dentin [Perdigão et al. 2002]. Auch *Excite* wird in nur einer Flasche geliefert.

8.1.5.3 Ausarbeitung und Politur der Füllungen

Gröbere Überschüsse wurden mit feinen Finierdiamanten entfernt, gleichzeitig wurden die Füllungen konturiert. Zur Politur eignen sich feine und extrafeine Kompositdiamanten (15 µm Körnung und feiner) [Lutz et al. 1983a]. Zu grobe Diamanten sind für die Entfernung von Überschüssen ungeeignet, da sie Dentin- und Schmelzpartien am Füllungsrand zu stark beschädigen. Die Ausarbeitung von Kompositfüllungen mit Aluminiumoxid beschichteten Scheiben unterschiedlicher Korngröße hat sich bewährt [Lutz et al. 1983a]. Durch das gleichmäßige Abtragen von anorganischen Füllstoffpartikeln und organischer Kunststoffmatrix lässt sich eine effektive Glättung des Kompositmaterials atraumatisch und substanzschonend realisieren [Roulet 1987a]. Die mit Aluminiumoxid beschichteten Scheiben hinterlassen eine zufriedenstellende Güte der Kompositoberfläche mit guten Übergängen zur Zahnhartsubstanz [Lutz et al. 1983a]. Alternative Poliersysteme mit Silikonpolierern und Polierpasten werden von vielen Autoren für die Endpolitur empfohlen.

8.1.5.4 Wasserlagerung

Kompositfüllungen dehnen sich bei Wasserkontakt aus [Hansen 1982]. Diese hygroskopische Ausdehnung hat ihr Maximum nach ca. 21 Tagen erreicht [Momoi und McCabe 1994]. Das Kompositmaterial ist dann größtenteils mit Wasser gesättigt [Hansen 1982; Feilzer et al. 1990a]. Das Wasser wird dabei in der organischen Phase des Komposits aufgenommen. Durch Aufspaltung der Polymerketten entsteht ein größerer Intermolekularabstand, der die Expansion

des Komposits bewirkt. Gleichzeitig kommt es durch die Reorganisation der Polymerketten zu einem unerwünschten wasserbedingten Weichmachereffekt, der die Gitterstruktur des Polymers schwächt [Söderholm 1988]. Die Menge der Wasseraufnahme ist abhängig von dem im Komposit verwendeten Monomer, der Struktur der Füllstoffpartikel sowie dem Verhältnis vom Matrixanteil zum Füllstoffgehalt [Söderholm 1988]. In der vorliegenden Untersuchung wurden die Proben 21 Tage vor der TWB in Wasser gelagert, um eine Überlagerung der Effekte der thermischen Expansion und der hygroskopischen Expansion bei der TWB auszuschließen [Feilzer et al. 1990a].

8.1.5.5 Thermische Wechselbadbelastung

In der Mundhöhle kommen durch Speisen Temperaturunterschiede von bis zu 50 °C zustande [Bauer und Henson 1984]. Zähne und Restaurationsmaterialien sind dadurch ständigen Temperaturschwankungen unterworfen [Momoi et al. 1990]. Durch das unterschiedliche Expansionsverhalten von Komposit und Zahnhartsubstanz bei Temperaturänderungen treten Spannungen auf, die zur Schädigung des adhäsiven Verbundes führen können [Feilzer et al. 1987]. In vielen Studien konnte eine Verschlechterung der Randqualität aufgrund der thermischen Wechselbadbelastung beobachtet werden [Bauer und Henson 1984; Schuckar und Geurtsen 1997; Blunck und Roulet 1997].
Eine thermische Wechselbadbelastung von 2000 Zyklen entspricht in etwa einer in vivo Belastung von zwei Jahren und gilt als ausreichend geeignet, um die Auswirkungen auf die Randqualität beurteilen zu können [Noack 1988]. Temperaturwechselbadbelastungen sind allgemein als realistische Belastungsmethoden anerkannt [Roulet 1987a].

8.1.5.6 Einfluss der Dentintrocknung

Durch die Konditionierung der Dentinoberfläche kommt es zum Verlust der anorganischen Matrix des Dentins. Die Feuchtigkeit im Dentin verhindert ein Kollabieren des kollagenen Netzwerkes. Erst durch die Dentintrocknung mittels

eines Luftstroms kollabieren die kollagenen Fasern [Titley et al. 1994]. Ein kollabiertes, kollagenes Netzwerk behindert die Penetration des Primers. Eine Dentinoberfläche, die für 60 s getrocknet wurde, weist eine 22 % dünnere Hybridschicht auf als eine Dentinoberfläche, die nur für 15 s getrocknet wurde [Pioch et al. 1997]. Bei der Verwendung von acetonhaltigen Primern konnte der negative Einfluss der Dentintrocknung auf die Hybridschicht besonders gut nachgewiesen werden [Gwinnet 1992; Nakabayashi 2000]. Bei der Verwendung von wasserhaltigen Primern war der Einfluss weniger deutlich [Kanca 1994]. Adhäsivsysteme mit wasserhaltigen Primern sind weniger empfindlich gegenüber einer zu starken Trocknung des Dentins, da sie mit dem in ihnen enthaltenen Wasser das kollagene Netzwerk effektiv wieder aufrichten [Van Meerbeek et al. 1998]. Um den negativen Einfluss einer zu stark getrockneten Dentinoberfläche zu minimieren, wird die Methode des „Rewetten“ empfohlen [Tay et al. 1997], dabei wird die getrocknete Dentinoberfläche wieder leicht mit Wasser befeuchtet. Es konnte gezeigt werden, dass der negative Einfluss der Dentintrocknung mit dem „Rewetten“ ausgeglichen werden kann [Gwinnet 1994].

8.2 Diskussion der Ergebnisse

Im Folgenden werden nur die Ergebnisse nach TWB und nach 21 Tage langer Wasserlagerung diskutiert, da diese der klinischen Situation nahe kommen und auch nur diese relevant sind. Im Kapitel 8.2.4 werden die Ergebnisse vor TWB mit denen nach TWB verglichen und diskutiert.

8.2.1 Einfluss der Konditionierungszeit

Für die Tiefe der Demineralisation im Dentin sind die Konzentration der Säure und die Dauer der Konditionierung verantwortlich [Uno und Finger 1996]. Die Dicke der Hybridschicht hängt somit auch von der Demineralisationstiefe bzw. der Konditionierungszeit ab. Je länger das Dentin angeätzt wird, desto dicker wird später die Hybridschicht und desto stärker fällt die von den Tubuli

ausgehende seitliche Penetration des Primers aus [Pioch et al. 1997]. Wird eine 37 bis 40 %ige Phosphorsäure für 60 s auf das Dentin appliziert, führt dies zu einer Demineralisationstiefe von 10 bis 15 µm [Chiba et al. 1989; Uno und Finger 1996; Wang und Spencer 2004]. Eine so stark konditionierte Dentinoberfläche könnte zu einer Demineralisationstiefe führen, die die Penetrationsfähigkeit des Primers übersteigt und eine vollständige Infiltration verhindert. Die vollständige Infiltration wird dabei durch kollabierte kollagene Fasern behindert [Tam und Pilliar 1994]. Eine unvollständige Infiltration führt beim adhäsiven Verbund zu einer Abnahme der Füllungsrandqualität [Erickson 1992]. Die Haftwerte zwischen Dentin und Füllung sind bei einer schmalen, vollständig penetrierten Hybridschicht größer als bei einer breiten Schicht von demineralisiertem Dentin, das nur unvollständig vom Primer infiltriert wird [Nakabayashi et al. 1991; Van Meerbeek et al. 1992a]. Erwartet wurde, dass bei exzessivem Ätzen der Dentinoberfläche von bis zu 60 s die Primer nicht die Penetrationsfähigkeit besitzen würden, um das konditionierte Dentin vollständig zu infiltrieren, und ein schlechteres Randverhalten die Folge wäre. Die Ergebnisse bei den getesteten Adhäsiven zeigen jedoch im Dentin keine signifikanten Unterschiede bei einer Konditionierungsdauer von 15 s bis 60 s. Eine Konditionierungszeit von 15 s im Dentin ist nach diesen Ergebnissen bei den getesteten Adhäsiven für klinische Anwendungen ausreichend. BOLANOS-CARMONA et al. kommen mit ihren Versuchen zur selben Schlussfolgerung, die Autoren raten aber von noch kürzeren Konditionierungszeiten des Dentins ab [Bolanos-Carmona et al. 2006]. Die Untersuchungen von KIMMES et al. bestätigen ebenfalls dieses Ergebnis, wobei die vom Hersteller empfohlene Konditionierungszeit mit einer Konditionierungszeit von 60 s bei Abscheruntersuchungen verglichen wurde [Kimmes et al. 2010].

Das Ätzmuster im Schmelz wird nach Trocknung durch eine weißlich, opake Oberfläche sichtbar. Um ein sicheres Ätzmuster und einen besseren Haftverbund im Schmelz zu erzeugen, empfehlen einige Autoren den Schmelz vor der Konditionierung anzuschrägen [Swanson et al. 2008]. Doch das wird in der Literatur sehr umstritten diskutiert. Ziel der Anschrägung ist es, die Schmelzprismen senkrecht zur Prismenlängsachse zu treffen. Man geht davon

aus, dass der Schmelz eine geringere Zugfestigkeit aufweist bei Kräften, die quer zu der Längsachse der Schmelzprismen wirken. Die Ergebnisse anderer Autoren zeigen aber keinen Vorteil einer Anschrägung des Kavitätenrandes im Schmelz [Bagheri und Ghavamnasiri 2008]. Am Schmelz konnten auch bei zeitlich kurzer Ätzung sehr gute Resultate beobachtet werden [Beech und Jalaly 1980; Barkmeier et al. 1986; Guba et al. 1994; Triolo et al. 1993]. In der vorliegenden Arbeit konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen Konditionierungszeiten von 15 s bis 60 s im Schmelz festgestellt werden. Die Ergebnisse von KIMMES et al. bestätigen indirekt die Ergebnisse dieser Arbeit. Sie fanden durch Abscherversuche auf glatten Schmelzoberflächen keine signifikanten Unterschiede zwischen den vom Hersteller empfohlenen Konditionierungszeiten im Vergleich zu Konditionierungszeiten von 60 s [Kimmes et al. 2010]. Frühere Studien belegen, dass sowohl kürzere Konditionierungszeiten im Schmelz zu den analogen Oberflächenveränderungen führen als auch längere Konditionierungszeiten [Brännström und Nordenvall 1978; Crim und Shay 1987; Gottlieb et al. 1982; Barkmeier et al. 1985]. Studien, deren Augenmerk auf Randdichtigkeit und Haftwert lagen, bestätigen die vorliegenden Ergebnisse [Beech und Jalaly 1980; Barkmeier et al. 1986; Gilpatrick et al. 1991; Triolo et al. 1993; Guba et al. 1994]. Konditionierungszeiten des Schmelzes unter 5 s führen zu einem deutlich schlechteren Ergebnis des späteren Haftverbundes [Olsen et al. 1997]. Längere Konditionierungszeiten von mehr als 30 s mit 37 %iger Phosphorsäure führen lediglich zu einem erhöhten Schmelzsubstanzverlust [Legler et al. 1990]. Aufgrund der in dieser Arbeit vorliegenden Ergebnisse kann im Bereich Schmelz eine Konditionierungszeit von 15 s für klinische Anwendungen als ausreichend empfohlen werden.

8.2.2 Einfluss der Primereinwirkzeit

Der Einfluss der Primereinwirkzeit im Dentin hängt vom jeweiligen Adhäsiv und den Konditionierungszeiten ab. In der vorliegenden Arbeit traten nur bei dem Adhäsiv *Excite* signifikante Unterschiede zwischen den Primereinwirkzeiten von

30 s und 60 s auf, wenn das Dentin für 15 s oder 30 s konditioniert wurde. Dabei waren die Ergebnisse bei einer Primereinwirkzeit von 60 s signifikant besser als bei einer Primereinwirkzeit von 30 s.
Eine Ausnahme bildeten die Ergebnisse bei einer Konditionierungszeit von 60 s, hier zeigten sich keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen den Primereinwirkzeiten von 30 s und 60 s. Anscheinend ist die Penetrationsfähigkeit von *Excite* nicht so stark, um trotz einer verlängerten Primereinwirkzeit die 60 s lang konditionierte Dentinschicht ausreichend zu infiltrieren. Denn nur, wenn der Primer bis zu den nicht durch die Konditionierung veränderten Dentinbereichen vordringt, wird eine effektive mikromechanische Verankerung in der Hybridschicht erreicht [Nakabayashi et al. 1991; Van Meerbeek et al. 1992a].

8.2.3 Vergleich der Adhäsivprodukte verschiedener Hersteller

Der Einfluss der Adhäsive auf die Randqualität im Bereich Dentin hängt stark von der Konditionierungszeit und der Primereinwirkzeit ab.
Bei einer Primereinwirkzeit von 30 s und einer Konditionierungszeit von 15 s zeigen *OptiBond FL* und *Prime&Bond NT* signifikant bessere Ergebnisse als *Excite*.
Bei einer Primereinwirkzeit von 60 s und einer Konditionierungszeit von 15 s gibt es keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen den drei Adhäsiven. *OptiBond FL* und *Prime&Bond NT* scheinen die Demineralisationsschicht schneller zu infiltrieren.
Bei einer Primereinwirkzeit von 30 s und einer größeren Demineralisationsschicht bedingt durch eine Konditionierungszeit von 30 s zeigt *OptiBond FL* signifikant bessere Ergebnisse als *Excite*.
Bei einer Primereinwirkzeit von 60 s und einer Konditionierungszeit von 30 s gibt es keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen den drei Adhäsiven.
Bei einer Primereinwirkzeit von 30 s und einer noch größeren Demineralisationsschicht bedingt durch eine Konditionierungszeit von 60 s gibt es keine signifikanten Unterschiede mehr zwischen den drei Adhäsiven.

Verlängert man die Primereinwirkzeit auf 60 s bei einer Konditionierungszeit von 60 s, zeigt *OptiBond FL* ein signifikant besseres Ergebnis als *Excite*. Die Permeabilität bzw. die Infiltrationsgeschwindigkeit des Primers wird anscheinend erst bei ausreichender Demineralisationstiefe und einer längeren Primereinwirkzeit deutlich. *OptiBond FL* scheint in der gleichen Zeit die Demineralisationsschicht schneller zu infiltrieren und damit signifikant bessere Ergebnisse als *Excite* zu erzielen.

Ein ähnliches Ergebnis beschreiben BOUILLAGUET et al.: Es wurden unter anderem die Haftwerte von *OptiBond FL*, *Prime&Bond NT* und *Excite* verglichen. *OptiBond FL* zeigte signifikant bessere Ergebnisse als *Excite*. Allerdings erfolgten die Versuche am Dentin von Schweinezähnen [Bouillaguet et al. 2001], deshalb sind die Ergebnisse nur bedingt auf humane Zähne übertragbar.

Bei keiner der Konditionierungszeiten und Primereinwirkzeiten gab es signifikante Unterschiede zwischen *Prime&Bond NT* und *OptiBond FL*.

OptiBond FL hat sich in einigen Studien als wirksames Adhäsivsystem erwiesen [Blunck und Roulet 1997; Juloski et al. 2012]. *OptiBond FL* verfügt als Mehrflaschen-System über eine wasser- und ethanolhaltige Primerzusammensetzung, die unter anderem für die guten Ergebnisse verantwortlich ist. Das in dem Primer enthaltene Wasser kann die kollabierten Dentin-Kollagenfasern wieder aufrichten und über das flüchtige Lösungsmittel Ethanol kann das hydrophobe Monomer in das wasserhaltige Kollagengeflecht penetrieren. Ein weiterer Grund für die guten Ergebnisse ist die dicke *OptiBond FL*-Adhäsivschicht, die die auftretenden Kräfte bei der Polymerisation abpuffert [Van Meerbeek et al. 1993].

8.2.4 Einfluss der Temperaturwechselbadbelastung

Der Anteil an perfekten Füllungsrändern war nach der TWB entweder gleich groß oder kleiner. Er war jedoch nie größer, als vor der TWB.

Die Temperaturunterschiede erzeugen Expansionsspannungen an den Füllungsrändern, da das Komposit einen höheren thermischen

Expansionskoeffizienten hat, als die Zahnhartsubstanzen Schmelz und Dentin. Diese unterschiedlich großen Expansionskoeffizienten können bei starken Temperaturschwankungen einen negativen Effekt auf die marginale Adaptation haben und es kann im Randbereich der Füllung zu Perkolationseffekten kommen [Asmussen 1974; Eakle 1986; Staninec et al. 1986; Torstenson und Brännström 1988; Bullard et al. 1988].
Aufgrund der fehlenden Signifikanz bei der statistischen Auswertung der Ergebnisse im Bereich des Schmelzes, kann davon ausgegangen werden, dass das Kompositmaterial Filtek Z250 mit dem Schmelz bei den getesteten Adhäsivsystemen einen so stabilen Verbund eingeht, dass die standardisierte TWB keinen signifikanten Einfluss auf die Randqualität hat. Dieser Verbund ist so stabil, dass die möglichen Temperaturschwankungen im Mund nicht zum Qualitätsverlust des Füllungsrandes im Schmelz führen.
Einen signifikanten Einfluss der TWB gab es bei den in dieser Arbeit getesteten Adhäsiven nur im Bereich Dentin.

8.2.4.1 Einfluss der TWB bei OptiBond FL im Dentin

Bei einer Primereinwirkzeit von 30 s sind signifikante Unterschiede vor und nach der TWB bei einer Konditionierungszeit von 30 s und 60 s vorhanden. Man kann davon ausgehen, dass ein unvollständig infiltriertes Kollagengerüst zu schlechteren Ergebnissen der Randqualität nach der TWB führt. Der Primer ist bei 30 s Einwirkzeit nicht in der Lage, ein konditioniertes Dentin von 30 s und 60 s vollständig zu durchdringen. Bei einer verlängerten Einwirkzeit des Primers von 60 s ist es dem Primer anscheinend möglich, das für 15 s und 60 s konditionierte Dentin vollständig zu penetrieren und so dem negativen Einfluss der TWB entgegen zu wirken.
Der signifikante Unterschied vor und nach der TWB bei einer Primereinwirkzeit von 60 s und einer Konditionierungszeit von 30 s ist in diesem Zusammenhang nicht logisch erklärbar. Ursächlich könnte eine unterschiedliche Streuung der Werte vor und nach der TWB im Zusammenhang mit einer sehr guten Qualität in der Probengruppe vor der TWB sein.

8.2.4.2 Einfluss der TWB bei Prime&Bond NT im Dentin

Bei *Prime&Bond NT* zeigen sich bei 30 s und 60 s Primereinwirkzeit bei allen untersuchten Konditionierungszeiten signifikante Unterschiede vor und nach der TWB. Der Primer scheint selbst bei längerer Einwirkzeit nicht in der Lage zu sein, dem negativen Einfluss der TWB entgegen zu wirken. Temperaturunterschiede können demnach auf Dauer die Füllungsrandqualität negativ beeinflussen.

8.2.4.3 Einfluss der TWB bei Excite im Dentin

Bei einer Primereinwirkzeit von 30 s sind bei allen Konditionierungszeiten signifikante Unterschiede vor und nach der TWB festzustellen. Der Primer scheint selbst bei dieser Einwirkzeit nicht in der Lage zu sein, dem negativen Einfluss der TWB entgegen zu wirken.
Selbst bei einer Primereinwirkzeit von 60 s und einer Konditionierungszeit von 15 s ist ein signifikanter Unterschied vor und nach der TWB vorhanden. Der Primer scheint auch bei 60 s Einwirkzeit und einer Konditionierungszeit von 15 s nicht in der Lage zu sein, dem negativen Einfluss der TWB entgegen zu wirken. Temperaturunterschiede können auf Dauer die Füllungsrandqualität somit negativ beeinflussen.
Erst bei einer Primereinwirkzeit von 60 s ist bei Konditionierungszeiten von 30 s und 60 s kein signifikanter Unterschied mehr vor und nach TWB vorhanden.
Die längere Einwirkzeit des Primers von 60 s scheint bei Konditionierungszeiten von 30 s und 60 s eine bessere Infiltrationstiefe im Dentin zu erzielen und damit ein stabileres Randverhalten der Füllung gegenüber Temperaturbelastungen im Mund zu erreichen.

9 Schlussfolgerung

Aus den Ergebnissen dieser Studie lassen sich für die Zahnhartsubstanzen Schmelz und Dentin folgende Schlussfolgerungen ziehen:

Im Bereich Schmelz:
Die Ergebnisse der Adhäsive *OptiBond FL*, *Prime&Bond NT* und *Excite* zeigen im Füllungsrandbereich in Bezug auf die Randqualität der „Note 1“ keine signifikanten Unterschiede bei den unterschiedlichen Konditionierungs- und Primereinwirkzeiten. Die TWB hat bei diesen Adhäsiven und bei allen getesteten Konditionierungs- und Primereinwirkzeiten keinen Einfluss. Längere Einwirkzeiten des Primers verbessern selbst bei langen Konditionierungszeiten nicht das Randverhalten von Füllungen im Schmelz. Nach den Ergebnissen dieser Studie ist eine Konditionierungszeit von 15 s in Kombination mit einer Primereinwirkzeit von 30 s bei allen getesteten Adhäsiven ausreichend.

Im Bereich Dentin:
Die Ergebnisse von *OptiBond FL* zeigen nach der TWB keine signifikanten Unterschiede zwischen den Primereinwirkzeiten von 30 s und 60 s in Bezug auf die Randqualität der „Note 1“. Unabhängig von der Konditionierungszeit ist eine Einwirkzeit des Primers von 30 s nach diesen Ergebnissen für die klinische Situation ausreichend.
Die Ergebnisse von *Prime&Bond NT* zeigen ebenfalls nach der TWB keine signifikanten Unterschiede zwischen den Primereinwirkzeiten von 30 s und 60 s in Bezug auf die Randqualität der „Note 1“. Unabhängig von der Konditionierungszeit des Dentins mit Phosphorsäure ist auch hier eine Einwirkzeit des Primers von 30 s nach diesen Ergebnissen für die klinische Situation ausreichend. Das Randverhalten wird durch die TWB bei allen getesteten Konditionierungszeiten und bei allen Primereinwirkzeiten signifikant schlechter.

Die Ergebnisse von *Excite* zeigen demgegenüber signifikante Unterschiede nach der TWB zwischen den Primereinwirkzeiten von 30 s und 60 s in Bezug auf die Randqualität der „Note 1“ bei Konditionierungszeiten von 15 s und 30 s.
Bei Konditionierungszeiten von bis zu 30 s ist eine Einwirkzeit des Primers von 60 s nach diesen Ergebnissen für die klinische Situation zu empfehlen.
Die optimale Primereinwirkzeit ist somit abhängig vom jeweiligen Adhäsiv.
Durch eine verlängerte Primereinwirkzeit von 60 s kann die Füllungsrandqualität nur bei *Excite* und auch nur bei Konditionierungszeiten von 15 s und 30 s signifikant verbessert werden.
Bei einer Primereinwirkzeit von 30 s und einer Konditionierungszeit von 15 s zeigen die Adhäsive *OptiBond FL* und *Prime&Bond NT* signifikant bessere Ergebnisse als *Excite* in Bezug auf die Randqualität der „Note 1“. Die Adhäsive *OptiBond FL* und *Prime&Bond NT* sind daher dem *Excite* vorzuziehen.
Die Konditionierungszeit von 15 s ist bei allen getesteten Adhäsiven ausreichend und aus klinischen Gesichtspunkten empfehlenswert. Sollte bei der klinischen Anwendung die Konditionierung 30 s oder mehr betragen ist bei *OptiBond FL* und bei *Prime&Bond NT* eine Primereinwirkzeit von 30 s nach den Ergebnissen dieser Studie ausreichend. Bei der klinischen Anwendung von *Excite* dagegen wird grundsätzlich eine Primereinwirkzeit von 60 s empfohlen.

10 Literaturverzeichnis

1 Albaladejo A, Osorio R, Toledano M, Ferrari M. Hybrid layers of etch-and-rinse versus self-etching adhesive systems. Med Oral Patol Oral Cir Bucal 2010;15:112-118.

2 Al-Boni R, Raja OM. Microleakage evaluation of silorane based composite versus methacrylate based composite. J Conserv Dent 2010;13:152-155.

3 Ameye C, Lambrechts P, Vanherle G. Conventional and microfilled composite resins. Part I: Color stability and marginal adaptation. J Prosthet Dent 1981;46:623-630.

4 Asmussen E. The effect of temperature changes on adaptation of resin fillings. I. Acta Odontol Scand 1974;32:161-171.

5 Asmussen E. Composite restorative resins. Composition versus wall-to-wall polymerisation contraction. Acta Odontol Scand 1975;33:337-344.

6 Bagheri J, Denehy G. Effect of restoration thickness at the cavosurface bevel on the class IV acid-etched retained composite resin restoration. J Prosthet Dent 1985;54:175-177.

7 Bagheri M, Ghavamnasiri M. Effect of cavosurface margin configuration of Class V cavity preparations on microleakage of composite resin restorations. J Contemp Dent Pract. 2008;9:122-129.

8 Baier RE. Principles of adhesion. Oper Dent 1992;17:1-9.

9 Barkmeier WW, Gwinnett AJ, Shaffer SE. Effects of enamel etching time on bond strength and morphology. J Clin Orthod 1985;19:36-38.

10 Barkmeier WW, Shaffer SE, Gwinnett AJ. Effects of 15 vs 60 second enamel acid conditioning on adhesion and morphology. Oper Dent 1986;11:111-116.

11 Bates D, Retief DH, Jamison HC, Denys FR. Effects of acid etch parameters on enamel topography and composite resin--enamel bond strength. Pediatr Dent 1982;4:106-110.

12 Bauer JG, Henson JL. Microleakage: a measure of the performance of direct filling materials. Oper Dent 1984;9:2-9.

13 Bausch JR, Lange K, Davidson CL, Peters A, De Gee AJ. Clinical significance of polymerization shrinkage of composite resins. J Prosthet Dent 1982;48:59-67.

14 Beech DR, Jalaly T. Bonding of polymers to enamel: influence of deposits formed during etching, etching time and period of water immersion. J Dent Res 1980;59:1156-1162.

15 Bergenholtz G, Cox CF, Loesche WJ, Syed SA. Bacterial leakage around dental restorations: its effect on the dental pulp. J Oral Pathol 1982;11:439-450.

16 Birk G, Bombach B, Sereny M, Triadan H. Clinical trial of 2 composite filling materials based on ISO (International Standardization Organization) requirements. Dtsch Zahnärztl Z 1981;36:641-647.

17 Blunck U. Der Einfluss von Dentinhaftmitteln auf die marginale Adaption von Komposit-Füllungen im Dentin in vitro. Zahnmed Diss, FU Berlin,1987.

18 Blunck U. SEM evaluation of the margins of composite fillings in dentin in vitro. Dtsch Zahnärztl Z 1988;43:939-943.

19 Blunck U. Improving cervical restorations: a review of materials and techniques. J Adhes Dent 2001;3:33-44.

20 Blunck U, Haller B. Klassifikation von Bondingsystemen. Quintessence 50 1999;10:1021-1033.

21 Blunck U, Roulet JF. In vitro marginal quality of dentin-bonded composite resins in Class V cavities. Quintessence Int 1989;20:407-412.

22 Blunck U, Roulet JF. Einfluss der Wasserlagerung auf die Wirksamkeit von Dentinadhäsiven. Dtsch Zahnärztl Z 1997;52:806-808.

23 Boeckler A, Boeckler L, Eppendorf K, Schaller HG, Gernhardt CR. A prospective, randomized clinical trial of a two-step self-etching vs two-step etch-and-rinse adhesive and SEM margin analysis: four-year results. J Adhes Dent 2012;14:585-592

24 Bolaños-Carmona V, González-López S, Briones-Luján T, De Haro-Muñoz C, de la Macorra JC. Effects of etching time of primary dentin on interface morphology and microtensile bond strength. Dent Mater 2006;22:1121-1129.

25 Bouillaguet S, Gysi P, Wataha JC, Ciucchi B, Cattani M, Godin C, Meyer JM. Bond strength of composite to dentin using conventional, one-step, and self-etching adhesive systems. J Dent 2001;29:55-61.

26 Bowen RL. Adhesive bonding of various materials to hard tooth tissues. VI. Forces developing in direct-filling materials during hardening. J Am Dent Assoc 1967;74:439-445.

27 Bowen RL, Rapson JE, Dickson G. Hardening shrinkage and hygroscopic expansion of composite resins. J Dent Res 1982;61:654-658.

28 Boyde A. Enamel structure and cavity margins. Oper Dent 1976;1:13-28.

29 Brännström M. The cause of postrestorative sensitivity and its prevention. J Endod 1986;12:475-481.

30 Brännström M, Nordenvall KJ. Bacterial penetration, pulpal reaction and the inner surface of Concise enamel bond. Composite fillings in etched and unetched cavities. J Dent Res 1978;57:3-10.

31 Brännström M, Nyborg H. The presence of bacteria in cavities filled with silicate cement and composite resin materials. Sven Tandlak Tidskr 1971;64:149-155.

32 Brostow W. Einstieg in die moderne Werkstoffwissenschaft. Hanser München 1984.

33 Browning WD, Dennison JB. A survey of failure modes in composite resin restorations. Oper Dent 1996;21:160-166.

34 Bullard RH, Leinfelder KF, Russell CM. Effect of coefficient of thermal expansion on microleakage. J Am Dent Assoc 1988;116:871-874.

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

36 Buonocore MG. Retrospections on bonding. Dent Clin North Am 1981;25:241-255.

37 Chappell RP, Spencer P, Eick JD. The effects of current dentinal adhesives on the dentinal surface. Quintessence Int 1994;25:851-859.

38 Chiba M, Itoh K, Wakumoto S. Effect of dentin cleansers on the bonding efficacy of dentin adhesive. Dent Mater J 1989;8:76-85.

39 Ciucchi B, Bouillaguet S, Holz J, Roh S. The Battle of the Bonds 1995. Schweiz Monatsschr Zahnmed 1997;107:32-39

40 Cox CF. Evaluation and treatment of bacterial microleakage. Am J Dent 1994;7:293-295.

41 Crawford PJ, Whittaker DK, Owen GM. The influence of enamel prism orientation on leakage of resin-bonded restorations. J Oral Rehabil 1987;14:283-289.

42 Crim GA, Shay JS. Effect of etchant time on microleakage. ASDC J Dent Child 1987;54:339-340.

43 Davidson CL, De Gee AJ. Relaxation of polymerization contraction stresses by flow in dental composites. J Dent Res 1984;63:146-148.

44 Dennison JB, Craig RG. Characterization of enamel surfaces prepared with commercial and experimental etchants. J Am Dent Assoc 1978;97:799-805.

45 Dermann K, Gorschboth L, Viohl J. Wärmeausdehnung in Wasser gelagerter Füllungskunststoffe. Dtsch Zahnärztl Z 1979;34:684-686.

46 Diedrich P. The bracket-adhesive technic. Basis, clinical experiences and problems. Zahnärztl Mitt 1979;69:1404-1410.

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

48 Donly KJ. Composite resin inlays: a single appointment technique. Am J Dent 1990;3:181-184.

49 Driessens FC. Chemical adhesion in dentistry. Int Dent J 1977;27:317-323.

50 Dunn JR. Ein Adhäsivsystem der siebten Generation. ZMK 2004;6:422-426

51 Eakle WS. Effect of thermal cycling on fracture strength and microleakage in teeth restored with a bonded composite resin. Dent Mater 1986;2:114-117.

52 Eick JD, Cobb CM, Chappell RP, Spencer P, Robinson SJ. The dentinal surface: its influence on dentinal adhesion. Part I. Quintessence Int 1991;22:967-977.

53 Erickson RL. Surface interactions of dentin adhesive materials. Oper Dent 1992;17:81-94.

54 Eriksen HM, Buonocore MG. Marginal leakage with different composite restorative materials: effect of restorative techniques. J Am Dent Assoc 1976;93:1143-1148.

55 Ernst CP, Willershausen B. Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärtzlicher Füllungskomposite. Zahnärztl Mitt 2003;7:30-40.

56 Ernst CP, Streicher S, Willershausen B. Marginal adaptation of self-etching adhesives in Class II cavities. Adhes Dent 2002;4:223-231.

57 Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. J Dent Res 1987;66:1636-1639.

58 Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Curing contraction of composites and glass-ionomer cements. J Prosthet Dent 1988;59:297-300.

59 Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Relaxation of polymerization contraction shear stress by hygroscopic expansion. J Dent Res 1990a;69:36-39.

60 Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Quantitative determination of stress reduction by flow in composite restorations. Dent Mater 1990b;6:167-171.

61 Feller RP, Ricks CL, Matthews TG, Santucci EA. Three-year clinical evaluation of composite formulations for posterior teeth. J Prosthet Dent 1987;57:544-550.

62 Finger WJ. Dentin bonding agents. Relevance of in vitro investigations. Am J Dent 1988;9:184-188.

63 Fortin D, Vargas MA. The spectrum of composites: new techniques and materials. J Am Dent Assoc 2000;131:26-30.

64 Frankenberger R, Schmelz und Dentinbonding State of the Art. Ästhet. Zahnmedizin 2000;5:286-294

65 Frankenberger R, Adhäsivtechnik 2008 oder: “The cost of saving time”. Ästhet. Zahnmedizin 2008;11:24

66 Frankenberger R, Kern M. Dentin adhesives create a positive bond to dental hard tissue. Int J Comput Dent 2003;6:187-192.

67 Frankenberger R, Sindel J, Krämer N. Beeinflussen Dentinadhäsive und ihre Applikation die Schmelzhaftung? Dtsch Zahnärztl Z 1997;52:202-205.

68 Frankenberger R, Krämer N, Petschelt A. Technique sensitivity of dentin bonding: effect of application mistakes on bond strength and marginal adaptation. Oper Dent 2000;25:324-330.

69 Friedl KH, Schmalz G, Hiller KA, Märkl A. Marginal adaption of Class V restorations with and without "softstart-polymerization". Oper Dent 2000;25:26-32.

70 Gängler P, Hoyer I, Kosa W, Metzler E, Schuder S. Degeneration and regeneration of the endodontium and periodontium as a replica of the pattern of phylogenetic tooth development. Zahn Mund Kieferheilkd Zentralbl 1988;76:4-13.

71 Geurtsen W, Schmahl V, Hilgers R. Studies of the bond of two different types of composites to etched enamel. Dtsch Zahnärztl Z 1990;45:299-302.

72 Gilpatrick RO, Ross JA, Simonsen RJ. Resin-to-enamel bond strengths with various etching times. Quintessence Int 1991;22:47-49.

73 Glasspoole EA, Erickson RL. Effect of acid etching and rinsing times on composite to enamel bond strength. J Dent Res 1986;65:285.

74 Going RE. Microleakage around dental restorations: a summarizing review. J Am Dent Assoc 1972 Jun;84:1349-1357.

75 Goodie HE, Marshall GW Jr, White JM, Gee L, Hornberger B, Marshall SJ. Storage effects on dentin permeability and shear bond strengths. Dent Mater 1993;9:79-84.

76 Gottlieb EW, Retief DH, Jamison HC. An optimal concentration of phosphoric acid as an etching agent. Part I: Tensile bond strength studies. J Prosthet Dent 1982;48:48-51.

77 Guba CJ, Cochran MA, Swartz ML. The effects of varied etching time and etching solution viscosity on bond strength and enamel morphology. Oper Dent 1994;19:146-153.

78 Gwinnett AJ. Structural changes in enamel and dentin of fractured anterior teeth after acid conditioning in vitro. J Am Dent Assoc 1973;86:117-122.

79 Gwinnett AJ. Moist versus dry dentin: its effect on shear bond strength. Am J Dent 1992;5:127-129.

80 Gwinnett AJ. Dentin bond strength after air drying and rewetting. Am J Dent 1994;7:144-148.

81 Gwinnett AJ, Yu S. Effect of long-term water storage on dentin bonding. Am J Dent 1995;8:109-111.

82 Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GW Jr, Balooch M. Mechanical properties of human dental enamel on the nanometre scale. Arch Oral Biol 2001;46:173-183.

83 Haller B. Aktueller Stand der Komposit-Dentinhaftung. Zahnärztl Mitt 1992;82:86-97.

84 Haller B. Mechanismus und Wirksamkeit von Dentinhaftvermittlern. Dtsch Zahnärztl Z 1994;49:750-759.

85 Haller B, Blunck U. Übersicht und Wertung der aktuellen Bondingsysteme. Zahnärztl Mitt 2003; 93:808-818.

86 Haller B, Günther J. Randqualität von Klasse-II-Kompomerfüllungen. Dtsch Zahnärztl Z 1998;53:330-336.

87 Haller B, Trojanski A. Effect of multi-step dentin bonding systems and resin-modified glass ionomer cement liner on marginal quality of dentin-bonded resin composite Class II restorations. Clin Oral Investig 1998;2:130-136.

88 Haller B, Windsheimer U, Hofmann N, Klaiber, B. Selektive Schmelzätzung oder Total Etching? Dtsch Zahnärztl Z 1995;50:824-827.

89 Hansen EK. Visible lightcured composite resins: polymerization contraction, contraction pattern and hygroscopic expansion. Scand J Dent Res 1982;90:329-335.

90 Hansen EK, Asmussen E. Marginal adaptation of posterior resins: effect of dentin-bonding agent and hygroscopic expansion. Dent Mater 1989;5:122-126.

91 Hegdahl T, Gjerdet NR. Contraction stresses of composite resin filling materials. Acta Odontol Scand 1977;35:191-195.

92 Hein CM, Noack MJ, Roulet JF. Opacity of composites and hard tooth substance on X-ray. Dtsch Zahnärztl Z 1989;44:536-539.

93 Heintze SD, Blunck U, Göhring TN, Rousson V. Marginal adaption in vitro and clinical outcome of Class V restorations. Dent Mater 2009;25:605-620.

94 Hormati AA, Fuller JL, Denehy GE. Effects of contamination and mechanical disturbance on the quality of acid-etched enamel. J Am Dent Assoc 1980;100:34-38.

95 Ichiki K, Fukushima T, Yoshida Y, Horibe T. Correlation between air-drying duration and bond strength of composite resins to teeth. J Prosthet Dent 1990;63:525-529.

96 Iwami Y, Yamamoto H, Ebisu S. A new electrical method for detecting marginalleakage of in vitro resin restorations. J Dent 2000; 28:241-247.

97 Iwami Y, Hayashi M, Takeshinge F, Ebisu S. The accuracy of electrical method for microleakage evaluation by a three-dimensional analysis. J Dent 2007;35:268-74.

98 Janda R. Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe (I). Quintessenz 1988a;39:1067-1073.

99 Janda R. Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe (II). Quintessenz 1988b;39:1243-1253.

100 Janda R. Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfüllungskunststoffe (III). Quintessenz 1988c;39:1393-1398.

101 Jendresen MD, Glantz PO. Clinical adhesiveness of selected dental materials. An in-vivo study. Acta Odontol Scand 1981;39:39-45.

102 Jørgensen KD, Ono T. Gingival enamel thickness vs. bevel preparation. Tandlaegebladet 1984;88:297-300.

103 Juloski J, Goracci C, Rengo C, Giovannetti A, Vichi A, Vulicevic ZR, Ferrari M. Enamel and dentin bond strength of new simplified adhesive materials with and without preliminary phosphoric acid-etching. Am J Dent 2012;25:239-243.

104 Kanca J 3rd. Effect of resin primer solvents and surface wetness on resin composite bond strength to dentin. J Esthet Dent 1992;5:213-215.

105 Kanca J 3rd, Gwinnett AJ. Successful marginal adaption of dentin-enamel bonding system in vitro and in vivo. J Esthet Dent 1994;6:286-294.

106 Kemp-Scholte CM, Davidson CL. Complete marginal seal of Class V resin composite restorations effected by increased flexibility. J Dent Res 1990;69:1240-1243.

107 Kimmes NS, Barkmeier WW, Erickson RL, Latta MA. Adhesive bond strengths to enamel and dentin using recommended and extended treatment times. Oper Dent 2010;35:112-119.

108 Kodaka T, Kuroiwa M, Higashi S. Structural and distribution patterns of surface 'prismless' enamel in human permanent teeth. Caries Res 1991;25:7-20.

109 Krejci I, Lutz F, Loher CE. Quantitative in vivo evaluation of four restorative concepts for mixed Class V restorations. Quintessence Int 1991;22:455-465.

110 Kullmann W, Pötters G. Vergleichende Untersuchungen zum thermischen Expansionskoeffizienten an 50 verschiedenen Kunststofffüllungsmaterialien. Dtsch Zahnärztl Z 1984;39:96-100.

111 Kunzelmann K-H, Hickel R. Clinical aspects of adhesive bonding technique with composite materials. Adhesive Technology, ISBN 3-00-008488-6, 3M-Espe (2001).

112 Lee HL Jr. Adhesion between living tissue and plastics. I. Adhesion of epoxy and polyurethane resins to dentin and enamel. J Biomed Mater Res 1969;3:349-367.

113 Legler LR, Retief DH, Bradley EL. Effects of phosphoric acid concentration and etch duration on enamel depth of etch: an in vitro study. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1990;98:154-160.

114 Lösche GM. Marginal adaptation of Class II composite fillings: guided polymerization vs reduced light intensity. J Adhes Dent 1999;1:31-9.

115 Lüscher B, Lutz F, Ochsenbein H, Mühleman HR. Microleakage and marginal adaptation of composite resin restorations. J Prosthet Dent 1978;39:409-413.

116 Lutz F. The adhesive restoration. A way to invisible fillings. Zahnärztl Prax 1975;26:51-5.

117 Lutz F, Phillips RW. A Classification and evaluation of composite resin systems. J Prosthet Dent 1983;50:480-488.

118 Lutz F, Lüscher B, Ochsenbein H. Adaptation and marginal fit of thixotropic composites and syringe system composites. In vitro findings. SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd 1977;87:684-693.

119 Lutz F, Setcos JC, Phillips RW. New finishing instruments for composite resins. J Am Dent Assoc 1983a;107:575-580.

120 Lutz F, Phillips RW, Roulet JF, Imfeld T. Composites-classification and assessment. SSO Schweiz Monatsschr Zahnheilkd 1983b;93:914-929.

121 Lutz F, Cochran MA, Mörmann W. Adhäsive Restauration - Flop oder Hit? Schweiz Monatsschr Zahnmed 1984;94:1124-1131.

122 Marshall GW Jr. Dentin: microstructure and characterization. Quintessence Int 1993;24:606-617.

123 Marshall GW Jr, Marshall SJ, Kinney JH, Balooch M. The dentin substrate: structure and properties related to bonding. J Dent 1997;25:441-458.

124 Meurman JH. Detrimental effect of in vitro salivary contamination of acid-etched enamel. Proc Finn Dent Soc 1976;72:30-32.

125 Mitchem JC, Granum ED. Fracture of enamel walls by composite resin restorations following acid etching. Oper Dent 1976;1:130-136.

126 Mixson JM, Eick JD, Tira DE, Moore DL. The effects of variable wash times and techniques on enamel-composite resin bond strength. Quintessence Int 1988;19:279-285.

127 Mixson JM, Richards ND, Mitchell RJ. Effects of dentin age and bonding on microgap formation. Am J Dent 1993;6:72-76.

128 Momoi Y, McCabe JF. Hygroscopic expansion of resin based composites during 6 months of water storage. Br Dent J 1994;176:91-96.

129 Momoi Y, Iwase H, Nakano Y, Kohno A, Asanuma A, Yanagisawa K. Gradual increases in marginal leakage of resin composite restorations with thermal stress. J Dent Res 1990;69:1659-1663.

130 Munechika T, Suzuki K, Nishiyama M, Ohashi M, Horie K. A comparison of the tensile bond strengths of composite resins to longitudinal and transverse sections of enamel prisms in human teeth. J Dent Res 1984;63:1079-1082.

131 Nakabayashi N. Dentinal bonding mechanisms. Quintessence Int 1991;22:73-74.

132 Nakabayashi N, Hiranuma K. Effect of etchant variation on wet and dry dentin bonding primed with 4-META/acetone. Dent Mater 2000;16:274-279.

133 Nakabayashi N, Nakamura M, Yasuda N. Hybrid layer as a dentin-bonding mechanism. J Esthet Dent 1991;3:133-138.

134 Noack MJ. Quantitative Füllungsrandanalyse von Frontzahnkompositen im Rasterelektronenmikroskop nach thermischer Wechselbelastung. Dtsch Zahnärztl Z 1988;43:295-299.

135 Noack MJ, Roulet JF. Scanning electron microscope evaluation of the etching effect of various gel-type acid etchants on enamel. Dtsch Zahnärztl Z 1987;42:953-959.

136 Nordenvall KJ, Brännström M, Malmgren O. Etching of deciduous teeth and young and old permanent teeth. A comparison between 15 and 60 seconds of etching. Am J Orthod 1980;78:99-108.

137 Olsen ME, Bishara SE, Damon P, Jakobsen JR. Comparison of shear bond strength and surface structure between conventional acid etching and air-abrasion of human enamel. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1997;112:502-506.

138 Pashley DH. Smear layer: physiological considerations. Oper Dent 1984;3:13-29.

139 Pashley DH, Pashley EL. Dentin permeability and restorative dentistry: a status report for the American Journal of Dentistry. Am J Dent 1991;4:5-9.

140 Pashley DH, Tao L, Boyd L, King GE, Horner JA. Scanning electron microscopy of the substructure of smear layers in human dentine. Arch Oral Biol 1988;33:265-270.

141 Pashley EL, Talman R, Horner JA, Pashley DH. Permeability of normal versus carious dentin. Endod Dent Traumatol 1991;7:207-211.

142 Pashley DH, Ciucchi B, Sano H, Carvalho RM, Russell CM. Bond strength versus dentine structure: a modelling approach. Arch Oral Biol. 1995;40:1109-1118.

143 Perdigão J, Geraldeli S, Carmo AR, Dutra HR. In vivo influence of residual moisture on microtensile bond strengths of one-bottle adhesives. J Esthet Restor Dent. 2002;14:31-38.

144 Peschke A, Blunck U, Roulet JF. Influence of incorrect application of a water-based adhesive system on the marginal adaptation of Class V restorations. Am J Dent 2000;13:239-244.

145 Lambrechts P, Van Meerbeek B, Perdigao J, De Munck J, Vanherle G. Mögliche Fehler bei der klinischen Anwendung von Adhäsiven. Die Adhäsivtechnologie 3M Espe 2001; 29-45.

146 Peumans M, Kanumilli P, De Munck J, Van Landuyt K, Lambrechts P, Van Meerbeek B. Clinical effectiveness of contemporary adhesives: a systematic review of current clinical trials. Dent Mater 2005;21:864-881.

147 Peumans M, De Munck J, Van Landuyt KL, Poitevin A, Lambrechts P, Van Meerbeek B. A 13-year clinical evaluation of two three-step etch-and-rinse adhesives in non-carious class-V lesions. Clin Oral Investig 2012;16:129-37.

148 Phillips RW. Era of new biomaterials in esthetic dentistry. J Am Dent Assoc 1987;Spec No:7E-12E.

149 Pieper K, Mausberg R, Curdt R, Uhde V. Clinical evaluation of the quality of amalgam and polymer filling materials after various periods of function. A study of servicemen of the German armed forces. Dtsch Zahnärztl Z 1989;44:707-710.

150 Pioch T, Stotz S, Staehle HJ, Duschner H. Applications of confocal laser scanning microscopy to dental bonding. Adv Dent Res 1997;11:453-461.

151 Qvist V, Qvist J, Mjor IA. Placement and longevity of tooth-colored restorations in Denmark. Acta Odontol Scand 1990;48:305-311.

152 Raskin A, D'Hoore W, Gonthier S, Degrange M, Déjou J. Reliability of in vitro microleakage tests: a literature review. J Adhes Dent 2001;3:295-308.

153 Ravishanker P, Chaitanya K. In vitro evaluation of the effect of deproteinization on the marginal leakage of resin restorations using three bonding agents. J Dent Res 2012;9:452-459.

154 Retief DH. Effect of conditioning the enamel surface with phosphoric acid. J Dent Res 1973;52:333-341.

155 Retief DH, Denys FR. Adhesion to enamel and dentin. Am J Dent 1989;2:133-144.

156 Retief DH, Austin JC, Fatti LP. Pulpal response to phosphoric acid. J Oral Pathol 1974;3:114-122.

157 Retief DH, Woods E, Jamison HC. Effect of cavosurface treatment on marginal leakage in class V composite resin restorations. J Prosthet Dent 1982;47:496-501.

158 Ripa LW. The histology of the early carious lesion in primary teeth with special reference to a "prismless" outer layer of primary enamel. J Dent Res 1966;45:5-11.

159 Robinson C, Briggs HD, Atkinson PJ, Weatherell JA. Chemical changes during formation and maturation of human deciduous enamel. Arch Oral Biol 1981;26:1027-1033.

160 Roulet JF. The cervical restoration. Introductory review. Dtsch Zahnärztl Z 1986;41:730-734.

161 Roulet JF. A materials scientist's view: assessment of wear and marginal integrity. Quintessence Int 1987a;18:543-552.

162 Roulet JF. Degradation of dental polymers. Karger Verlag Basel 1987b.

163 Roulet JF. Material parameters and their effects on clinical use. Dtsch Zahnärztl Z 1988;43:887-892.

164 Roulet JF. Marginal integrity: clinical significance. J Dent 1994;22:9-12.

165 Rueggeberg FA. Substrate for adhesion testing to tooth structure - review of the literature. Dent Mater 1991;7:2-10.

166 Ruyter IE. Composites - characterization of composite filling materials: reactor response. Adv Dent Res 1988;2:122-129.

167 Sano H, Takatsu T, Ciucchi B, Herner JA, Mattews WG, Pashley DH. Nanoleakage: Leakage within the hybrid layer. Oper Dent 1995;20:18-25.

168 Sasafuchi Y, Otsuki M, Inokoshi S, Tagami J. The effects on pulp tissue of microleakage in resin composite restorations. J Med Dent Sci 1999;46:155-164.

169 Seichter U. SEM study of the cervical margins in composite restorations using bonding agents. Dtsch Zahnärztl Z 1986;41:739-742.

170 Schneider PM, Messer LB, Douglas WH. The effect of enamel surface reduction in vitro on the bonding of composite resin to permanent human enamel. J Dent Res 1981;60:895-900.

171 Schroeder A. Purposeful enamel etching. Method of determining an optimal filling margin. ZWR 1988;97:844-852.

172 Silverstone LM. Fissure sealants. Laboratory studies. Caries Res 1974;8:2-26.

173 Silverstone LM, Saxton CA, Dogon IL, Fejerskov O. Variation in the pattern of acid etching of human dental enamel examined by scanning electron microscopy. Caries Res 1975;9:373-387.

174 Silverstone LM, Hicks MJ, Featherstone MJ. Oral fluid contamination of etched enamel surfaces: an SEM study. J Am Dent Assoc 1985;110:329-332.

175 Sockwell C. Clinical evaluation of anterior restorative materials. Dent Clin North Am 1976;20:403-422.

176 Söderholm KJ. Hydrolytic degradation of composites. I. Physical-chemical basics. Phillip J Restaur Zahnmed 1988;5:323-328.

177 Söderholm KJ. Does resin based dentine bonding work? Int Dent J 1995;45:371-381.

178 Soh G, Henderson LJ, Chantler P. Glutaraldehyde-methacrylate dentine adhesive: the relationship between cavity site and marginal contraction gaps. Singapore Dent J 1988;13:1-3.

179 Staninec M, Mochizuki A, Tanizaki K, Fukuda K, Yasuhiko T. Interfacial space, marginal leakage, and enamel cracks around composite resins. Oper Dent 1986;11:14-24.

180 Stanley HR, Going RE, Chauncey HH. Human pulp response to acid pretreatment of dentin and to composite restoration. J Am Dent Assoc 1975;91:817-825.

181 Stettmaier K, Kinder J, Vahl J, Reinhardt KJ. Thermic behavior of dental enamel, dentin and selected dental materials. Dtsch Zahnärztl Z 1978;33:474-476.

182 Swanson TK, Feigal RJ, Tantbirojn D, Hodges JS. Effect of adhesive systems and bevel on enamel margin integrity in primary and permanent teeth. Pediatr Dent 2008;30:134-140.

183 Swift EJ, Perdigão J, Heymann HO. Bonding to enamel and dentin: a brief history and state of the art 1995. Quintessence Int 1995;26:95-110.

184 Tagami J, Hosoda H, Fusayama T. Optimal technique of etching enamel. Oper Dent 1988;13:181-184.

185 Tam LE, Pilliar RM. Fracture surface characterization of dentin-bonded interfacial fracture toughness specimens. J Dent Res 1994;73:607-619.

186 Tay FR, Gwinnett AJ, Wei SH. Ultrastructure of the resin-dentin interface following reversible and irreversible rewetting. Am J Dent 1997;10:77-82.

187 Taylor MJ, Lynch E. Mircoleakage. J Dent 1992;20:3-10.

188 Thomson JL, Main C, Gillespie FC, Stephen KW. The effect of salivary contamination on fissure sealant-enamel bond strength. J Oral Rehabil 1981;8:11-18.

189 Titley K, Chernecky R, Maric B, Valiquette N, Smith D. The morphology of the demineralized layer in primed dentin. Am J Dent 1994;7:22-26.

190 Tjan AH, Chan CA. The polishability of posterior composites. J Prosthet Dent 1989;61:138-146.

191 Toledano M, Osorio R, Moreira MA, Cabrerizo-Vilchez MA, Gea P, Tay FR, Pashley DH. Effect of the hydration status of the smear layer on the wettability and bond strength of a self-etching primer to dentin.
Am J Dent. 2004;17:310-314.

192 Torney DL. The retentive ability of acid-etched dentin. J Prosthet Dent 1978;39:169-172.

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

194 Triolo PT, Swift EJ, Mudgil A, Levine A. Effects of etching time on enamel bond strengths. Am J Dent 1993;6:302-304.

195 Tyas MJ. Adhesive dental restorative materials and systems. Ann R Australas Coll Dent Surg 1989a;10:101-107.

196 Tyas MJ. Clinical evaluation of three dentine bonding agents. Aust Dent J 1989b;34:559-562.

197 Uno S, Finger WJ. Effects of acidic conditioners on dentine demineralization and dimension of hybrid layers. J Dent 1996;24:211-216.

198 Van Meerbeek B. Kunststoff-Dentin-Grenzflächen nach Total-Etch/ Total Bonding. Phillip J 1997;14:313-315.

199 Van Meerbeek B, Inokoshi S, Braem M, Lambrechts P, Vanherle G. Morphological aspects of the resin-dentin interdiffusion zone with different dentin adhesive systems. J Dent Res 1992a;71:1530-1540.

200 Van Meerbeek B, Lambrechts P, Inokoshi S, Braem M, Vanherle G. Factors affecting adhesion to mineralized tissues. Oper Dent 1992b;17:1111-1124.

201 Van Meerbeek B, Dhem A, Goret-Nicaise M, Braem M, Lambrechts P, VanHerle G. Comparative SEM and TEM examination of the ultrastructure of the resin-dentin interdiffusion zone. J Dent Res 1993;72:495-501.

202 Van Meerbeek B, Yoshida Y, Lambrechts P, Vanherle G, Duke ES, Eick JD, Robinson SJ. A TEM study of two water-based adhesive systems bonded to dry and wet dentin. J Dent Res 1998;77:50-9.

203 Van Meerbeek B, Vargas M, Inoue S, Yoshida Y, Peumans M, Lambrechts P, Vanherle G. Adhesives and cements to promote preservation dentistry. Oper Dent 2001;26:119–144.

204 Versluis A, Douglas WH, Cross M, Sakaguchi RL. Does an incremental filling technique reduce polymerization shrinkage stresses? J Dent Res 1996;75:8.

205 Versluis A, Tantbirojn D, Douglas WH. Do dental composites always shrink toward the light? J Dent Res 1998;77:1435-45.

206 Wang WN, Lu TC. Bond strength with various etching times on young permanent teeth. Am J Orthod Dentofacial Orthop 1991;100:72-79.

207 Wang Y, Spencer P. Effect of acid etching time and technique on interfacial characteristics of the adhesive-dentin bond using differential staining. Eur J Oral Sci 2004;112:293-299.

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

209 Wendt SL, McInnes PM, Dickinson GL. The effect of thermocycling in microleakage analysis. Dent Mater 1992;8:181-184.

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

211 Winkler MM, Katona TR, Paydar NH. Finite element stress analysis of three filling techniques for class V light-cured composite restorations. J Dent Res 1996;75:1477-1483.

212 Yoshida Y, Van Meerbeek B, Nakayama Y, Snauwaert J, Hellemans L, Lambrechts P, Vanherle G, Wakasa K. Evidence of chemical bonding at biomaterial-hard tissue interfaces. J Dent Res 2000;79:709-714.

11 Anhang

11.1 Ergebnisse der statistischen Auswertung

11.1.1 Deskriptive Statistik

Tabelle 11.1: OptiBond FL mit 30 s Einwirkzeit des Primers im Dentin

Einwirkzeit der Phosphorsäure	Temperatur-wechselbad (TWB)		Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Spalt
15s	vor TWB	Median	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	99,5	0,5	0,0	0,0	0,0
		Standardabweichung	1,2	1,2	0,0	0,0	0,0
	nach TWB	Median	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	98,3	1,7	0,0	0,0	0,0
		Standardabweichung	2,4	2,4	0,0	0,0	0,0
30s	vor TWB	Median	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	97,8	1,6	0,5	0,0	0,5
		Standardabweichung	4,3	2,8	1,5	0,0	1,5
	nach TWB	Median	97,3	2,7	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	95,5	3,9	0,6	0,0	0,6
		Standardabweichung	5,4	4,2	1,7	0,0	1,7
60s	vor TWB	Median	91,6	6,6	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	93,3	5,8	0,8	0,0	0,8
		Standardabweichung	6,0	5,6	1,6	0,0	1,6
	nach TWB	Median	87,8	7,7	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	89,8	9,0	1,1	0,0	1,1
		Standardabweichung	9,0	8,9	2,1	0,0	2,1

Tabelle 11.2: OptiBond FL mit 60 s Einwirkzeit des Primers im Dentin

Einwirkzeit der Phosphorsäure	Temperatur-wechselbad (TWB)		Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Spalt
15s	vor TWB	Median	98,7	0,9	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	98,0	1,9	0,1	0,0	0,1
		Standardabweichung	2,5	2,5	0,3	0,0	0,3
	nach TWB	Median	98,5	1,3	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	97,6	1,7	0,1	0,0	0,1
		Standardabweichung	3,2	1,8	0,4	0,1	0,4
30s	vor TWB	Median	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	99,5	0,1	0,0	0,3	0,3
		Standardabweichung	0,9	0,4	0,0	0,9	0,9
	nach TWB	Median	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	98,5	1,1	0,0	0,5	0,5
		Standardabweichung	2,1	2,0	0,0	1,3	1,3
60s	vor TWB	Median	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	98,5	1,5	0,0	0,0	0,0
		Standardabweichung	2,2	2,2	0,0	0,0	0,0
	nach TWB	Median	99,2	0,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	97,3	2,5	0,0	0,2	0,2
		Standardabweichung	3,5	3,6	0,0	0,6	0,6

Tabelle 11.3: Prime&Bond NT mit 30 s Einwirkzeit des Primers im Dentin

Einwirkzeit der Phosphorsäure	Temperatur-wechselbad (TWB)		Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Spalt
15s	vor TWB	Median	93,1	3,2	0,0	0,0	0,5
		Mittelwert	93,4	4,5	1,9	0,1	2,1
		Standardabweichung	5,0	5,0	3,0	0,4	2,9
	nach TWB	Median	83,5	6,9	0,0	0,0	0,8
		Mittelwert	87,1	7,0	5,7	0,2	5,9
		Standardabweichung	9,0	7,0	8,2	0,5	8,0
30s	vor TWB	Median	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	94,0	4,1	1,4	0,5	1,9
		Standardabweichung	11,2	6,3	4,0	1,5	5,5
	nach TWB	Median	81,9	15,0	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	80,6	14,8	3,9	0,7	4,6
		Standardabweichung	14,4	9,5	7,6	1,9	9,3
60s	vor TWB	Median	92,7	7,3	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	90,8	6,9	0,2	2,1	2,3
		Standardabweichung	9,9	6,0	0,5	5,9	6,5
	nach TWB	Median	79,3	20,6	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	77,6	19,8	0,0	2,5	2,5
		Standardabweichung	13,8	11,3	0,0	7,2	7,2

Tabelle 11.4: Prime&Bond NT mit 60 s Einwirkzeit des Primers im Dentin

Einwirkzeit der Phosphorsäure	Temperatur-wechselbad (TWB)		Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Spalt
15s	vor TWB	Median	94,7	5,3	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	94,0	5,2	0,7	0,0	0,7
		Standardabweichung	6,5	5,1	2,0	0,0	2,0
	nach TWB	Median	93,1	6,9	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	90,8	8,2	1,0	0,0	1,0
		Standardabweichung	10,5	8,5	2,8	0,0	2,8
30s	vor TWB	Median	93,5	5,8	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	92,7	6,5	0,0	0,9	0,9
		Standardabweichung	9,3	7,5	0,0	2,0	2,0
	nach TWB	Median	92,9	6,3	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	90,3	8,7	0,0	1,1	1,1
		Standardabweichung	11,7	10,1	0,0	2,3	2,3
60s	vor TWB	Median	90,1	9,1	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	89,6	9,2	1,2	0,0	1,2
		Standardabweichung	9,9	9,4	3,5	0,0	3,5
	nach TWB	Median	88,4	9,7	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	87,8	10,6	1,6	0,0	1,6
		Standardabweichung	11,6	10,9	4,6	0,0	4,6

Tabelle 11.5: Excite mit 30 s Einwirkzeit des Primers im Dentin

Einwirkzeit der Phosphorsäure	Temperatur-wechselbad (TWB)		Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Spalt
15s	vor TWB	Median	78,4	18,5	2,7	0,0	3,1
		Mittelwert	80,1	14,9	3,5	1,5	4,9
		Standardabweichung	8,2	6,7	4,9	4,2	5,4
	nach TWB	Median	63,6	21,6	5,1	0,0	8,4
		Mittelwert	67,9	22,4	7,5	2,2	9,7
		Standardabweichung	14,0	12,0	9,1	6,2	9,1
30s	vor TWB	Median	79,5	8,5	1,0	0,0	7,7
		Mittelwert	73,5	17,6	3,7	5,2	8,9
		Standardabweichung	16,6	15,3	5,2	8,8	7,8
	nach TWB	Median	66,6	14,9	1,2	0,0	8,7
		Mittelwert	66,1	22,2	5,6	6,2	11,7
		Standardabweichung	15,6	13,8	8,9	10,2	10,3
60s	vor TWB	Median	71,5	9,5	3,3	1,6	4,9
		Mittelwert	74,8	15,2	4,9	5,0	10,0
		Standardabweichung	20,3	14,0	5,7	7,1	12,4
	nach TWB	Median	68,3	12,0	3,8	2,2	6,0
		Mittelwert	65,7	19,0	9,6	5,8	15,3
		Standardabweichung	23,3	12,6	11,7	7,8	19,1

Tabelle 11.6: Excite mit 60 s Einwirkzeit des Primers im Dentin

Einwirkzeit der Phosphorsäure	Temperatur-wechselbad (TWB)		Note 1	Note 2	Note 3	Note 4	Spalt
15s	vor TWB	Median	92,7	4,3	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	91,0	7,3	1,0	0,8	1,7
		Standardabweichung	9,0	8,2	2,8	2,1	3,2
	nach TWB	Median	88,5	7,6	0,0	0,0	0,0
		Mittelwert	87,8	10,1	1,1	1,0	2,1
		Standardabweichung	11,9	11,3	3,2	2,8	3,9
30s	vor TWB	Median	88,2	3,1	0,0	0,0	2,5
		Mittelwert	85,8	4,7	2,1	7,3	9,4
		Standardabweichung	16,8	5,9	3,5	15,3	16,0
	nach TWB	Median	77,7	8,1	0,0	2,9	2,9
		Mittelwert	82,9	8,8	3,3	5,0	8,3
		Standardabweichung	12,9	7,4	4,7	5,7	10,0
60s	vor TWB	Median	84,7	5,1	0,0	0,0	2,6
		Mittelwert	85,4	7,7	1,2	5,7	6,9
		Standardabweichung	12,3	6,7	2,2	8,3	9,1
	nach TWB	Median	76,4	12,5	0,0	2,8	7,0
		Mittelwert	78,8	11,1	2,5	7,6	10,0
		Standardabweichung	10,9	7,5	3,5	9,3	9,4

11.1.2 Nonparametrische Varianzanalyse, Kruskal-Wallis-Test

Tabelle 11.7: Kruskal-Wallis-Test Materialvergleich im Bereich Dentin vor der TWB

Dentin vor TWB						
Gruppen	Ätzzeit	Primerzeit	Chi-Quadrat	df	Asymptotische Signifikanz	Randqualität
1, 7,13	15s	30s	16,020	2	0,000	Note 1
2, 8,14	30s		12,778	2	0,002	
3, 9,15	60s		3,385	2	0,184	
4,10,16	15s	60s	2,840	2	0,242	
5,11,17	30s		8,055	2	0,018	
6,12,18	60s		6,494	2	0,039	

Tabelle 11.8: Kruskal-Wallis-Test Materialvergleich im Bereich Dentin nach der TWB

Dentin nach TWB						
Gruppen	Ätzzeit	Primerzeit	Chi-Quadrat	df	Asymptotische Signifikanz	Randqualität
1, 7,13	15s	30s	14,959	2	0,001	Note 1
2, 8,14	30s		13,266	2	0,001	
3, 9,15	60s		5,189	2	0,075	
4,10,16	15s	60s	2,612	2	0,271	
5,11,17	30s		5,887	2	0,053	
6,12,18	60s		8,201	2	0,017	

Tabelle 11.9: Kruskal-Wallis-Test über alle 18 Gruppen im Bereich Schmelz nach der TWB

Gruppen	Chi-Quadrat	df	Asymptotische Signifikanz	Randqualität
1 bis 18	8,553	17	0,953	Note 1

Tabelle 11.10: Kruskal-Wallis-Test über alle 18 Gruppen im Bereich Dentin nach der TWB

Gruppen	Chi-Quadrat	df	Asymptotische Signifikanz	Randqualität
1 bis 18	67,450	17	0,000	Note 1

Tabelle 11.11: Kruskal-Wallis-Test über alle 18 Gruppen im Bereich Dentin vor der TWB

Gruppen	Chi-Quadrat	df	Asymptotische Signifikanz	Randqualität
1 bis 18	57,190	17	0,000	Note 1

11.1.3 Bonferroni Nachtestung

Tabelle 11.12: Bonferroni Nachtestung Mehrfachvergleich Dentin vor und nach der TWB

Bonferroni Mehrfachvergleich
Dentin vor und nach TWB

Primerzeit	Ätzzeit	Gruppenvergleich	Beschreibung	TWB	Signifikanz
30s	15s	1 mit 7	OptiBond FL mit Prime & Bond NT	vor TWB	0,124
				nach TWB	0,093
		1 mit 13	OptiBond FL mit Excite	vor TWB	0
				nach TWB	0
		13 mit 7	Excite mit Prime & Bond NT	vor TWB	0
				nach TWB	0,002
	30s	2 mit 8	OptiBond FL mit Prime & Bond NT	vor TWB	1
				nach TWB	0,085
		2 mit 14	OptiBond FL mit Excite	vor TWB	0,001
				nach TWB	0
		14 mit 8	Excite mit Prime & Bond NT	vor TWB	0,007
				nach TWB	0,096
	60s	3 mit 9	OptiBond FL mit Prime & Bond NT	vor TWB	1
				nach TWB	0,46
		3 mit 15	OptiBond FL mit Excite	vor TWB	0,082
				nach TWB	0,024
		15 mit 9	Excite mit Prime & Bond NT	vor TWB	0,082
				nach TWB	0,489
60s	15s	4 mit 10	OptiBond FL mit Prime & Bond NT	vor TWB	0,714
				nach TWB	0,485
		4 mit 16	OptiBond FL mit Excite	vor TWB	0,135
				nach TWB	0,147
		16 mit 10	Excite mit Prime & Bond NT	vor TWB	1
				nach TWB	1
	30s	5 mit 11	OptiBond FL mit Prime & Bond NT	vor TWB	0,684
				nach TWB	0,357
		5 mit 17	OptiBond FL mit Excite	vor TWB	0,066
				nach TWB	0,017
		17 mit 11	Excite mit Prime & Bond NT	vor TWB	0,698
				nach TWB	0,49
	60s	6 mit 12	OptiBond FL mit Prime & Bond NT	vor TWB	0,2
				nach TWB	0,168
		6 mit 18	OptiBond FL mit Excite	vor TWB	0,029
				nach TWB	0,002
		18 mit 12	Excite mit Prime & Bond NT	vor TWB	1
				nach TWB	0,214

11.1.4 Nonparametrische Varianzanalyse, Mann-Whitney-U-Test

Tabelle 11.13: Mann-Whitney-U-Test. Gruppenvergleich Dentin

Adhäsivsystem	Gruppenvergleich	Beschreibung	TWB (Temperatur-wechselbad)	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
OptiBond FL	1 mit 4	Ätzzeit 15 s, Primerzeit 30 s gegen 60 s	vor TWB	0,277
			nach TWB	0,908
	2 mit 5	Ätzzeit 30 s, Primerzeit 30 s gegen 60 s	vor TWB	0,444
			nach TWB	0,328
	3 mit 6	Ätzzeit 60 s, Primerzeit 30 s gegen 60 s	vor TWB	0,082
			nach TWB	0,125
Prime & Bond NT	7 mit 10	Ätzzeit 15 s, Primerzeit 30 s gegen 60 s	vor TWB	0,594
			nach TWB	0,394
	8 mit 11	Ätzzeit 30 s, Primerzeit 30s gegen 60s	vor TWB	0,466
			nach TWB	0,125
	9 mit 12	Ätzzeit 60 s, Primerzeit 30 s gegen 60 s	vor TWB	0,831
			nach TWB	0,206
Excite	13 mit 16	Ätzzeit 15 s, Primerzeit 30 s gegen 60s	vor TWB	0,015
			nach TWB	0,015
	14 mit 17	Ätzzeit 30 s, Primerzeit 30 s gegen 60 s	vor TWB	0,059
			nach TWB	0,027
	15 mit 18	Ätzzeit 60 s, Primerzeit 30 s gegen 60 s	vor TWB	0,318
			nach TWB	0,462

Tabelle 11.14: Dentin Mann-Whitney-U-Test.

Adhäsivsystem	Einwirkzeit des Primers	Gruppenvergleich	TWB (Temperatur-wechselbad)	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
OptiBond FL	30 s	1 mit 2	vor TWB	0,645
			nach TWB	0,328
		1 mit 3	vor TWB	0,083
			nach TWB	0,105
		2 mit 3	vor TWB	0,234
			nach TWB	0,279
	60s	4 mit 5	vor TWB	0,234
			nach TWB	0,798
		4 mit 6	vor TWB	0,878
			nach TWB	0,959
		5 mit 6	vor TWB	0,505
			nach TWB	0,505
Prime & Bond NT	30 s	7 mit 8	vor TWB	0,382
			nach TWB	0,382
		7 mit 9	vor TWB	0,721
			nach TWB	0,195
		8 mit 9	vor TWB	0,328
			nach TWB	0,878
	60s	10 mit 11	vor TWB	0,959
			nach TWB	0,959
		10 mit 12	vor TWB	0,382
			nach TWB	0,645
		11 mit 12	vor TWB	0,574
			nach TWB	0,645
Excite	30 s	13 mit 14	vor TWB	0,721
			nach TWB	0,959
		13 mit 15	vor TWB	0,878
			nach TWB	0,798
		14 mit 15	vor TWB	0,721
			nach TWB	0,878
	60s	16 mit 17	vor TWB	0,574
			nach TWB	0,279
		16 mit 18	vor TWB	0,442
			nach TWB	0,153
		17 mit 18	vor TWB	0,328
			nach TWB	0,505

11.1.5 Wilcoxon-Test

Tabelle 11.15: Vergleich der „Note 1“ vor der TWB vs. „Note1“ nach der TWB Kavitätenrand „Note1“ im Bereich Dentin

Gruppe	Z	Asymptotische Signifikanz (2-seitig)
1	-1,604	0,109
2	-2,023	0,043
3	-2,023	0,043
4	-1,826	0,068
5	-2,201	0,028
6	-1,826	0,068
7	-2,201	0,028
8	-2,366	0,018
9	-2,521	0,012
10	-2,023	0,043
11	-2,023	0,043
12	-2,023	0,043
13	-2,521	0,012
14	-2,521	0,012
15	-2,521	0,012
16	-2,023	0,043
17	-1,183	0,237
18	-1,859	0,063

11.2 Verwendete Geräte und Materialien

1. Scaler M 23 A. Deppler S.A., CH-180 Rolle/Schweiz
2. Präparierdiamant Nr. 880.314-012
   Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, 32631 Lemgo
3. Finierdiamant Nr. 852EF.314-014
   Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, 32631 Lemgo
4. Soflex Pop-On Polierscheiben Art.-Nr. 1981
   3M ESPE Dental Products, St.Paul, MN 55144-1000, USA
5. Heidemann-Spatel De 408;
   Aesculap AG, 78532 Tuttlingen
6. Kugelstopfer De 109 R
   Aesculap AG, 78532 Tuttlingen
7. Lupenbrille EyeMag Smart
   Bajohr OPTECmed, 37574 Einbeck
8. Omnibrush Dental Mikropinsel Artikel Nr. 88963
   OMNIDENT Dental-Handelsgesellschaft mbH, 63110 Rodgau
9. Total Etch 37 %
   Ivoclar Vivadent GmbH, 73479 Ellwangen
10. OptiBond FL Prime, Chargennummer 259225
    KERR GmbH, 76185 Karlsruhe
11. OptiBond FL Adhesive, Chargennummer 252619
    KERR GmbH, 76185 Karlsruhe
12. Prime&Bond NT, Chargennummer 6067240
    Dentsply DeTrey GmbH, 78467 Konstanz
13. Excite, Chargennummer 24074
    Ivoclar Vivadent GmbH, 73479 Ellwangen
14. Filtek™ Z250 - Universal Feinpartikel-Hybrid Composite
    3M ESPE Dental Products, St Paul, MN 55144-1000, USA
15. Ortholux™ Luminous Polymerisationslampe
    3M ESPE Dental Products, St. Paul, MN 55144-1000,USA

16. Rasterelektronenmikroskop Amray 1810
    Amray Inc., 160 Middlesex Turnpike, Bedford, MA 01730-1491, USA
17. Honigum Automix Light
    DMG, 22547 Hamburg
18. Silaplast Futur
    Detax, 76275 Ettlingen
19. Stycast 1266, Part A + B
    Emerson & Cumming, Grace N.V., 2260 Westerlo-Oevel
20. Sputteranlage Sputter-Coater SCD 030
    Blazers union, FL-9496 Blazers
21. Thermocycling-Gerät
    G. Altaner, 14057 Berlin
22. Win-Mess für Windows 3.1, Version 1.03
    Stefan Küppers, Med. Softwarelösungen, 91054 Erlangen
23. SPSS Version 15 für Windows
    SPSS GmbH, 81669 München
24. Schnellläufer Sirona T200 1:5
    Sirona Dental Systems GmbH
    Werner-von-Siemens Straße 4, 64625 Bensheim
25. Polierkelch Pro Cup Soft
    KerrHawe, Localita Strecce, 6934 Bioggio SCHWEIZ
26. Super Polish Polierpaste
    KerrHawe, Localita Strecce, 6934 Bioggio SCHWEIZ
27. Winkelstück blau Sirona C 40 L
    Sirona Dental Systems GmbH
    Werner-von-Siemens Straße 4, 64625 Bensheim

11.3 Eidesstattliche Versicherung

Ich, Sebastian Albrecht, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: > Einfluss der Primereinwirkzeit auf die Randqualität von Klasse-V-Kompositfüllungen in Abhängigkeit von der Konditionierungszeit. Eine In-vitro-Studie < selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.
Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE unter *www.icmje.org*) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.
Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Betreuer, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o.) und werden von mir verantwortet.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§156,161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.

Datum Unterschrift

11.4 Danksagung

Herrn Dr. Uwe Blunck möchte ich für die Überlassung des Dissertationsthemas und für die engagierte Unterstützung danken. Er hat mich bei auftretenden praktischen und theoretischen Problemen unterstützt und seine Begeisterung bei der wissenschaftlichen Arbeit hat mich immer wieder motiviert.

Ein besonderer Dank gilt meiner Betreuerin Frau PD Dr. Kerstin Bitter für Ihre engagierte Betreuung.

Frau Helga Grund danke ich für die freundliche Anleitung und Unterstützung bei der Arbeit im Forschungslabor.

11.5 Lebenslauf

Mein Lebenslauf wird aus datenschutzrechtlichen Gründen in der elektronischen Version meiner Arbeit nicht veröffentlicht.