

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR ZAHNERHALTUNG UND PARODONTOLOGIE
PROF. DR. G. SCHMALZ
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

**EINFLUSS EINES EIN-SCHRITT-ADHÄSIVSYSTEMS AUF DIE MARGINALE
INTEGRITÄT VON KLASSE-V-RESTAURATIONEN MIT DREI UNTERSCHIED-
LICHEN KONVENTIONELLEN KOMPOSITEN**

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Martin Asenkerschbaumer
Neuötting

2012

AUS DEM LEHRSTUHL
FÜR ZAHNERHALTUNG UND PARODONTOLOGIE
PROF. DR. G. SCHMALZ
DER FAKULTÄT FÜR MEDIZIN
DER UNIVERSITÄT REGENSBURG

**EINFLUSS EINES EIN-SCHRITT-ADHÄSIVSYSTEMS AUF DIE MARGINALE
INTEGRITÄT VON KLASSE-V-RESTAURATIONEN MIT DREI UNTERSCHIED-
LICHEN KONVENTIONELLEN KOMPOSITEN**

Inaugural – Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnmedizin

der
Fakultät für Medizin
der Universität Regensburg

vorgelegt von
Martin Asenkerschbaumer
Neuötting

2012

Dekan: Prof. Dr. Dr. Torsten E. Reichert

1. Berichterstatter: Prof. Dr. G. Schmalz

2. Berichterstatter: Prof. Dr. C. Reicheneder

Tag der mündlichen Prüfung: 17. September 2012

1. EINLEITUNG	4
2. LITERATURÜBERSICHT.....	5
2.1 KOMPOSITMATERIALIEN	5
2.1.1 <i>Die Matrix von Dentalkompositen</i>	6
2.1.2 <i>Füllkörper</i>	7
2.1.3 <i>Verbundphase</i>	7
2.1.4 <i>Kompositklassifikationen</i>	8
2.1.4.1 Makrofüllerkomposite	8
2.1.4.2 Mikrofüllerkomposite.....	9
2.1.4.3 Hybridkomposite.....	9
2.1.4.4 Nanokomposite	10
2.2 ADHÄSIVER VERBUND	10
2.2.1 <i>Schmelzhaftung</i>	11
2.2.2 <i>Dentinhaftung</i>	12
2.2.2.1 Etch & Rinse Systeme:.....	14
2.2.2.2 Self-Etch-Adhäsivsysteme.....	15
2.2.2.3 AdheSE One	17
2.3 POLYMERISATION	18
2.3.1 <i>InitiatorSysteme und Reaktionsstart</i>	18
2.3.2 <i>Prägelphase</i>	19
2.3.3 <i>Gelpunkt und Postgelphase</i>	19
2.3.4 <i>Konversionsrate</i>	20
2.4 POLYMERISATIONSSCHRUMPFUNG.....	20
2.5 POLYMERISATIONSSTRESS.....	21
2.6 IN VITRO-TESTVERFAHREN.....	24
2.6.1 <i>Physikalisch-mechanische Tests</i>	24
2.6.2 <i>Simulationstests</i>	25
2.6.3 <i>Quantitative Auswertungsmethoden der marginalen Adaption</i>	25
2.6.3.1 Farbpenetrationstests.....	26
3. FRAGESTELLUNG	28
4. MATERIAL UND METHODE.....	29
4.1 UNTERSUCHUNGSGUT UND VORBEREITUNG	29
4.2 PRÄPARATION	29
4.3 PRÜFGRUPPEN.....	31
4.4 HERSTELLUNG DER KOMPOSITFÜLLUNGEN.....	32
4.5 LAGERUNG ÜBERSCHUSSENTFERNUNG	33

4.6	THERMOMECHANISCHE WECHSELBELASTUNG (TCML)	34
4.7	ABFORMUNG	34
4.8	FARB PENETRATION	35
4.9	FARB PENETRATIONSAUSWERTUNG	36
4.10	STATISTISCHE AUSWERTUNG	38
5.	ERGEBNISSE:	41
5.1	PROZENTUALE FARB PENETRATION	41
5.1.1	<i>Farbpenetration gesamte Füllung (Innen- und Randbereich)</i>	42
5.1.1.1	Farbpenetration insgesamt (Schmelz und Dentin)	42
5.1.1.2	Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelz-Komposit-Grenzfläche	44
5.1.1.3	Farbpenetration im Dentin bezogen auf die Dentin-Komposit-Grenzfläche.....	46
5.1.2	<i>Farbpenetration im Innenbereich der Füllung</i>	49
5.1.2.1	Gesamtfarbpenetration insgesamt (Schmelz und Dentin)	49
5.1.2.2	Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelzlänge-Komposit-Grenzfläche.....	51
5.1.2.3	Farbpenetration im Dentin bezogen auf Dentin-Komposit-Grenzfläche.....	53
5.1.3	<i>Farbpenetration im Randbereich der Füllung</i>	56
5.1.3.1	Gesamtfarbpenetration insgesamt (Schmelz und Dentin)	56
5.1.3.2	Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelzlänge-Komposit-Grenzfläche.....	58
5.1.3.3	Farbpenetration im Dentin bezogen auf Dentin-Komposit-Grenzfläche.....	60
5.2	LAGE DER FARB PENETRATION	63
5.2.1	<i>Anteil der Farbpenetration beginnend an de Schmelz-Komposit-Grenzfläche</i> ..	63
5.2.2	<i>Anteil der Farbpenetration über die Schmelz-Dentin-Grenze</i>	64
5.2.3	<i>Anteil der Farbpenetration beginnend an der Dentin-Komposit Grenzfläche</i> ..	66
5.2.4	<i>Anteil der Farbpenetration von außen in beide Zahnhartsubstanzen</i>	67
6.	DISKUSSION	69
6.1	MATERIALIEN UND METHODE	69
6.1.1	<i>Untersuchungsgut und Lagerung</i>	69
6.1.2	<i>Präparation und Kavitätendesign</i>	69
6.1.3	<i>Adhäsivsystem, Komposite, Polymerisation</i>	70
6.1.4	<i>Zwischenlagerung</i>	72
6.1.5	<i>Thermomechanische Wechselbelastung</i>	73
6.1.6	<i>Farbpenetration</i>	74

6.2 ERGEBNISSE	75
6.2.1 <i>Diskussion der prozentualen Farbpenetration</i>	75
6.2.1.1 Einfluss des Adhäsivsystems	75
6.2.1.2 Einfluss des Komposit	76
6.2.1.3 Einfluss der Zeit.....	78
6.2.2 <i>Lage der Farbpenetration</i>	78
7. ZUSAMMENFASSUNG.....	80
8. ANHANG.....	81
8.1 FARBPENETRATION BEZOGEN AUF DIE GESAMTE FÜLLUNG	81
8.2 FARBPENETRATION FÜR DEN INNENTEIL DER FÜLLUNG	82
8.3 FARBPENETRATION FÜR DEN RANDTEIL DER FÜLLUNG	83
8.4 SIGNIFIKANZTABELLEN	84
8.4.1 <i>Signifikanztabellen gesamte Restauration</i>	84
8.4.1.1 Adhäsiv gegeneinander.....	84
8.4.1.2 Material gegeneinander ohne Adhäsivanwendung	85
8.4.1.3 Material gegeneinander mit Adhäsivanwendung	85
8.4.1.4 Zeit gegeneinander.....	86
8.4.2 <i>Signifikanzwerte für den Innenbereich der Restauration</i>	86
8.4.2.1 Adhäsiv gegeneinander.....	86
8.4.2.2 Material gegeneinander ohne Adhäsivanwendung	87
8.4.2.3 Material gegeneinander mit Adhäsivanwendung	87
8.4.2.4 Zeit gegeneinander.....	88
8.4.3 <i>Signifikanztabellen für den Randbereich der Füllung</i>	88
8.4.3.1 Adhäsiv gegeneinander.....	88
8.4.3.2 Material gegeneinander ohne Adhäsivanwendung	89
8.4.3.3 Material gegeneinander mit Adhäsivanwendung	89
8.4.3.4 Zeit gegeneinander.....	90
8.5 LAGE DER FARBPENETRATION	90
8.6 GRAPHEN.....	92
9. MATERIALLISTE	94
10. LITERATURVERZEICHNIS	96
11. DANKSAGUNG	109

1. Einleitung

Im Zeitalter der adhäsiven Zahnmedizin werden dem Zahnarzt fast täglich neue Komposite und Adhäsivsysteme angeboten. Jeder Hersteller bietet „das Beste“ Füllungskomposit an, mit dem angeblich mit geringem zeitlichen und materiellen Aufwand dauerhafte und ästhetisch ansprechende Kompositrestaurationen hergestellt werden können. Die Komposite werden mit hervorragenden optischen Eigenschaften, Farbstabilität, geringer Schrumpfung, geringem Polymerisationsstress, der Zahnhartsubstanz ähnlichem thermischen Ausdehnungskoeffizienten oder ähnlichem beworben. Ob oder welcher dieser Werte einen Einfluss auf die marginale Integrität von Klasse-V-Kompositrestaurationen besitzt soll in dieser Arbeit näher betrachtet werden.

Es kommt aber nicht allein auf das verwendete Füllungskomposit sondern auch auf das verwendete Adhäsivsystem und das Zusammenspiel von Komposit und Adhäsivsystem an. Dabei waren die ersten Adhäsivsysteme, mit denen es gelang, einen stabilen und dauerhaften Verbund zwischen Zahnschmelz, Dentin und Füllungskomposit herzustellen, sehr zeitaufwendig und techniksensibel in der Anwendung. Trotz aller Bemühungen ist es nicht gänzlich gelungen, einen stabilen und dauerhaften Verbund zwischen Schmelz, bzw. Dentin und Komposit herzustellen und die Bildung von Randspalten komplett zu vermeiden.

Einige vielversprechende Ansätze, wie die Anwendung entsprechender Adhäsivsysteme, Verarbeitungstechniken kombiniert mit speziellen Polymerisationslampen, sowie die Verwendung von fließfähigen Kompositmaterialien als Stressabsorber haben sich mittlerweile in der Praxis bewährt, um dem Problem einer Mikro- bzw. Nanoleakagebildung entgegenzuwirken. Zudem stellt die Entwicklung neuer Adhäsivsysteme dem Behandler zudem immer schneller und einfacher zu verarbeitende Materialien zur Verfügung.

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es, den Einfluss eines Ein-Schritt-Adhäsivsystems auf die marginale Integrität von Klasse-V-Restaurationen mit drei unterschiedlichen konventionellen Kompositen zu untersuchen.

2. Literaturübersicht

2.1 Kompositmaterialien

Komposite sind zahnfarbene, plastische Füllungswerkstoffe, die nach Einbringen in eine Kavität chemisch oder durch Energiezufuhr aushärten (93). Die drei Hauptbestandteile der Komposite sind die organische Matrix, die darin eingebetteten anaorganischen Füllkörper und die Verbundschicht. Außerdem beinhalten Komposite Pigmente, Initiatoren und Stabilisatoren (51). Die Verbundphase enthält ein mehrfunktionelles Silan zur Haftvermittlung zwischen organischer und anorganischer Phase (93). Der sichere Verbund zwischen Füllkörper und Matrix ist verantwortlich für die Festigkeit und die bessere Verschleißbeständigkeit des Materials (173). Zur Steuerung der Polymerisationsreaktion sind Initiatoren, Akzeleratoren und Inhibitoren beigemischt. Die ersten erhältlichen Komposite (auf Polymethylmethacrylatbasis) waren gekennzeichnet durch eine geringe Abrasionsbeständigkeit aufgrund fehlender Verbindung der Füllkörper zur Kompositmatrix, einen großen thermischen Ausdehngskoeffizienten und hoher Polymerisationsschrumpfung (93;128;148). Ein hoher Anteil an Restmonomeren galt zudem als pulpentoxisch (70;93;120;171). Weiterhin fehlte eine adäquate Adhäsivtechnik. Aus den oben genannten Gründen resultierten Verfärbungen, Sekundärkaries und nicht zuletzt Füllungsverluste (93). Bowen entwickelte 1962 Komposite auf der Basis des A-Glycidylmethacrylat (Bis-GMA) (122). Diese Materialien waren die Vorläufer moderner Komposite. Sie wurden zusammen mit der Schmelz-Ätz-Technik, die Buonocore 1955 entwickelte, anfangs ausschließlich im Frontzahnbereich verwendet (22).

In der Zahnmedizin wird der Begriff Komposite als Synonym für Kunststoff-, Glas- und Keramikverbundwerkstoff verwendet (25). Die Weiterentwicklung der Füllungskomposite fokussiert sich heute hauptsächlich auf die Modifikation der Polymermatrix und der Füllkörper mit dem Ziel, die Polymerisationsschrumpfung und -spannung, sowie die Abrasion zu reduzieren und die Verschleißfestigkeit zu steigern. Die Polymerisationsschrumpfung und der Polymerisationsstress stellen weiterhin ein Problem dar (77). Es ist absehbar, dass die Stoffgruppe der Komposite weiterhin einer rasch fortschreitenden Entwicklung unterliegt (61;123;198)

2.1.1 Die Matrix von Dentalkompositen

Die organische Phase besteht hauptsächlich aus mehrfunktionellen Methacrylaten, mit der Grundformel MA-R-MA (93). R steht für organische Zwischenglieder und MA für Methacrylsäureesterreste. Man unterscheidet zwischen Monomeren und Comonomeren. Die Monomere weisen eine komplexe Molekülstruktur und besitzen eine lange und teilweise verzweigte organische Zwischenkette (Abb. 1) (23). Um die Polymerisationsschrumpfung möglichst gering zu halten und die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Komposit zu verbessern, müssen möglichst Monomere mit hoher Molekülmasse und der Möglichkeit zur Quervernetzung verwendet werden (158). Die gebräuchlichsten dieser Monomere sind das Bisphenol A-Glycidylmethacrylat (Bis-GMA) und das Urethandimethacrylat (UDMA). Durch die hohe, honigartige (158) Viskosität dieser Monomere ist das Komposit schwer zu verarbeiten. Es können kaum Füllkörper zugegeben werden, da sonst die regelrechte Adaptation des Füllungsmaterials an die Kavitätenwand nicht mehr möglich ist. Ein weiterer Grund hierfür ist die sehr hohe Oberflächenspannung des Monomers. Deshalb werden der Kompositmatrix zur Konsistenzinstellung Comonomere in Form niedermolekularer Dimethacrylate beigemischt (Abb. 1 und 2). Die Comonomere reagieren mit den Monomeren und verändern die mechanischen und physikalischen Eigenschaften der Komposite. Sie führen zu einem höheren Polymerisationsgrad, bedingen aber auch eine höhere Polymerisationsschrumpfung, eine größere Wasseraufnahme und schlechtere mechanische Eigenschaften. Es wird auch diskutiert, ob durch die niedrig viskösen Monomere der Stress, der bei der Polymerisation entsteht verringert wird (111). Gebräuchliche Comonomere sind Triethylenglycoldimethacrylat (TEGDMA), Ethylenglycoldimethacrylat (EDMA) und 2-Hydroxyethylmethacrylat (HEMA) (158).

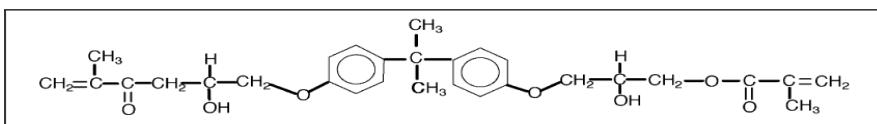


Abbildung 1: Bis GMA aus PUCKET et al. Direct Composite Restorative Materials (158)

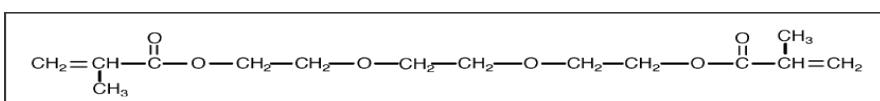


Abbildung 2: TEGDMA aus PUCKET et al. Direct Composite Restorative Materials (158)

2.1.2 Füllkörper

Komposite enthalten zur Verstärkung Füllkörper auf Glas- oder Keramikbasis. Der Füllstoffanteil beträgt bis zu 87 Gewichtsprozent (193). Die Art der Füllkörper, der Anteil der Füllkörper, deren Partikelgröße, Partikelform und deren Verteilung sowie die Art des Füllkörper-Matrix-Verbundes bestimmt maßgeblich die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Komposite (121;158). Mit der Erhöhung des Füllkörperanteils werden die Polymerisationsschrumpfung, der thermische Expansionskoeffizient sowie die Wasseraufnahme verringert (158). Mit zunehmendem Füllgrad des Komposites erhöhen sich die Druck-, Zug-, Biege- und Abrasionsfestigkeit und der Elastizitätsmodul (103;121).

Es existieren drei verschiedene Möglichkeiten der Füllkörperherstellung.

- 1) durch Mahlen von Glas- o. Keramikblöcken. Durch dieses Verfahren ist es möglich, Partikel zwischen 0,1 µm und 100 µm Durchmesser herzustellen. Die so erzeugten Füllkörper sind splitterförmig (93).
- 2) durch pyrolytische Hydrolyse in der Knallgasflamme. Die dadurch erzeugten Füllkörper sind kugelförmig und besitzen Partikelgrößen zwischen 0,06 µm und 0,1 µm (158).
- 3) durch das Gel-Solverfahren. Durch dieses Verfahren erreicht man ebenfalls runde Füllkörper mit einer Größe zwischen 5 nm und 100 nm, die jedoch bessere mechanische Eigenschaften besitzen als gleichgroße Füllstoffpartikel aus pyrolytischer Herstellung (193). Durch das Gel-Solverfahren können Füllkörper definierter Größe isoliert erzeugt werden. Dadurch können in Kompositen höhere Füllerkonzentrationen erzeugt werden, da die Viskosität des Kompositen durch diese sogenannten „Nanofüller“ nicht so stark erhöht wird, als mit herkömmlichen Füllkörpern. Durch die höhere Füllkörperkonzentrationen lassen sich die mechanischen Eigenschaften des Kompositen verbessern (158;182;193).

2.1.3 Verbundphase

Aufgrund der schlechten mechanischen Eigenschaften der frühen Komposite verband Bowen 1964 die Füllkörper chemisch mit der Kompositmatrix mittels bifunktioneller Silanhaftvermittler (23). Heute wir dazu meist 3-Methacryloxy-

propyltrimethoxysilan (MPTMS) verwendet (51;158). Die Alkoxy-Gruppen des MPTMS binden in einer Veresterungsreaktion an die Silizium-Gruppe der Fülleroberfläche. Das gebundene Silan enthält freie Methacrylgruppen, mit denen die Methacrylgruppen der organischen Matrix reagieren können (51). Aufgrund der Silanbindung zwischen Füllkörper und Kompositmatrix kommt es zu einer Belastungsverlagerung von der weicheren und mechanisch schwächeren Matrix zum härteren Füllkörpermaterial. Komposite mit zunehmendem Füllpartikelanteil sind deshalb mechanisch widerstandsfähiger (104). Da sich die Silanschicht nicht als monomolekulare Schicht auf den Füllpartikeln niederschlägt, kann es sowohl am Silizium des Füllkörpers als auch innerhalb dieser Schicht während der Funktionszeit der Füllung durch Speichel bzw. Nahrungsbestandteile zur hydrolytischen Spaltung (saurer Hydrolyse) und somit zur chemischen Desintegration des Restaurationsmaterials kommen (93).

2.1.4 Kompositklassifikationen

Neben der Einteilung der Komposite nach der Konsistenz (konventionell oder flowable), können Komposite auch nach der Füllkörperkonfiguration eingeteilt werden. An dieser Stelle wird die Einteilung nach der Füllkörperzusammensetzung beschrieben.

2.1.4.1 Makrofüllerkomposite

Die ersten auf dem Dentalmarkt erhältlichen Komposite waren Makrofüller-Komposite. Diese besaßen splitterförmige, anorganische Füllpartikel aus gemahlenen Gläsern oder Keramiken mit einer Füllkörpergröße zwischen 0,1 µm und 100 µm. Die durchschnittliche Größe lag bei etwa 1,5 µm bis 5 µm. Der Füllkörperanteil liegt bei ca. 75 Gewichtsprozent.

Diese Komposite besaßen geringe Schrumpfung, geringe thermische Expansionskoeffizienten und geringe Wasseraufnahme. Große Füllkörper haben den Nachteil, dass sie aufgrund der unterschiedlichen Härte und ihrer Größe leicht aus der Matrix herausbrechen können. Daraus resultiert eine geringe Abrasionsbeständigkeit. Aufgrund der Partikelgröße sind makrogefüllte Komposite nicht polierbar. Wegen der

oben genannten negativen mechanischen Eigenschaften werden makrogefüllte Komposite klinisch kaum mehr eingesetzt (56;93;94).

2.1.4.2 Mikrofüllerkomposite

Die Mikrofüllerkomposite enthalten runde Füllkörper mit einer Größe zwischen 0,04 µm und 0,007 µm (93). Die Füllkörper werden durch Flammenpyrolyse organischer Siliziumverbindungen gewonnen. Das Problem der hierbei entstehenden Füllkörper ist ihre hohe spezifische Oberfläche. Dadurch wird die Viskosität der organischen Matrix erhöht, wodurch nur Füllerkonzentrationen von 35 bis 67 Gewichtsprozent möglich sind (158;164). Diesen Nachteil kann man entweder durch die Zugabe von niedrigviskösem Comonomer beseitigen, was höhere Schrumpfung und schlechtere mechanische Eigenschaften des Kompositos zur Folge hat. Oder man verwendet gemahlenes schon polymerisiertes hochgefülltes Mikrofüllerkomposit oder perlenförmiges Vorpolymerisat als Füllkörper. Dadurch erhält man ein inhomogenes Mikrofüllerkomposit mit einem hohen Fülleranteil von 70 bis 80 Gewichtsprozent.

Diese inhomogenen Mikrofüllerkomposite sind polierbar, ausreichend abrasionsfest und dank ihrer Viskosität gut verarbeitbar. Allerdings besitzen sie schlechtere physikalische Eigenschaften als makrogefüllte Komposite. Ein Problem der inhomogenen Mikrofüllerkomposite mit vorpolymerisierten Füllkörpern ist, dass sich die organischen Füllkörper nicht wie anorganische Füllkörper silanisieren lassen. Dadurch entsteht kein chemischer Verbund zwischen den Füllkörpern und der Kompositmatrix. Daher kann es an der Füllkörper - Kompositmatrix - Grenzfläche möglicherweise zur Rissbildung und dadurch zum Misserfolg der Restauration kommen. Wegen des geringen Elastizitätsmoduls und der hervorragenden optischen Eigenschaften werden Mikrofüllerkomposite für den Frontzahnbereich und für Zahnhalsläsionen eingesetzt (93;158;164).

2.1.4.3 Hybridkomposite

Heute gebräuchliche Komposite sind größtenteils Hybridkomposite. Sie sind aus dem Versuch entstanden, die positiven mechanischen Eigenschaften der Makrofüllerkomposite mit denen der Mikrofüllerkompositen zu vereinen (63).

Hybridkomposite enthalten einen Anteil von 85 bis 90 Gewichtsprozent Makrofüller und 10 bis 15 Gewichtsprozent Mikro- oder Nanofüller. Sie erreichen einen Füllkörpergehalt von zu 85 % (56;93). Durch Verbesserungen im Mahlverfahren der Füllkörper konnten nach den Hybridkompositen (Füller < 10 µm) zunächst Feinpartikelhybrid (Füller < 5 µm), Feinstpartikelhybrid (Füller < 3 µm) und Submikrometerhybrid (Füller < 1 µm) mit immer besseren mechanischen Eigenschaften entwickelt werden. Die neuste Entwicklung sind Nanohybridkomposite, bei denen anstelle von Mikrofüllern Nanopartikel verwendet werden (vgl. Füllkörperherstellung). Aufgrund ihrer Materialeigenschaften werden diese Komposite klinisch sowohl im Frontzahn- als auch im Seitenzahngebiet angewendet (93;158;164).

2.1.4.4 Nanokomposite

Nanofüllerkomposite sind Komposite mit ähnlichen Füllkörpergrößen wie Mikrofüllerkomposite und ähnlich hohen oder höheren Füllkörperkonzentrationen wie Makrofüller oder Hybridkomposite (bis 87 Gewichtsprozent). Das ist möglich, da sie nicht agglomerierte Nanofüllkörper enthalten (vgl. Füllkörperherstellung), die bis zu einem Anteil von 40 Gewichtsprozent die Viskosität der organischen Matrix von Kompositen nicht erhöhen.

Daraus resultieren gute mechanische Eigenschaften. Zudem haben Nanokomposite hervorragende physikalische Eigenschaften, sie sind langzeitstabil und sollen gegenüber einer hydrolytischen Degradation resistent sein. Die Verarbeitungseigenschaften sind denen niedriger gefüllter Komposite sogar überlegen. Ferner sind diese Komposite gut polierbar und behalten ihren Glanz. Klinisch können diese Komposite für alle Restaurationen im Frontzahn- und Seitenzahngebiet eingesetzt werden (19;56;93;139;193;193) .

2.2 Adhäsiver Verbund

Da Komposite weder von sich aus an der Zahnhartsubstanz haften, wie z.B. Glasionomerzemente, noch antibakterielle Eigenschaften besitzen, wie Amalgame, und dazu bei der Polymerisation einer Schrumpfung unterliegen, können sie nur in

Verbindung mit der so genannten Adhäsivtechnik, verwendet werden. Das bedeutet, sie müssen adhäsiv mit den Zahnhartsubstanzen verklebt werden, da sonst unmittelbar nach der Polymerisation der Füllung Randspalten auftreten und diese das Scheitern der Restauration zur Folge haben. Diese Spalten können zu postoperativen Sensibilitäten, Sekundärkaries, Füllungsverlusten oder Verfärbungen der Füllung führen (52;93). Das Grundprinzip dieses adhäsiven Verbundes ist der Austausch von anorganischen Zahnbestandteilen gegen synthetisches Füllungsmaterial (191). Dieser Austausch geschieht in zwei Phasen. Zuerst wird Calciumphosphat aus der Zahnhartsubstanz entfernt, wodurch sowohl im Schmelz als auch im Dentin Mikroporositäten entstehen. In der zweiten Phase, der sogenannten Hybridisierungsphase, werden die zuvor erzeugten Porositäten von Füllungsmaterial infiltriert und dieses dann ausgehärtet. So entsteht ein mikromechanischer Verbund, der hauptsächlich auf Diffusion beruht. Während derzeit der mikromechanische Verbund als alleiniger Ursache für den adhäsiven Verbund angesehen wird, wird möglicherweise in Zukunft der chemische Verbund von Füllungsmaterial und Zahn immer mehr an Bedeutung gewinnen.

2.2.1 Schmelzhaftung

Der Grundstein der adhäsiven Füllungstechnik wurde bereits 1955 mit der Einführung der Schmelz-Ätz-Technik durch Buonocore gelegt (31). Ihm gelang es erstmals, einen adhäsiven Verbund zwischen Zahnschmelz und Füllungsmaterial auf mikromechanischer Basis herzustellen (125). Durch die unterschiedliche Säurelöslichkeit der Schmelzprismen im Zentrum und in der Peripherie entsteht durch Ätzung mit 30 bis 40 %iger Phosphorsäure ein mikroretentives Ätzmuster (4). Beim Ätzen geht eine Schmelzschicht von ca. 10 µm irreversibel verloren. Zudem entsteht eine 30 µm bis 50 µm breite poröse Schicht. Gleichzeitig wird die Schmelzoberfläche vergrößert und die Oberflächenenergie des Schmelzes erhöht. Dadurch steigt die Benetzbarkeit der konditionierten Schmelzoberfläche um 400 % (31;80;80;93). Die durch Anätzen erzeugten schwammartigen Strukturen erlauben dem niedrig viskosen Bondingmaterial, in die erzeugten Porositäten einzudringen. Dadurch kommt es zu einer innigen Verbindung von Schmelz und Bondingmaterial. Das Bondingmaterial haftet so durch mikromechanische, rheologische und geometrische Effekte (10;93). An die auf dem Schmelz haftende Bondingschicht

kann dann das Komposit anpolymerisiert werden. Durch diese Verbindung zwischen Schmelz und Komposit können Haftwerte von über 30 MPa erreicht werden (67). Voraussetzung für den Erfolg der Schmelz-Ätz-Technik ist das Vorhandensein von gesundem Schmelz (36). Entscheidend für die Qualität und Tiefe des Ätzmusters ist neben der Schmelzqualität auch die Richtung, in der die Schmelzprismen angeschnitten und geätzt werden. Da Phosphorsäure bevorzugt Prismenkerne herauslöst, entsteht auf quer zur Längsachse angeschnittenen Prismen ein retentiveres Ätzmuster (38). Bei fluoridreichem Schmelz ist die Ätzwirkung durch erhöhte Säureresistenz eingeschränkt, ebenso bei Milchzähnen, da deren Schmelzoberfläche hauptsächlich aus aprismatischem Schmelz besteht (93).

2.2.2 Dentinhaftung

Während es kein Problem darstellt, Komposit am Zahnschmelz zu verankern, bereitet der Verbund zwischen Komposit und Dentin immer noch Schwierigkeiten. Das ist im Wesentlichen auf die unterschiedliche Zusammensetzung der Zahnhartsubstanzen zurückzuführen. Dentin besteht zu 70 Gewichtsprozent aus anorganischer und zu 20 Gewichtsprozent aus organischer Matrix. Der Wasseranteil liegt bei 10 Gewichtsprozent (93). Im Gegensatz zum Schmelz weist Dentin durch die mit Dentinliquor gefüllten Dentintubuli eine intrinsische Feuchtigkeit auf. Des weiteren erschwert die bei der Präparation erzeugte Schmierschicht die Herstellung eines stabilen Verbundes zwischen Komposit und Dentin (64;153). Erst seit Mitte der Neunzigerjahre konnten sich Haftvermittlersysteme mit ausreichend hohen Haftwerten etablieren.

Die Vorbehandlung des Dentins besteht grundsätzlich aus drei „Arbeitsschritten“. Zunächst wird beim Konditionieren die Schmierschicht auf dem Dentin durch einen Dentinkonditioner entweder ganz oder teilweise entfernt oder modifiziert. Bei der Konditionierung des Dentins kommt es abhängig vom Dentinkonditioner zu einer Demineralisation des Dentins, wodurch das im Dentin liegende Kollagennetzwerk freigelegt wird, oder es wird nur die dem Dentin aufliegende Schmierschicht modifiziert. Der nächste Schritt ist das Detinpriming, wobei durch den Dentinprimer eine Brücke vom hydrophilen (feuchten) Dentin zum hydrophoben Komposit

geschlagen wird, an die dann das hydrophobe Bonding im 3. Schritt binden kann. An dieser Bondingschicht wird dann das Komposit verankert.

Ein sehr sensibler Bereich ist dabei die Penetration des freigelegten Kollagennetzwerks durch den Dentinprimer. Gelingt diese nicht oder nur unvollständig, so entsteht Nanoleakage. Das ist ein Spaltraum (kleiner 1µm) zwischen Dentin und Bondingschicht, in dem das Dentin konditioniert, aber die konditionierte Dentinschicht nicht vom Dentinprimer und Bondingmaterial penetriert wurde (180). Aufgrund der geringen Ausdehnung dieses Spaltes können Bakterien nicht zwischen Füllung und Zahn eindringen. Allerdings spielt dieser Raum eine große Rolle für die Langzeitstabilität der Restauration, da Wasser und bakterielle Stoffwechselprodukte in ihn eindringen können und aufgrund von saurer Hydrolyse zur Degradation der Adhäsivschicht kommen kann (151;175).

Nach VAN MEERBEEK et al. (191) unterscheidet man bei den Bondingsystemen zwischen Etch & Rinse-, Self-Etch-Systemen und dem Glasionomerverbund. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die Adhäsivsystemeinteilung nach Van Meerbeek.

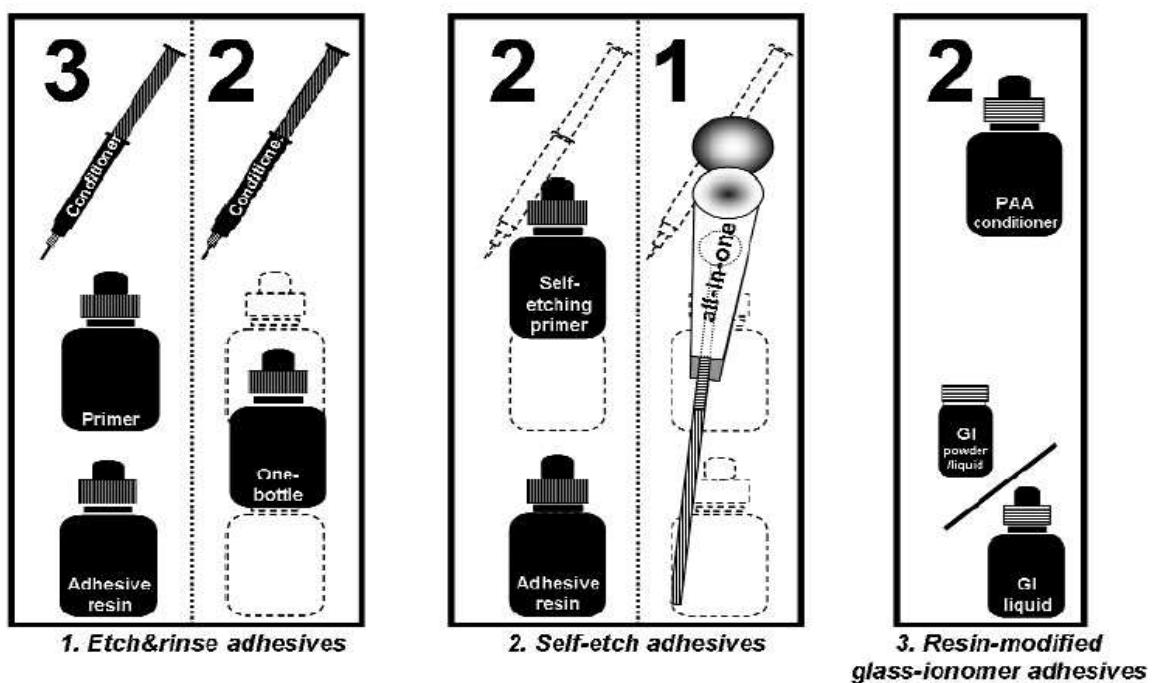


Abbildung 3: Adhäsivsystemeinteilung nach Van Meerbeek et al. (191)

2.2.2.1 Etch & Rinse Systeme:

Charakteristikum dieses Adhäsivverfahrens ist, dass die Säure bzw. der Zahnoberflächenkonditioner auf die Zahnhartsubstanz aufgebracht wird und nach der Einwirkzeit durch Wasserspray wieder entfernt wird. (190). Etch & Rinse-Systeme bestehen aus 2 bis 3 Arbeitsschritten.

- 1) Dem Anätzen, bzw Konditionieren des Dentins,
- 2) Dem Aufbringen des Dentinprimers,
- 3) Dem Aufbringen des Dentinbondings.

Nach dem Aufbringen des Dentinbondings wird die Adhäsivschicht mit Licht der Wellenlänge 400 - 470 nm ausgehärtet. An die Bondingschicht kann das Füllungskomposit anpolymerisieren. Primer und Bonding können auch gleichzeitig aufgebracht werden.

Für das Ätzen (Konditionieren) des Dentins wird meist 30 bis 40 %iges Phosphorsäuregel verwendet. Es wird für 15 s auf Schmelz und Dentin aufgetragen und dann durch Wasserspray wieder entfernt. Dadurch wird im Dentin die Schmierschicht entfernt und das Dentin bis in eine Tiefe von ca. 5 µm demineralisiert und das darin enthaltene Kollagennetzwerk freigelegt (99;191).

Dieses Kollagennetzwerk muss jetzt vom Dentinprimer penetriert werden. Je nach Zusammensetzung des Dentinprimers unterscheidet man Wet- oder Drybonding. Der kritischste Punkt bei Etch & Rinse-Bondingsystemen ist das Aufbringen des Dentinprimers. Wird ein Dentinprimer auf Acetonbasis verwendet, muss die „Wetbonding“ - Technik verwendet werden. Das bedeutet, dass das Dentin nach der Konditionierung mit Phosphorsäure nicht vollständig trockengeblasen (übertrocknet) werden darf, da sonst das freigelegte Kollagennetzwerk kollabieren würde und somit nicht optimal vom Dentinprimer (gelöst in Aceton) penetriert werden kann (177). Weniger techniksensitiv ist die „Drybonding“ – Technik. Bei dieser Technik wird das Dentin nach der Konditionierung mit dem Luftbläser getrocknet. Sollte das Kollagennetzwerk dabei kollabieren, kann es durch das im Dentinprimer enthaltene Wasser (oder Alkohol) wieder aufgerichtet und dann penetriert werden (188;190). Gelingt die Penetration nicht oder unvollständig, so bleibt ein Spaltraum zwischen Adhäsivschicht und Zahn. Dieser wurde von SANO et. al. (167) unter dem Begriff „Nanoleakage“ beschrieben wurden.

Um das Lösungsmittel des Dentinprimers zu entfernen, wird die Bondingschicht mit dem Luftbläser so lange verblasen, bis keine Materialbewegung mehr sichtbar ist. Im

dritten Schritt wird das Dentinbonding aufgetragen. Dieses besteht aus einer Monomermatrix (die entweder keine oder wenig Füllkörper enthält), an die Methacrylatgruppen des Dentinprimers polymerisieren kann.

Die Etch & Rinse-Technik ist die effektivste Methode einen stabilen und dauerhaften adhäsiven Verbund zwischen Komposit und Zahnhartsubstanz herzustellen (Vgl. Abbildung 5 und 6) (191). Allerdings werden bei dieser Technik durch Nanoleakage oder ähnliche Effekte höhere postoperative Sensibilitäten beobachtet als bei den Self-Etch-Systemen (191). Einen Überblick über die Haftwerte der Etch & Rinse Bondingsysteme geben Abbildungen 5 und 6. Im Schmelz werden für Etch & Rinse Adhäsive durchschnittlich Haftwerte um die 40 MPa erreicht. Im Dentin lagen diese zwischen 39 und 54 MPa, abhängig davon ob es sich um 2- oder 3-Schritt Adhäsive handelt.

2.2.2.2 *Self-Etch-Adhäsivsysteme*

Im Hinblick auf Anwenderfreundlichkeit, Zeitersparnis und geringerer Techniksensibilität sind Self-Etch-Adhäsivsysteme sehr vielversprechend. Bei ihnen entfällt der separate Schritt des Anätzens und das anschließende Absprühen mit Wasser, da bei den Self-Etch-Adhäsiven der Schritt des Konditionieren und Primen zu einem Schritt zusammengefasst ist. Es verbleiben bei den 2-Schritt Self-Etch-Adhäsiven die Arbeitsschritte

- 1) Konditionieren und Primen des Dentins
- 2) Bonden des Dentins

Eine Weiterentwicklung stellen Ein-Schritt-Adhäsivsysteme dar. Bei ihnen sind diese beiden Arbeitsschritte zu einem zusammengefasst. So wird nur noch eine Flüssigkeit auf das Dentin aufgebracht. Diese übernimmt sowohl das Konditionieren, das Primen und das Bonden des Dentins.

Zum Konditionieren des Dentins werden meist Monomere verwendet, die eine oder mehrere Carbon- oder Phosphorsäuregruppen enthalten (187). Somit geschieht das Konditionieren, Infiltrieren und Primen durch ein Molekül. An das so vorbehandelte Dentin kann dann das Dentinbonding, das wie oben erwähnt aus einer ungefüllten, oder leicht gefüllten Monomermatrix besteht an die Methacrylatgruppen des

Dentinprimers polymerisieren. Abhängig vom pH-Wert der Adhäsive unterscheidet man starke, schwache und intermediate Self-Etch-Adhäsive.

Starke Self-Etch-Adhäsive haben einen pH-Wert um 1 oder niedriger. Im Schmelz wirken diese Adhäsivsysteme ähnlich wie die Phosphorsäure der Etch & Rinse-Systeme (150). Im Dentin wird in der Bondingschicht das Kollagengeflecht freigelegt und der Hydroxylapatit fast vollständig herausgelöst. Folglich beruht der Adhäsionsmechanismus auf Diffusion und kommt durch mikromechanische Verankerung zustande, ähnlich dem der Etch & Rinse-Systeme. Bei diesen starken Self-Etch-Adhäsiven wurden häufig geringe Haftwerte an den Zahnhartsubstanzen, besonders am Dentin, beobachtet. Der niedrige pH-Wert dieser Bondingsysteme scheint, durch saure Hydrolyse, die Haftkraft dieser Adhäsive stark zu schwächen (45;100). Ein weiterer Grund für die geringe Haftkraft dieser Systeme könnte das durch die Säure-Base Reaktion entstehende Wasser sein, da es sich kaum aus der Bondingschicht entfernen lässt (45;48;100;194).

Milde Self-Etch-Adhäsive haben einen pH-Wert um 2 und können deshalb das Dentin nur bis zu einer Tiefe von 1 µm demineralisieren (191). Selbst diese oberflächliche Dentinschicht ist nicht komplett demineralisiert. Es bleibt an das Kollagengeflecht gebundener Hydroxylapatit zurück. Trotzdem wird die Dentinoberfläche so stark aufgeraut, dass ein mikromechanischer Verbund stattfinden kann. Die Tatsache, dass die Hybridschicht bei milden Self-Etch-Adhäsiven viel geringer ist, als bei Etch & Rinse- oder starken Self-Etch-Adhäsiven scheint keinen negativen Einfluss auf die Effektivität des Haftverbunds zu haben (45;98;101). Bei milden Self-Etch Adhäsiven besteht zudem die Möglichkeit, das in der Hybridschicht vorhandene Hydroxylapatit als Rezeptor für chemische Adhäsion an der Zahnhartsubstanz zu benutzen (85;86;168). Derzeit stellt die geringe Hydrolysebeständigkeit von Einflaschen-Systemen aber noch ein nicht ausreichend gelöstes Problem dar (201).

Einige neue Adhäsivsysteme, wie das bei dieser Arbeit verwendete AdheSE One können weder der Gruppe der milden noch der Gruppe der starken Self-Etch-Adhäsiven zugordnet werden. Ihr pH-Wert liegt bei ca 1,5. Aufgrund ihrer Interaktion mit dem Dentin werden sie als intermediate Self- Etch- Adhäsive bezeichnet. Typisch für sie ist, dass ihre Hybridschicht an der Oberfläche aus einer vollständig demineralisierten Schicht besteht, die kontinuierlich in eine teilweise demineralisierte Zone und dann in nicht demineralisiertes Dentin übergeht. Ihr Mechanismus, das

Dentin zu konditionieren, kann weder den milden noch den starken Self-Etch-Adhäsiven zugeordnet werden. Somit wird bei diesen Adhäsiven ein ausreichender mikromechanischer Verbund geschaffen aber es bleibt auch noch Hydroxylapatit in der Hybridschicht zurück, der für chemische Adhäsion wie bei den milden Self-Etch-Adhäsiven genutzt werden kann (191).

Der Vorteil der Self-Etch-Adhäsive ist, dass die Infiltration des Dentins zeitgleich mit der Konditionierung (Demineralisation) des Dentins geschieht. Dadurch ist die Gefahr, dass Dentin geätzt, aber nicht vom Dentinbonding infiltriert wird, geringer. Allerdings ist bisher noch wenig über die Langzeithydrolysestabilität dieser Bondingsysteme bekannt. Auch weiß man noch wenig darüber, ob die in der Bondingschicht verbleibenden Reste der Smearlayer auf Dauer einen negativen Einfluss auf den Haftverbund haben, oder wie viel Lösungsmittel des Dentinprimers in der Bondingschicht verbleibt. Diese Reste können den Haftverbund allein durch ihr Vorhandensein schwächen oder „Kanälchen“ freihalten, die zu Nanoleakage führen und die Hydrolyse der Bondingschicht begünstigen (178;179).

Im Schmelz werden für 2-Schritt-Self-Etch-Adhäsive Haftwerte um die 36 MPa erreicht. 1-Schritt-Adhäsivsysteme erreichen dagegen nur 16 MPa. Im Dentin liegen die Haftwerte zwischen 41 MPa (2-Schrittsysteme) und 24 MPa für (1-Schrittsysteme). Im Gegensatz zu den Etch&Rinse-Adhäsiven spielt es bei den Self-Etch-Adhäsiven eine entscheidende Rolle, ob man die Arbeitsschritte reduziert oder nicht.

2.2.2.3 AdheSE One

AdheSE One ist ein 2007 auf den Markt gekommenes selbstätzendes lichthärtendes **All-In-One** Adhäsiv für direkte Restaurationen (Komposite und Kompomere). Es gehört wegen seines pH-Wert von 1,4 (102) der Gruppe der intermediate Self-Etch-Adhäsivsysteme an. Die multiplen Arbeitsschritte Schmelzätzung, Dentinkonditionierung, Priming und Bonden sind hier in einem einzigen Arbeitsgang zusammengefasst. Das Adhäsiv wird im „VivaPen“ einem speziellen Applikations- und Vorratsgefäß angeboten. Dadurch wird laut Hersteller sichergestellt, dass immer frisches Adhäsiv auf die Kavität aufgebracht wird, das sich noch nicht durch lange Luftlagerung oder Verdunstung entmischt hat.

In einer klinischen Studie hat sich AdheSE One bewährt. So gab es in der klinischen Studie von Kober et al. in einem Beobachtungszeitraum von einem Jahr keine Füllungsverluste. Alle untersuchten Zähne blieben vital und zeigten keine Hypersensibilitäten (112).

In Laborversuchen zeigte sich, dass die Haftkraft auf unpräpariertem Zahnschmelz mit 4 bis 6 MPa je nach Studie weit hinter denen von Etch&Rinse-Adhäsiven liegt (16;109). Es konnte festgestellt werden, dass der adhäsive Verbund meist in der Adhäsivschicht und nicht im Zahnschmelz bricht, wie es bei Etch&Rinse-Adhäsivsystemen vorkommt (16;109). Auf präparierten Schmelz zeigte AdheSE One Haftwerte von 21 MPa (131).

Im Dentin zeigt AdheSE One Haftwerte von bis zu 31 MPa (132). Wasserlagerung und simulierter Dentinfluidfluss wirken sich negativ auf den adhäsiven Verbund aus. Dieser Effekt ist bei AdheSE One stärker zu beobachten als bei vergleichbaren Ein-Schritt-Adhäsiven (Adper Easy Bond und Clearfil S(3) Bond) (14). Zudem wirkt sich mechanische Belastung der Kompositrestauration negativ auf den Haftverbund aus (15).

2.3 Polymerisation

Unter Polymerisation versteht man eine Reaktion mehrerer kleiner Monomere zu einem Makromolekül unter Aufspaltung von reaktionsfähigen Doppelbindungen oder ringförmigen Atomverbänden (93;103).

2.3.1 Initiatorsysteme und Reaktionsstart

Die Polymerisation eines Kompositos wird über ein Redoxsystem gestartet. Hierbei zerfallen sogenannte Initiatoren, je nach System durch chemische oder physikalische Aktivierung, in energiereiche Moleküle (Radikale). Diese Radikale setzen die Polymerisationsreaktion der Monomere in Gang. Prinzipiell kann zwischen auto- und lichthärtenden Kompositen unterschieden werden, (103;122).

In autopolymerisierenden Systemen ist der Initiator zumeist das Dibenzoylperoxid. Als Akzelerator dient ein tertiäres Amin. Es stellt dabei das Reduktionsmittel des

Initiators dar. Bei chemisch härtenden Massen besteht das System aus zwei Komponenten, durch deren Mischung die Reaktion erzielt wird (93). Im Falle der Lichthärtung wird meist blaues sichtbares Licht (400 nm bis 470 nm Wellenlänge) zur Photopolymerisation verwendet. Bei der Lichthärtung wird ein spezieller Photoinitiator, meist Kampferchinon eingesetzt. Durch Lichtabsorption zerfällt dieser und bildet entweder direkt oder nach Interaktion mit einem spezifischen Akzelerator (tertiäres Amin) Radikale (6;200).

2.3.2 Prägelphase

Diese Radikale spalten Doppelbindungen der Monomere. Dadurch entstehen an den Monomeren Startradikale und ein aktives Zentrum. In der Wachstumsphase reagiert dieses aktive Zentrum mit der Doppelbindung eines Monomers. Dadurch werden die beiden Monomere verbunden und das aktive Zentrum wird an das Kettenende des entstandenen Polymers übertragen. Es kann wieder mit einer Doppelbindung reagieren. Dadurch entsteht eine Kettenreaktion, die als radikalische Polymerisation bezeichnet wird. Bei dieser Polymerisation entfallen keine Nebenprodukte, d.h. das prozentuale Verhältnis der Zusammensetzung des Endproduktes ist dem der Ausgangsprodukte identisch (93). Jedoch kommt es infolge der Verringerung des intermolekularen Abstandes von 0,3 nm bis 0,4 nm auf 0,154 nm zur Polymerisationsschrumpfung (93;127). In der Prägelphase sind die Monomere noch gegeneinander beweglich und die Polymerisationsschrumpfung kann durch Nachfließen von Komposit ausgeglichen werden (43).

2.3.3 Gelpunkt und Postgelphase

Die Fließfähigkeit des Materials endet am sogenannten Gelpunkt. Der Gelpunkt ist der Zeitpunkt an dem die Polymerketten aufgrund ihrer Länge nicht mehr gegeneinander verschiebbar sind. Nach Eintreten dieses Gelpunktes läuft die Polymerisation weiter. Da kein Komposit mehr nachfließen kann, entstehen Spannungen in der Kompositmasse (43;74). Gestoppt wird die Wachstumsreaktion durch die Reaktion zweier aktiver Zentren miteinander oder wenn die Konzentration an unreaktierten Monomeren so gering wird, dass die Distanz zwischen radikalischem Polymerende und Monomer zu groß für eine Reaktion ist. Außerdem wird die Reaktion abgebrochen, sobald das Radikal mit einem Sauerstoffmolekül reagieren

kann, wobei Peroxide entstehen. Dies führt zu einer sogenannten Sauerstoffinhibitionsschicht, in der die Konzentration an unveränderten Monomeren relativ hoch bleibt (165).

2.3.4 Konversionsrate

Die Konversionsrate ist definiert als der Polymerisationsgrad, also der Umsatz von Monomer zu Polymer (121). Diese Rate erreicht nie 100 %, d.h. es bleibt immer ein gewisser Rest an unreagiertem Monomer im Material vorhanden, bis zu 45% (93). Je niedriger die Konversionsrate eines dentalen Komposit, desto geringer sind Farbstabilität, Verschleißfestigkeit und Pulpenfreundlichkeit (93;94). Die Konversionsrate kann durch die Schichtdicke, die Viskosität und Matrixzusammensetzung des auszuhärtenden Komposit, die Lichtintensität der Polymerisationslampe und die Umgebungstemperatur beeinflusst werden (11). Einen geringeren Einfluss auf die Konversionsrate hat das Initiatorsystem (54). Um eine klinisch akzeptable Polymerisationsrate zu erzielen, wird eine Belichtungsdosis von 300 mWs/cm² empfohlen (114). Die Lichtöffnung der Polymerisationslampe sollte dabei so nah wie möglich an die Restauration geführt werden, da die Lichtintensität direkt proportional zum Quadrat des Abstands abnimmt (93). Die maximalen Schichtdicken des zu polymerisierenden Komposit und die minimalen Belichtungszeiten sind von der Materialzusammensetzung abhängig und können sich somit je nach Hersteller und Material unterscheiden.

2.4 Polymerisationsschrumpfung

Polymerisationsschrumpfung ist die volumetrische Schrumpfung, die ein Komposit während seiner Polymerisation erfährt. Die Polymerisationsschrumpfung kommt dadurch zustande, dass die vorher nur durch schwache van-der-Waals-Bindung zusammengehaltenen Monomere der Kompositmatrix näher zusammenrücken und kovalente Bindungen eingehen (124). Da der mittlere Abstand von kovalent gebundenen Monomeren geringer als der lockere van-der-Waals- Verbund schrumpft die Kompositmatrix zwischen 10 und 20 Volumenprozent (62;124). Die Schrumpfung

ist von den Aktivierungsbedingungen der Polymerisationslampe und von Typ und Konzentration der Initiatormoleküle abhängig (192).

Um diese immensen Schrumpfungswerte zu reduzieren, brachte man anorganische Füllkörper in die Kompositmatrix ein, denn je höher der Füllkörperanteil desto geringer ist die Schrumpfung des Komposit (144), da das Füllervolumen über den Polymerisationsprozess hinweg konstant bleibt. Der Anteil an Füllpartikeln lässt sich allerdings nicht beliebig erhöhen (193). Außerdem steigt mit einem größeren Fülleranteil der E-Modul des Komposit und damit die Stressbelastung (37). Durch das Einbringen von Füllkörpern in die Matrix konnte die Schrumpfung von modernen Dentalkompositen (auf bis-GMA-Basis) auf Werte zwischen 1,7 % und 3 % gesenkt werden (93). Weitere Möglichkeiten, die Auswirkungen der Polymerisationsschrumpfung bei Kompositrestaurationen zu verringern, werden im Kapitel Polymerisationsstress beschrieben.

2.5 Polymerisationsstress

Das Auftreten von Kräften in kontrahierenden Materialien wurde in der dentalen Literatur zuerst von Bowen 1967 beschrieben (24). Wenn während der Polymerisationsreaktion der „Gelpunkt“ erreicht ist, besteht ein unlösliches Netzwerk innerhalb der Kunststoffmatrix. Der E-Modul des Komposit hat sich hier deutlich erhöht und damit ist die Matrix zu starr, um die Polymerisationsschrumpfung durch plastische Verformung auszugleichen. Da keine plastische Verformung im Komposit mehr möglich ist, entsteht durch die Polymerisationsschrumpfung Stress innerhalb der Kompositmatrix. Der Polymerisationsstress zeigt sich als Spannung im Komposit und als Kraft, die auf die angrenzende Adhäsivschicht und die Kavitätenwände wirkt. (28;42;60).

Der Stress ist ein Produkt des E-Moduls und der Verformung des Komposit (62). Daher werden besonders hohe Stressbelastungen bei Materialien gemessen, die eine hohe volumetrische Schrumpfung und einen hohen E-Modul aufweisen. Jedoch kann der Stress eines Füllungsmaterials nicht nur aus diesen beiden endgültigen Werten errechnet werden, da das polymerisierte Komposit kein rein elastischer

Festkörper ist und daher plastische Nachfließvorgänge die Stresswerte verringern können (62).

Stress wird allerdings nicht rein aus den Schrumpfungskräften generiert. Auch die durch den exothermen Polymerisationsprozess freigesetzte Wärme und die von außen z.B. durch eine Polymerisationslampe zugeführte Wärme tragen zu einer Belastung bei. Es entstehen Stressbelastungen zwischen Füllpartikeln und der Kunststoffmatrix, da die Wärmeausdehnungskoeffizienten dieser Bestandteile typischerweise in fünf- bis achtfacher Größenordnung differiert (62). Hier trägt die Silanbindung zwischen Füllstoffen und der Matrix zu einer gehinderten separaten Wärmeexpansion bei und damit entsteht Stress. Außerdem entstehen zwischen Komposit und Zahnhartsubstanz durch deren unterschiedliche thermische Expansionskoeffizienten Belastungen. Die typischen Ausdehnungskoeffizienten betragen hier 28 bis 50 ppm/°C für Kompositmaterialien, 11 ppm/°C für Dentin und 17 ppm/°C für Zahnhartsubstanz (7;158;193). Ebenso sind die Belastungswerte von geometrischen Gegebenheiten der präparierten Kavität abhängig. (60). Weiterhin beeinflusst das Volumen des zu polymerisierenden Komposit den Polymerisationsstress (138). In Abbildung 6 und Tabelle 1 sind die Polymerisationsschrumpfungs- und Polymerisationsstresswerte der in dieser Arbeit untersuchten Komposite dargestellt.

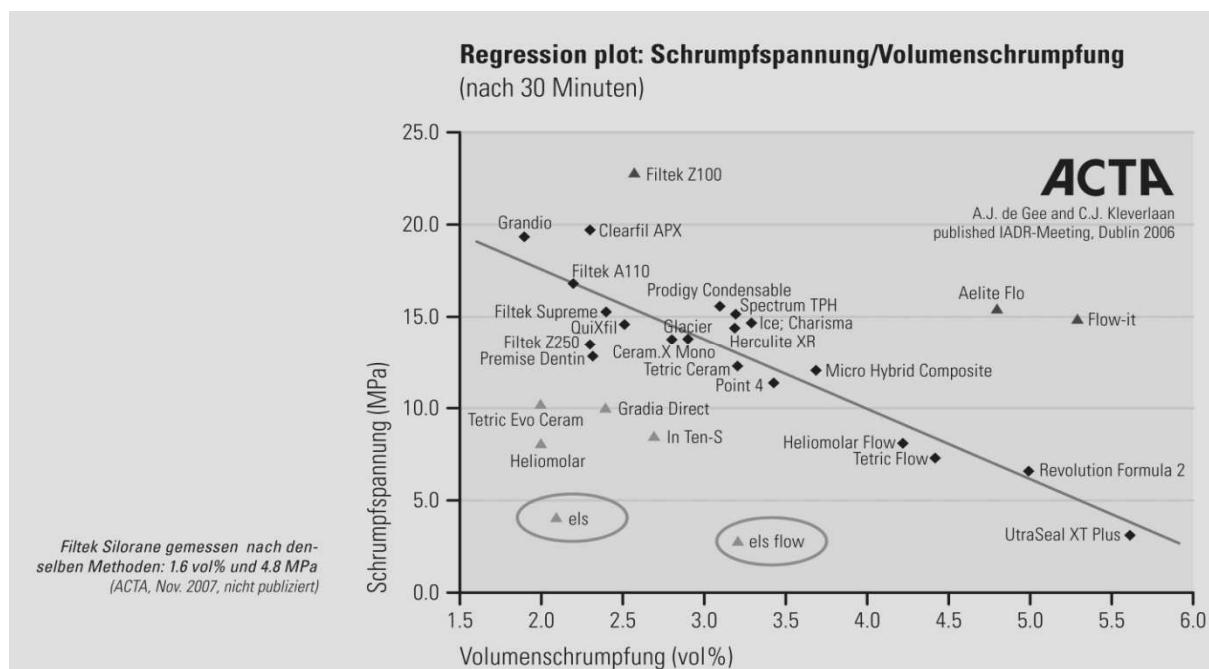


Abbildung 6: Kompositmaterialien mit unterschiedlichen Schrumpfungs- und Spannungswerten nach DE GEE et al (44)

Volumetrische Schrumpfung und Kontraktionsstress nach 30 min nach Polymerisation		
Komposit	Schrumpfung in Volumenprozent	Kontraktionsstress in MPa
els	2,1	4,2
Tetric Evo Ceram	2,0	10,6
Grandio	1,9	20,0

Tabelle 1: Schrumpfung und Kontraktionsstresswerte der verwendeten Komposite aus „Characterization of composites to their shrinkage and contraction stress“ DE GEE, KLEVERLAAN et al. (44)

An den Arealen, an denen die Schrumpfungs Kräfte höher sind als die Haftkräfte zwischen Komposit und Zahnoberfläche, entstehen Spalten, welche das Risiko postoperativer Sensibilitäten und von Sekundärkaries deutlich erhöhen (53). Diese Spalten stellen ein großes Problem dar, da sie bei 14 % bis 54 % der gebondeten Fläche nachweisbar sind (84). Außerdem kann Kontraktionsstress zu Schmelzrissen (107) und Lageveränderung der benachbarten Höckerspitzen des restaurierten Zahnes führen (5).

Es gibt verschiedene Ansätze, mit denen versucht wird, die Auswirkungen der Polymerisationsschrumpfung und dem damit verbunden Polymerisationsstress in dentalen Kompositrestaurationen zu vermindern. Ein Ansatz ist die Veränderung des Kavitätendesigns. Dieser Ansatz geht auf Feilzer et al. (60) zurück. Sie fanden heraus, dass der C-Faktor einen Einfluss auf die Größe des Polymerisationsstresses hat. Der C-Faktor beschreibt hier das Verhältnis von Kontaktfläche Zahnhartsubstanz-Füllung zur freien Oberfläche der Füllung (60). Es wird angenommen, dass eine Kompositfüllung mit großer freier Oberfläche in Relation zu kleiner gebondeter Oberfläche niedrigere Stresswerte aufweist, da die Schrumpfung des Komposit an der freien Oberfläche nicht behindert wird. Diese Hypothese wurde 1999 (202) und 2002 (146) bestätigt. Folglich ist der Polymerisationsstress in flachen und breiten Kavitäten viel geringer als in schmalen und tiefen. Da jedoch das Design der Kavität bei Kompositrestaurationen fast immer vom kariösen Defekt bestimmt wird und das Volumen des eingebrachten Komposit den Schrumpfungsstress stark beeinflusst (138), ging man dazu über, anstatt die Kavität komplett mit Komposit zu füllen und dieses in einem Schritt auszuhärten, dies in mehreren Schichten einzubringen und diese einzeln auszuhärten. Dabei wird der C-Faktor ausgenutzt, der bei jeder teilweisen Füllung einer Kavität kleiner ist als bei der kompletten Füllung (149).

Während der Prägelphase entsteht wegen der plastischen Verformbarkeit des Komposit kein Polymerisationsstress. Deshalb wird durch die Soft-Start-Polymerisation versucht die Prägelphase zu verlängern. Dadurch bilden sich dadurch geringere Spannungen im Komposit. Bei dieser Technik wird das Komposit zuerst mit Licht geringer Intensität ausgehärtet, um es möglichst lange in der Prägelphase zu halten. Anschließend wird das Komposit dann mit Licht hoher Intensität vollständig auspolymerisiert.

2.6 In vitro-Testverfahren

Klinische Studien sind die effektivste Methode dentale Restaurationen auf ihre Tauglichkeit zu testen. Aber aufgrund ethischer Überlegungen, dem hohen Aufwand und der zum Teil schlechten Patientenkompliance gelten in vitro Untersuchungen als Standard in der zahnmedizinischen Wissenschaft und Forschung (90). Sie sind relativ kostengünstig, reproduzierbar und man kann den Einfluss einzelner Versuchparameter gezielt untersuchen. Idealerweise sind diese Ergebnisse dann direkt auf das klinische Verhalten übertragbar, was aber leider in der Realität nicht immer der Fall ist (66;90). Im Patientenmund spielen Faktoren wie Dentinliquorfluss, die Reaktion eines Zahns aufgrund seiner Vitalität, die exakte Zusammensetzung der umgebenden Flüssigkeit (menschlicher Speichel) eine Rolle, die in vitro nicht oder nur mit großem technischen Aufwand simulierbar sind. (81)

2.6.1 Physikalisch-mechanische Tests

Parameter dentaler Werkstoffe wie Bruchfestigkeit, Biegefestigkeit, Verbundhaftkraft, Bruchdehnung, Härte und Elastizitätsmodul können mittels definierter Probekörper in vitro untersucht werden. Die Vorteile derartiger Prüfverfahren sind die große Präzision, mit der die Parameter an Prüfmaschinen eingestellt werden können. Eine Korrelation mit der klinischen Situation ist allerdings nur beschränkt möglich (65;81).

2.6.2 Simulationstests

Präklinische Untersuchungen der marginalen Adaption adhäsiver Restaurationen können mittels Simulationstests durchgeführt werden. Hierbei soll das Vorgehen möglichst dem in vivo entsprechen. Dies bedeutet, dass bei Anfertigung und Ausarbeiten der Restaurationen entsprechend dem klinischen Vorgehen verfahren werden sollte und somit auch die Versuchszähne nie austrocknen sollten. Die Proben sind also immer in flüssigem Milieu aufzubewahren (172).

Um in vitro das Mundhöhlenmilieu zu simulieren, können bei Randspaltuntersuchungen und Haftprüfungen die Restaurationen an extrahierten Zähnen zyklischen Temperaturwechselbelastungen und mechanischen Belastungen ausgesetzt werden. Diese simulierte Kaubelastung erfolgt durch mechanische, punktuelle Druckbelastung bei 49,5 N oder bei 72,5 N, sowie Temperaturwechsel zwischen 5 °C und 55 °C. Da diese Werte als minimal und maximal tolerierbare Temperaturen in der Mundhöhle angenommen werden (163;193;195). Zudem entspricht die Kraft von 72,5 N ungefähr dem Mittel der im menschlichen Gebiss auftretenden Kräfte bei der Nahrungszerkleinerung von 20 N bis 160 N (33).

Allein der Temperaturwechsel kann aufgrund der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten direkt eine Spaltbildung an der Restaurationsgrenze hervorrufen (203). In vivo soll die Kaubelastung des Zahns eine große Rolle spielen (172). Beim Vergleich von 130 Thermocycling Tests zeigte sich (71), dass die meisten Autoren 5 °C als untere Temperaturgrenze und 55 °C als oberen Temperaturwert gebrauchen. Die Zyklusanzahl ist bei den einzelnen Studien variabel zwischen 1 und 1.000.000, wobei im Mittel 500 Zyklen gefahren werden (1). Nach KREJCI et al. (115) entsprechen 250.000 Zyklen einer in vivo Belastungsdauer von einem Jahr. Die Verweildauer im Temperaturbad liegt durchschnittlich bei 30 s, wird aber nicht immer angegeben

2.6.3 Quantitative Auswertungsmethoden der marginalen Adaption

Zur Erfassung der Randqualität adhäsiv befestigter Füllungsmaterialien haben sich zwei Untersuchungsmethoden bewährt: Zum Einen werden Farbpenetrationsverfahren mit unterschiedlichen Chemikalien angewendet, zum Anderen haben sich

auch quantitative und qualitative Randanalysen im Rasterelektronenmikroskop an Replikaten der Probenkörper etabliert. Hier wird nur auf die Untersuchung mittels Farbpenetration näher eingegangen, da diese in der vorliegenden Studie zur Anwendung kommt.

2.6.3.1 Farbpenetrationstests

Die Randdichtigkeit von dentalen Füllungsmaterialien ist eine klinisch wichtige Eigenschaft. Über Randspalten können Chemikalien und Bakterien zwischen Zahn und Restauration eindringen mit der Folge von ästhetisch störenden Verfärbungen und Sekundärkaries bis hin zu Pulpairritationen (93). So wird in vitro in Farbpenetrationstests die Diffusion von Farblösungen entlang der Grenze Zahnhartsubstanz/Füllungsmaterial ausgenutzt und so nach verschiedenen Kriterien die marginale Integrität bewertet. Es werden diverse Reagenzien als Färbelösung verwendet wie z.B. Silbernitrat (88), basisches Fuchsin (118;134), Methylenblau (197) oder Fluoreszenzfarbstoffe (180). Durch die Auswahl des Färbereagenz kann bestimmt werden, welche „Spaltform“ untersucht werden soll. So können z.B. Fuchsin und Methylenblau aufgrund ihrer Molekülgröße und Ladung sehr wohl in makroskopische Randspalten und in Microleakage (Spalträume die durch Schrumpfungsvorgänge bei der Polymerisation entstehen) eindringen, jedoch nicht in Nanoleakage Bereiche. (57;143).

In der hier vorliegenden Studie wurde Silbernitrat als Färbelösung verwendet. Mit Silberionen kann man alle an Kompositrestaurationen vorkommenden Spaltformen inklusive der Nanoleakage sichtbar machen, da das Silberion mit einem Durchmesser von 0,059 nm sehr klein ist und dadurch in alle Spalträume vordringen kann (191).

Zur Auswertung der so gefärbten Spalträume kann die Eindringtiefe der Farbe an Schnitten der Zähne über ein Lichtmikroskop linear beurteilt werden (40;118;184). Es kann ein einzelner Schnitt durch den Zahn und Restauration oder auch mehrfache Schnitte erfolgen, um die Farbeindringtiefe an verschiedenen Stellen zu beurteilen (78;116;140). Nachteil bei der Anfertigung von Schnitten ist, dass eine Erfassung des gesamten Füllungsrandes nicht möglich ist (72). Des weiteren besteht die Möglichkeit, die Mineralien aus der Zahnhartsubstanz zu lösen, um eine

dreidimensionale Beurteilung der Farbstoffpenetration an der herausgelösten Füllung zu ermöglichen (95).

3. Fragestellung

Ziel der vorliegenden in vitro Untersuchung war es, mit Hilfe eines Farbpenetrationstest zu ermitteln, in wie weit die Anwendung eines selbstätzenden Adhäsivsystems die marginale Integrität von konventionellen Kompositen in Klasse-V-Kavitäten beeinflussen kann. Die Bestimmung der marginalen Integrität erfolgt sowohl vor als auch nach thermomechanischer Wechselbelastung.

Folgenden Fragen sollte im Einzelnen nachgegangen werden:

- 1.) Welchen Einfluss hat das Adhäsivsystem auf die marginale Integrität an den Grenzflächen Schmelz/Komposit und Dentin/Komposit?
- 2.) Welchen Einfluss haben konventionelle Komposite auf die marginale Integrität an den Grenzflächen Schmelz/Komposit und Dentin/Komposit bei gleichen Schrumpfungs- und unterschiedlichen Polymerisationsstresswerten?
- 3.) Welchen Einfluss hat die thermomechanische Wechselbelastung (TCML) auf die marginale Integrität an den Grenzflächen Schmelz/Komposit und Dentin/Komposit?

4. Material und Methode

Abbildung 7 zeigt eine Übersicht über Ablauf der Methodik.

4.1 Untersuchungsgut und Vorbereitung

Für die vorliegende in vitro-Studie dienten 144 extrahierte, kariesfreie Molaren als Versuchsobjekte. Besonderes Augenmerk galt der Unversehrtheit der vestibulär-zervikalen Fläche der Zähne. Die Molaren wurden nach der Extraktion bis zur Bearbeitung in 0,5%iger Chloraminlösung [M1] gelagert und desinfiziert. Anhaftendes Weichgewebe wurde mit Küretten [M2] und anschließender Politur der Zähne mit Bimsmehl und Occlubrush [M3] entfernt. Im Anschluss wurden die Apices der Zähne mit Stangenguttapercha [M4] verschlossen, um später eine retrograde Farbpenetration durch das Pulpenkavum zu vermeiden. Die so vorbereiteten Zähne wurden mit Pattern Resin [M5] gesockelt, um sie später in die Aufnahmeverrichtung der TCML-Maschine stellen zu können. Bis zur weiteren Bearbeitung wurden die Zähne in physiologischer Kochsalzlösung [M6] bei 5 °C gelagert.

4.2 Präparation

An allen 144 Zähnen wurde eine genormte Klasse-V-Kavität am vestibulären Zahnhalsbereich geschaffen. Folgende Präparation wurde durchgeführt. Es wurde jeweils eine vestibulär-zervikale Kavität entlang der Schmelz-Dentingrenze, Höhe ca. 3 mm, Breite ca. 6 mm und 1,5 mm Tiefe präpariert (halb im Schmelz halb im Dentin). Präparation und Finieren wurde mit einer Diamantkugel von 1,8 mm (Präparationsinstrument) bzw. 2,3 mm (Finierinstrument) [M7] Durchmesser durchgeführt. Gemäß der klinischen Vorgehensweise wurde der Schmelzrand mit einer 1 mm breiten Abschrägung mit einer roten Finierflamme [M8] versehen, siehe Abbildung 8.

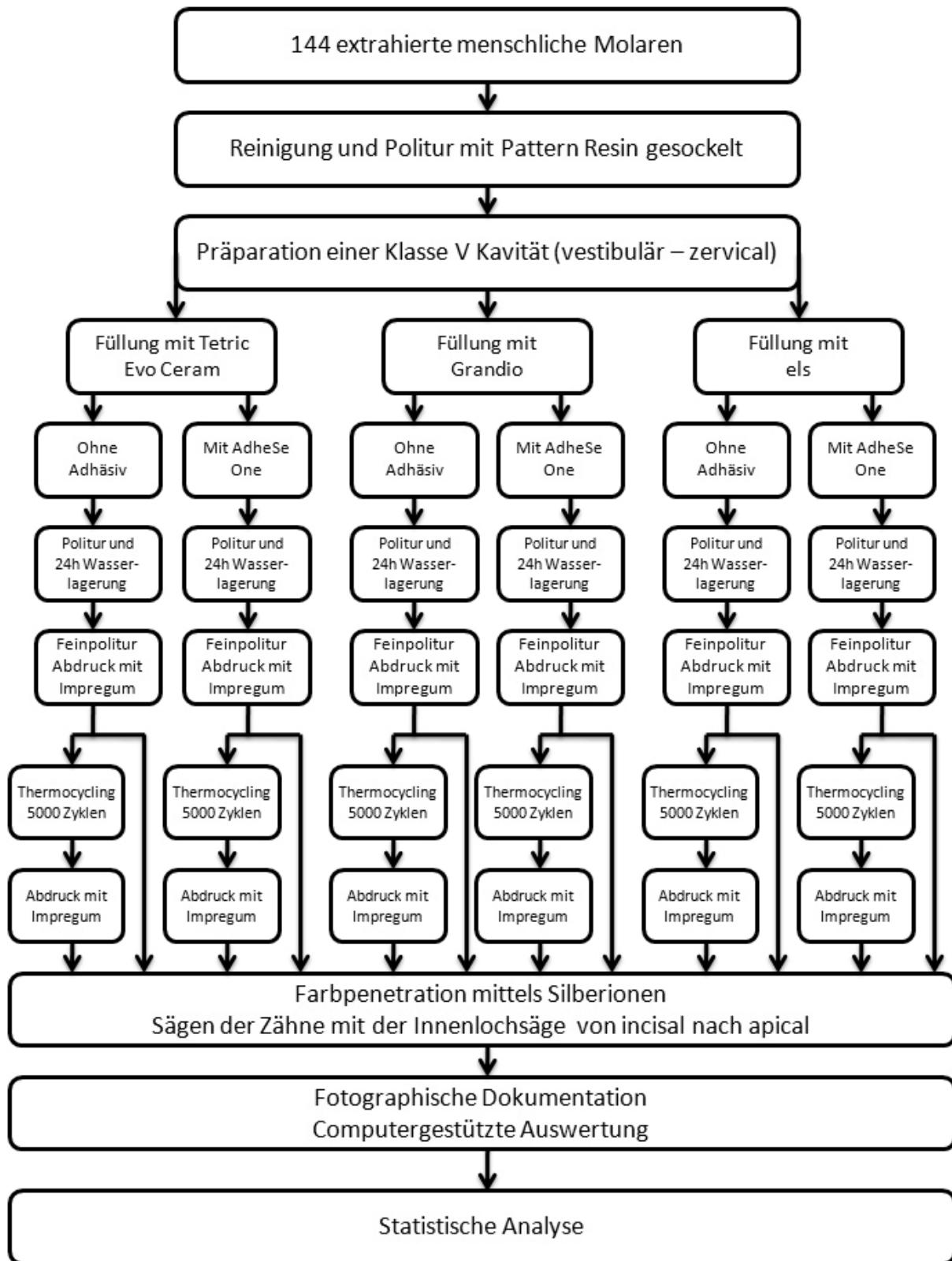


Abbildung 7: Flussdiagramm zum Ablauf der Methodik

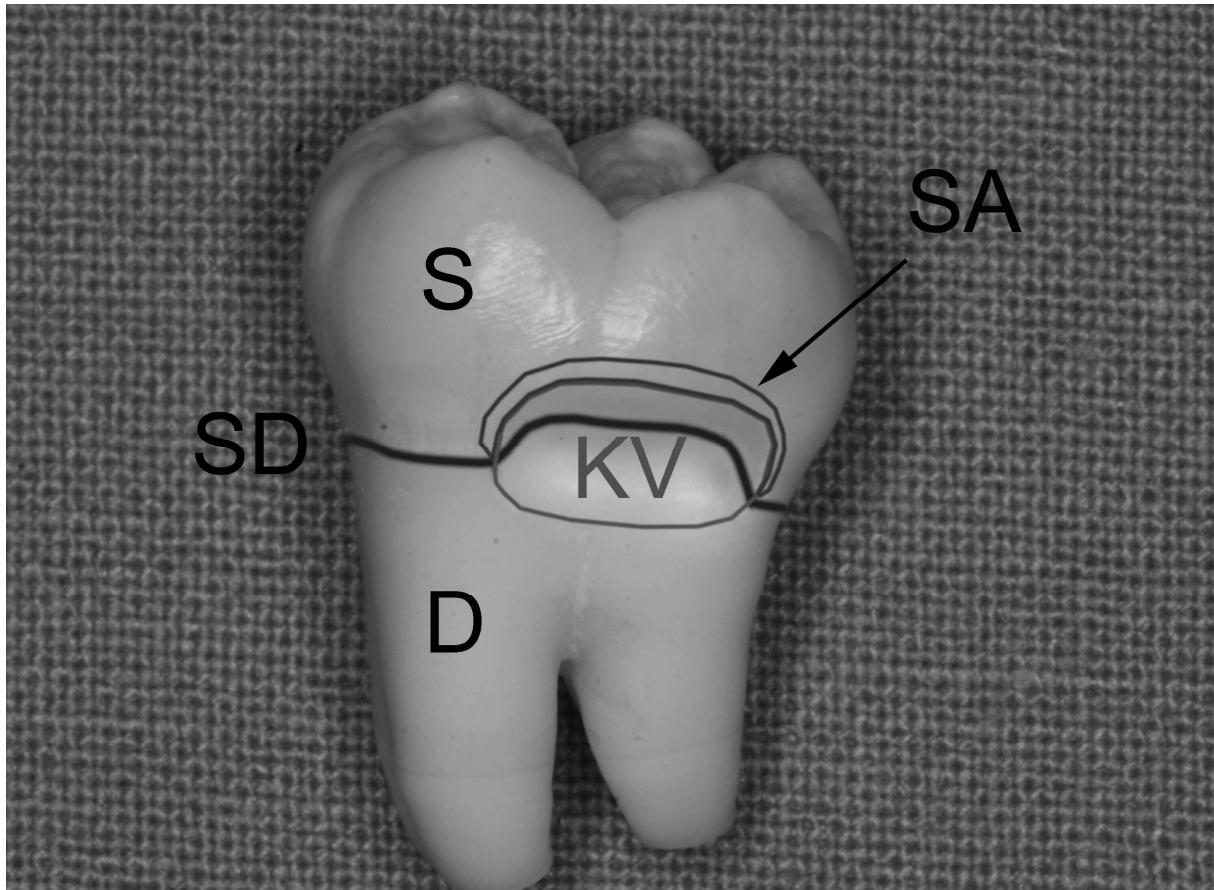


Abbildung 8: Präparation

S	= Zahnschmelz
SD	= Schmelz-Dentingrenze
D	= Dentin
KV	= Klasse-V-Kavität
SA	= Schmelzanschrägung

4.3 Prüfgruppen

Die Versuchszähne wurden randomisiert in 12 Gruppen eingeteilt. Die Gruppen unterscheiden sich in Füllungswerkstoff, Adhäsivanwendung und Zeit (vor, bzw. ohne thermomechanischer Wechselbelastung oder nach thermomechanischer Wechselbelastung).

Gruppe	Material	Adhäsiv	Zeit
1	els	kein	ohne TCML
2	els	AdheSE One	ohne TCML
3	els	kein	mit TCML
4	els	AdheSE One	mit TCML
5	Grandio	kein	ohne TCML
6	Grandio	AdheSE One	ohne TCML
7	Grandio	kein	mit TCML
8	Grandio	AdheSE One	mit TCML
9	Tetric Evo Ceram	kein	ohne TCML
10	Tetric Evo Ceram	AdheSE One	ohne TCML
11	Tetric Evo Ceram	kein	mit TCML
12	Tetric Evo Ceram	AdheSE One	mit TCML

Tabelle 2: Aufteilung der Prüfgruppen

4.4 Herstellung der Kompositfüllungen

Die Zahnhalskavitäten der Zähne wurden entsprechend ihrer Versuchsgruppe gefüllt. Bei den Versuchsgruppen ohne Adhäsiv wurde die Kavität zuerst mit dem Luftbläser getrocknet und dann nach dem Prinzip des Total Etching im Bereich des Schmelzes 30 s im Dentin 15 s mit 37 %iger Phosphorsäure (Total Etch[®]) [M9] geätzt. Das Gel wurde mit Wasser abgesprührt. Anschließend wurde die Kavität vorsichtig mit dem Luftbläser getrocknet.

Kam das Adhäsiv AdheSE One [M10] zum Einsatz, so wurde das Adhäsiv mittels Vivapen und Brushkanüle in die zuvor getrocknete Kavität eingebracht und nach Herstellerangabe 30 s, am Schmelz beginnend, in die Kavität massiert. Der Überschuss an AdheSE One wurde mit dem Luftbläser so lange verblasen, bis kein beweglicher Flüssigkeitsfilm mehr sichtbar war. Im Anschluss wurde das Adhäsiv 10 s mit der Spectrum Curing Light Polymerisationslampe [M11] ausgehärtet.

Als nächstes wurde der Zahn mit dem der Prüfgruppe entsprechenden Komposit gefüllt. Das Komposit wurde mit Hilfe von Kugelstopfer [M12] und Heidemannspartel [M13] in die vorbehandelte Kavität eingebracht, grobe Überschüsse wurden noch vor dem Härteten mit dem Heidemannspartel entfernt. Die fertige Füllung wurde den Herstellerangaben entsprechend mit der Spectrum Curing Light Polymerisationslampe ausgehärtet. Bei den Kompositen els [M14] und Grandio [M15]

betrug die Aushärtungszeit 20 s bei Tetric Evo Ceram [M16] 40 s (laut Herstellerangabe).

Zuletzt wurden die Kompositüberschüsse mit SoflexTM-scheiben der Körnung grob [M17] unter Wasserkühlung entfernt. Die Politur erfolgte mit SoflexTM-scheiben abnehmender Körnung, Brownies [M18], Greenies [M18] und Okklubrush [M3] unter Wasserkühlung (siehe Abbildung 9).

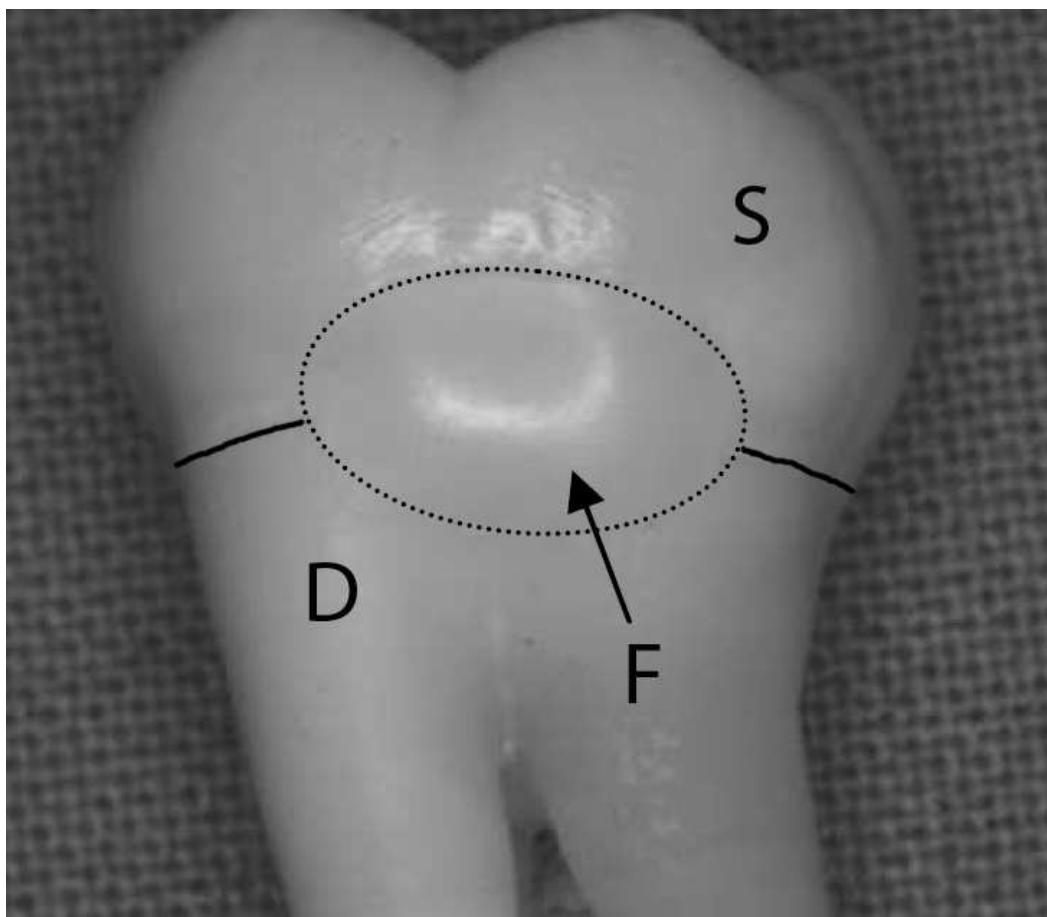


Abbildung 9: Fertige Klasse-V-Füllung F = Füllung, S = Schmelz, D= Dentin

4.5 Lagerung Überschussentfernung

Anschließend lagerten die mit Komposit gefüllten Zähne für 24 h in physiologischer Kochsalzlösung [M6] bei 37 °C im Wärmeschränk [M19]. Bei der erneuten Prüfung der Füllungen wurden die z.T. noch vorhandenen Überschüsse entfernt. Es erfolgte eine erneute Hochglanzpolitur nach oben genanntem Schema.

4.6 Thermomechanische Wechselbelastung (TCML)

Die Probenkörper der Versuchsgruppen 3, 4, 7, 8, 11 und 12 wurden in einer von der Biologiewerkstatt der Universität Regensburg konstruierten Maschine (TCML-Maschine Abbildung 11) [M20] abwechselnd jeweils 30 s in mit 5 °C und 55 °C temperiertes, destilliertes Wasser getaucht. Gleichzeitig wurden die Proben einer okklusalen, punktförmigen Druckbelastung von 72,5 N bei einer Frequenz von 1,5 Hz ausgesetzt. Daraus errechnen sich bei 5000 Zyklen ca. 500.000 Druckbelastungen (entspricht einer Tragedauer von ca. 2 Jahren).



Abbildung 10: TCML Maschine

4.7 Abformung

Die Vestibulärflächen der Zähne der Versuchsgruppen 1, 2, 5, 6, 9 und 10 wurden direkt nach der 2. Politur und die der übrigen Versuchsgruppen unmittelbar vor und nach der thermomechanischen Wechselbelastung mithilfe von Kunststofffeiswürfelformen und Impregum [M21], einem Polyether-Abformmaterial, abgeformt. Diese Abformungen dienten der Herstellung von Replikaten der Versuchszähne aus Replika-Kunststoff (Epoxidharz) Rencast CW 2215 [M22]. Die für eine rasterelektronenmikroskopische Randanalyse verwendet wurden (nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit).

4.8 Farbpenetration

Im Anschluss an die Abformung wurden die Zähne, bis auf die Restauration und einen 1 mm breiten Bereich um diese mit Nagellack [M23] versiegelt, da die Farbpenetration nur von den Füllungsranden her erfolgen sollte (siehe Abbildung 11).



Abbildung 11: Vor Silberpenetration

Dann wurden sie für 2 h bei Raumtemperatur in 50 Gewichtsprozent AgNO_3 (aq.) Lösung [M24] ohne Lichzufuhr gefärbt. Nach diesen 2 h wurden die Probekörper aus dem Silbernitrat entnommen mit Aqua demin. abgespült und für 6 h im Fotoentwickler Tetinal [M25] unter Lichteinwirkung [M26] (Zahnfläche mit Füllung nach oben) fixiert. Anschließend wurden die Zähne nochmal mit Aqua demin. gespült und über Nacht in einer feuchten Kammer bei 6 °C gelagert. Am nächsten Tag wurden sie mit Paladur [M27] auf den Trägern für die Innenlochsäge [M28] fixiert. Unter Wasserkühlung wurde mit einem 300 μm starken Diamantsägeblatt von inzisal Richtung apikal auf Höhe der Füllung beginnend 300 μm dicke Scheiben aus den Versuchszähnen geschnitten, nummeriert und bis zur photographischen Dokumentation für 24h in Petrischalen [M29] gelagert (siehe Abbildung 12).



Abbildung 12: Zahnschnitte

Jeweils beide Seiten eines Schnittes wurden zusammen mit einem Maßstab unter einer auf einem Stativ (Höhe 390 mm) befestigten digitalen Spiegelreflexkamera [M30] mit Ringblitz [M31] fotografiert. Als Lichtquelle dienten vier 60W Glühbirnen die am Stativ um die Kamera angeordnet waren. Um eine optimale Bildqualität zu erzielen, wurden folgende Einstellungen an der Fotokamera gewählt:

Option	Einstellung
Weißabgleichmodus	AWB auto
Verschlusszeit (manuelle Einstellung)	125
Blendenzahl (manuelle Einstellung)	22
Filmtransport	Einzelaufnahme
Messcharakteristik	Selektivmessung
Qualität	Groß/Fein

Tabelle 3: Einstellungen der Digitalkamera

4.9 Farbpenetrationsauswertung

Die Messungen wurden mit Hilfe der Bildanalysesoftware Optimas 6.1 [M32] vorgenommen. Bei der Vermessung der Fotografien wurde die Farbpenetration entlang der Restaurationsgrenze (Schmelz/Dentin und Komposit) bestimmt. Ziel dabei war es eine Übersicht zu bekommen, welchen prozentualen Anteil das bei der Farbpenetration über den Füllungsrand im Schmelz oder/und Dentin eingedrungene Silber im Bezug zur gesamten Kavitätenlänge oder deren Teilkomponenten (Schmelz- bzw. Dentinbereiche) besitzt. Die vier Bewertungskriterien „Schmelz perfekt“ (SP), „Schmelz farbig“ (SF), „Dentin perfekt“ (DP) und „Dentin Farbig“ (DF) ermöglichen die Unterscheidung von gefärbten und ungefärbten Bereichen (siehe Tabelle 3).

Abkürzung	Bewertungsmaßstab	Bewertungscharakteristika
SP	Schmelz Perfekt	Keine Farbpenetration zwischen Füllung und Zahnschmelz zu erkennen
SF	Schmelz Farbe	Farbpenetration zwischen Füllung und Zahnschmelz zu erkennen
DP	Dentin Perfekt	Keine Farbpenetration zwischen Füllung und Dentin zu erkennen
DF	Dentin Farbe	Farbpenetration zwischen Füllung und Dentin zu erkennen

Tabelle 4: Bewertungsparameter

Die Messung erfolgte für die Vorder- und Rückseite jedes Schnittes. Die Längenmessung begann am Füllungsrand im Schmelz, dann wurde die Dentinstrecke und zuletzt der Maßstab gemessen (siehe Abbildung 13).

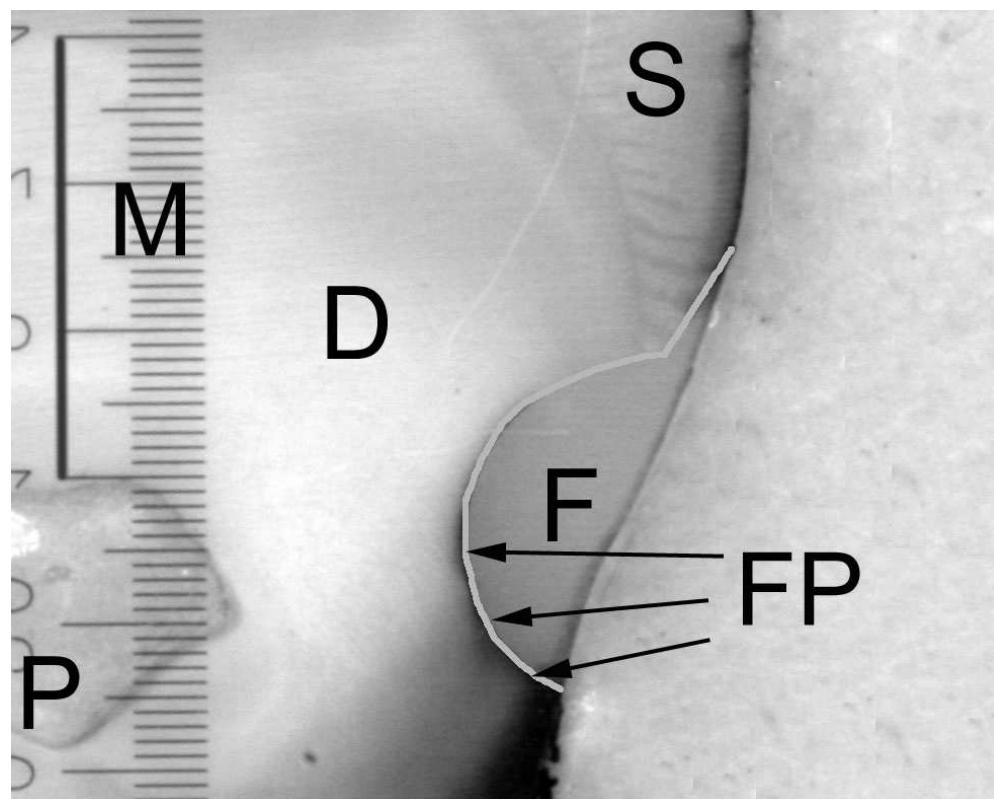


Abbildung 13: Messung eines Zahnschnittes in Optimas 6.1 S = Zahnschmelz, D = Dentin P = Pulpenkammer, F = Füllung, M = Maßstab, FP = Silberpenetration im Dentinbereich

Das Programm berechnete daraus jeweils die prozentualen gefärbten / ungefärbten Anteile an der Gesamtkavität. Die Daten konnten als Einzelparameter (prozentualer Anteil an der Gesamtkavität) automatisch in das Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel [M33] übernommen werden.

Zusätzlich wurde noch mit Hilfe eines vierstelligen Codes die Lage der Farbpenetration ermittelt (Tabelle 5). Untersucht wurde das Eindringen des Silbernitrats vom koronalen und apikalen Füllungsrand beginnend, sowie die Überschreitung der Schmelz-Dentin-Grenze. Die erste Stelle (9) dient lediglich als Platzhalter. Die zweite Stelle beschreibt ein Eindringen von Silbernitrat beginnend im Schmelz gelegenen Füllungsrand. Ein Überschreiten der Schmelz-Dentin-Grenze wurde an dritter Stelle des Codes vermerkt. Die vierte Stelle beschreibt ein Eindringen von Silbernitrat beginnend am apikal gelegenen Füllungsrand. Jede der drei Stellen kann dabei zwei Werte annehmen: „1“ bedeutet, dass eine Farbpenetration vorliegt, „x“ bedeutet, dass eine Farbpenetration vorliegen kann oder auch nicht. Intermittierend auftretende Färbungen fanden keine weitere Berücksichtigung.

Bewertungs- code	Farbpenetration beginnt am koronalen Füllungsrand im Schmelz	Farbpenetration geht über die Schmelz- Zement-Grenze	Farbpenetration beginnt am apikalen Füllungsrand im Dentin
9 1 x x	ja	möglich	möglich
9 x 1 x	möglich	ja	möglich
9 x x 1	möglich	möglich	ja
9 1 x 1	ja	möglich	ja

Tabelle 5: Bewertung der Farbpenetrion im Programm Excel mit vierstelligem Code
Die erste Stelle ist als Reserve (9) vorgesehen. 1 = eine Farbpenetration liegt vor x = es kann eine Farbpenetration an der Stelle vorliegen

4.10 Statistische Auswertung

Die vorliegende in vitro-Studie betrachtet den Einfluss eines Adhäsivsystems auf die marginale Adaptation bei Klasse-V-Restorationen unter Verwendung von drei unterschiedlichen konventionellen Kompositen mit und ohne thermomechanischer Wechselbelastung (TCML). Die Schnitte lieferten Ergebnisse über die

Farbpenetration an der Grenzfläche zwischen Zahnhartsubstanz und Kompositrestauration. Aus den gewonnenen Daten über die Grenzflächen (Schmelz/Komposit und Dentin/Komposit) ließ sich für jeden Zahn ein Maximum der Farbpenetration ermitteln. Mit den erhaltenen Maxima konnte für jede Gruppe ($n = 12$) der Median ermittelt werden. Dabei bedeutet „Prinzip Maximum“ einen Median der Maxima der 12 Zähne pro Gruppe. Aufgrund der fehlenden Normalverteilung erfolgte eine nicht parametrische statistische Analyse der Daten. Mithilfe des Man-Whitney U-Test wurden paarweise Vergleiche hinsichtlich des Einflusses der Parameter „Adhäsiv“, „Komposit“ und „TCML“ für die einzelnen Gruppen durchgeführt und signifikante Unterschiede ($p \leq 0,05$) ermittelt.

Neben der Betrachtung der gesamten Restauration erfolgte in einem weiteren Schritt auch die Beurteilung der Farbpenetration im Innenbereich der Füllung getrennt vom Randbereich. Als Innenbereich definierte man denjenigen Teil der Füllung, bei dem nur noch unwesentliche Veränderungen in der Gesamtkavitätenlänge, (Schmelzlänge plus Dentinlänge) auftraten. Diese Überlegung schien insofern sinnvoll, da im Randbereich ein Eindringen und somit die Silberfärbung nicht nur von koronal oder apikal, sondern auch von mesial oder distal, erfolgen kann (siehe Abbildung 14).

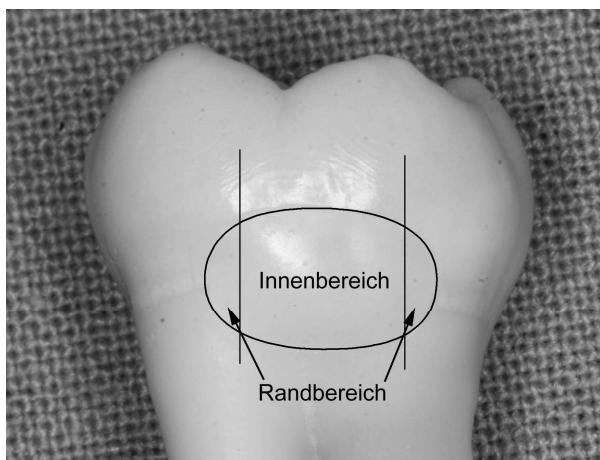


Abbildung 14: Aufteilung der Füllung in Innen- und Randbereich

Um den Einfluss der einzelnen Parameter „Adhäsiv“, „Komposit“ und „TCML“ unabhängig von den anderen Parametern ermitteln zu können, wurde das Signifikanzniveau α entsprechend der Fehlerangleichungsmethode (Error rates method nach Miller, 1981) zu $\alpha^* (k)$ adjustiert, wobei $\alpha^* = 1 - (1 - \alpha)^{1/k}$ gilt und k die Variable für die Anzahl der jeweils paarweise durchgeführten Vergleiche darstellt. Es

besteht dann ein signifikanter Einfluss, wenn eine der Irrtumswahrscheinlichkeiten p aus dem Paarvergleichen für den jeweils untersuchten Parameter kleiner gleich α^* ist. Die Bestimmung der Mediane mit 25 % - und 75 % - Perzentilen für jede Gruppe wurde mit Hilfe des SPSS/PC+ Computerprogramms [M34] ausgeführt. Abschließend wurden entsprechende Graphen mit dem Programm SigmaPlot 11.0 [M35] erstellt und die dazugehörigen Signifikanzen ermittelt (siehe tabellarischer Anhang).

5. Ergebnisse:

5.1 Prozentuale Farbpenetration

Die Werte sind jeweils nach dem Prinzip Maximum dargestellt. Der Maximumwert einer Restauration stellt den „Locus minoris resistentiae“ dar, welcher letztendlich in der klinischen Situation zu einem Versagen der Restauration führen kann. Alle Ergebnisse der Werte nach dem Prinzip Median sind in Tabellen im tabellarischen Anhang aufgeführt. Nullwerte werden zur Kenntlichmachung in den verwendeten Grafiken als Balken in einer Größe von 0,4 % angegeben. Zu den Medianen der Farbpenetration werden im Text, in den Tabellen und bei den Graphen auch die 25 % - 75 % - Perzentile angegeben. Die Werte der Farbpenetration wurden wie folgt zusammengefasst:

1. Zur Übersicht über den Einfluss des Adhäsivsystems werden zunächst die Farbpenetrationswerte, abhängig von den Parametern Adhäsiv, Komposit und TCML, für die gesamte Restauration (Medianwert und 25 % -75 % - Perzentile) zusammengefasst. Weiterhin werden für jeden Ort (Innen- und Randbereich) die Farbpenetrationswerte ermittelt und dargestellt.
2. Um den Einfluss des Adhäsivsystems zu ermitteln, werden außerdem nur die Farbpenetrationswerte im Schmelz bezogen auf die tatsächliche Schmelzlänge abhängig von den Parametern Adhäsiv, Komposit und TCML, (Medianwert und 25 % - 75 % - Perzentile) zusammen-gefasst. Weiterhin werden für jeden Ort (Innen- und Randbereich) die Farbpenetrationswerte dargestellt.
3. Zur Kenntlichmachung des Einfluss des Adhäsivsystems im Dentin, bezogen auf die vorliegende Dentinlänge, werden zunächst alle Farbpenetrationswerte abhängig von den Parametern Adhäsiv, Komposit und TCML, zusammengefasst (Medianwert mit 25 % -75 % - Perzentile). Ferner werden für jeden Ort (Innen- und Randbereich) die Farbpenetrationswerte zusammengefasst.

5.1.1 Farbpenetration gesamte Füllung (Innen- und Randbereich)

5.1.1.1 Farbpenetration insgesamt (Schmelz und Dentin)

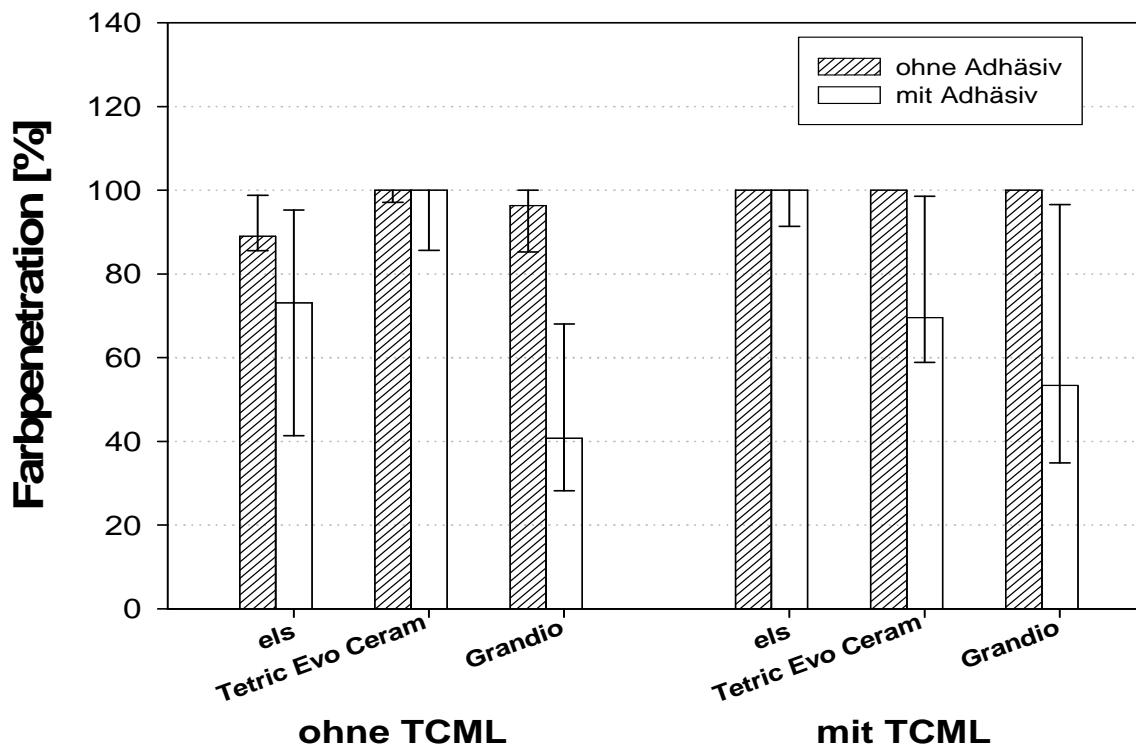


Abbildung 15: Farbpenetration im Schmelz und Dentin entlang der gesamten Restaurationsgrenze (Schmelz und Dentin) in Prozent für die gesamte Restauration. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 15 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte im Schmelz und Dentin entlang der gesamten Restaurationsgrenze (Schmelz und Dentin) in Prozent für die gesamte Restauration. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML, so weist els die niedrigste prozentuale Farbpenetration mit 89,0 % auf. Die anderen beiden Materialien besitzen höhere Penetrationswerte von 96,3 % Grandio und 100 % Tetric Evo Ceram. Allerdings unterscheiden sich die Farbpenetrationswerte der Komposite nicht statistisch signifikant voneinander (vgl. Tabelle 10). Bei

Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML eine Farbpenetration von 73 % bei els, 100 % bei Tetric Evo Ceram und 40,8 % bei Grandio bestimmt werden. Zwischen Grandio und Tetric Evo Ceram besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($p = 0,001$, vgl. Tabelle 11), wobei die Farbpenetration bei Grandio statistisch signifikant geringer ist als bei Tetric Evo Ceram. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden sich ohne TCML die Komposite els ($p = 0,02$) und Grandio ($p = 0$) statistisch signifikant in den Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 9). Bei beiden Kompositen sind die Farbpenetrationswerte mit Adhäsivanwendung signifikant geringer als ohne Adhäsivanwendung.

Nach TCML beträgt die Farbpenetration bei allen Kompositen ohne Adhäsivanwendung 100 %. Es sind auch statistisch keine signifikanten Unterschiede in den Farbpenetrationswerten erkennbar. Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man für els 100 % Farbpenetration, 69,6 % für Tetric Evo Ceram und 53,4 % für Grandio. Dabei hatte els sowohl statistisch signifikant höhere Farbpenetrationswerte als Tetric Evo Ceram ($p = 0,01$, vgl. Tabelle 22) und Grandio ($p = 0,006$, vgl. Tabelle 11). Betrachtet man die Farbpenetration im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) so war sie bei Tetric Evo Ceram ($p = 0,002$) und Grandio ($p = 0,001$) mit Adhäsivanwendung statistisch signifikant geringer (vgl. Tabelle 9).

Vergleicht man die Farbpenetration in Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzt diese nur beim Komposit els, sowohl ohne als auch mit Anwendung des Adhäsivs AdheSE One einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration ($p = 0,007$ ohne Adhäsiv, $p = 0,014$ mit Adhäsiv, vgl. Tabelle 12). Die Farbpenetrationswerte vor TCML waren in beiden Fällen kleiner als nach TCML.

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des Adhäsivs, unabhängig der Parameter „Komposit“ und Zeit, ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 9). Der Einfluss des Parameters „Zeit“ ergibt unabhängig von den anderen beiden Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ ebenfalls einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0,007 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 12). Hinsichtlich des Einflusses des Parameters

Komposit“ ergibt sich ebenfalls ein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,001 \leq \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 10 und 11).

5.1.1.2 Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelz-Komposit-Grenzfläche

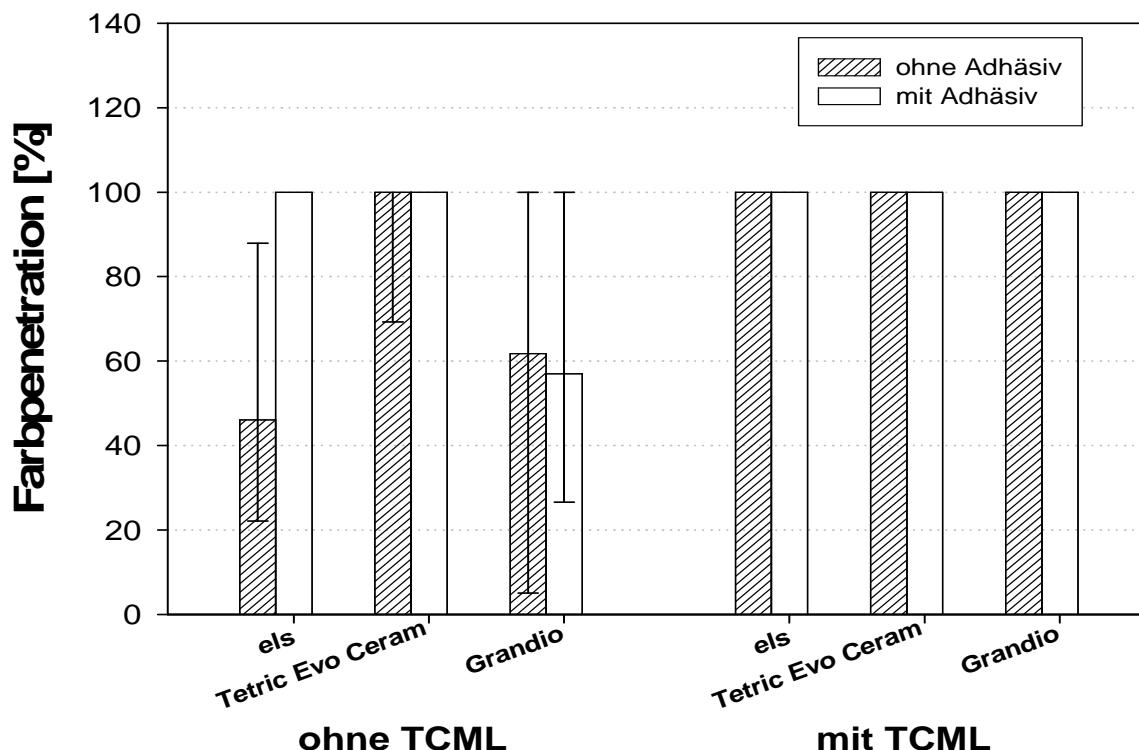


Abbildung 16: Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelz-Komposit-Grenzfläche in Prozent für die gesamte Restauration. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 16 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte Schmelz bezogen auf die Schmelz-Komposit-Grenzfläche in Prozent für die gesamte Restauration. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML, so weist els 46,1 % Farbpenetration auf, Tetric Evo Ceram 100,0 % und Grandio 61,8 %. Allerdings unterscheiden sich die Farbpenetrationswerte der Komposite nur bei els und Tetric Evo Ceram ($p = 0,02$, vgl. Tabelle 10) statistisch signifikant voneinander. Dabei ist die Farbpenetration bei els statistisch signifikant geringer als die von Tetric Evo Ceram. Bei Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML eine Farbpenetration von 100 % bei els, 100 % bei Tetric Evo Ceram und 57,0 % bei Grandio bestimmt werden. Zwischen Grandio und els ($p = 0,014$, vgl. Tabelle 11) und Grandio und Tetric Evo Ceram ($p = 0,002$, vgl. Tabelle 11) besteht ein statistisch signifikanter Unterschied in den Farbpenetrationswerten. Dabei weist Grandio statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte als els und Tetric Evo Ceram auf. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden sich ohne TCML nur das Komposit els $p = 0,014$ statistisch signifikant in den Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 20). Beim Komposit els sind die Farbpenetrationswerte ohne Adhäsivanwendung signifikant geringer als mit Adhäsivanwendung.

Nach TCML betrug die Farbpenetration bei allen Kompositen ohne Adhäsivanwendung 100 %. Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischer Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man ebenfalls für alle Komposite eine vollständige Farbpenetration von 100 % (vgl. Tabelle 6). Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheidet sich mit TCML nur das Komposit Tetric Evo Ceram $p = 0,002$ statistisch signifikant in den Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 20). Dieser Unterschied ist allerdings nur von theoretischer Relevanz, da sowohl mit als auch ohne Adhäsivanwendung eine vollständige Farbpenetration vorliegt.

Vergleicht man die Farbpenetration in Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzen ohne Adhäsivanwendung die Komposite els ($p = 0,002$, vgl. Tabelle 12) und Grandio ($p = 0,024$, vgl. Tabelle 12) vor TCML statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte als danach. Bei der Anwendung des Adhäsivs AdheSE One ergibt sich beim Komposit Grandio einen statistisch signifikanter Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration ($p = 0$ vgl. Tabelle 12). Die Farbpenetrationswerte vor TCML waren dabei geringer als nach TCML.

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des „Adhäsivs“, unabhängig der Parameter „Komposit“ und „Zeit“, ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0,002 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 9). Der Einfluss des Parameters „Zeit“ ergibt unabhängig von den anderen beiden Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ ebenfalls einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0,002 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 12). Hinsichtlich des Einflusses des Parameters „Komposit“ ergibt sich ebenfalls ein statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0,002 \leq \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 10 und 11).

5.1.1.3 Farbpenetration im Dentin bezogen auf die Dentin-Komposit-Grenzfläche

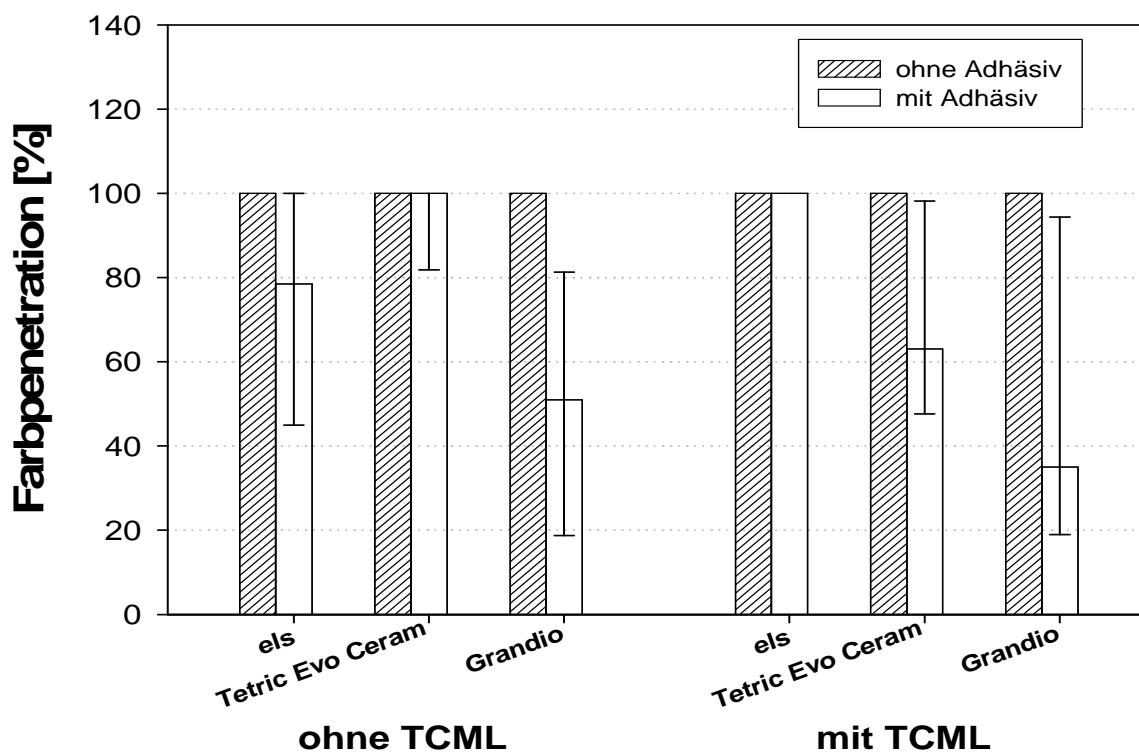


Abbildung 17: Farbpenetration im Dentin bezogen auf die Dentin-Komposit-Grenzfläche in Prozent für die gesamte Restauration. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Abbildung 17 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte im Dentin bezogen auf die Dentin-Komposit-Grenzfläche in Prozent für die gesamte Restauration. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML, so weisen alle Komposite eine vollständige Farbpenetration von 100 % auf. Folglich gibt es keine signifikanten Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Komposite. Bei Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML eine Farbpenetration von 78,5 % bei els, 100 % bei Tetric Evo Ceram und 51,0 % bei Grandio bestimmt werden. Zwischen Grandio und Tetric Evo Ceram besteht ein statistisch signifikanter Unterschied $p = 0,02$ (vgl. Tabelle 11) in den Farbpenetrationswerten. Dabei weist Grandio statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte als Tetric Evo Ceram auf. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden sich alle Komposite ohne TCML statistisch signifikant in ihren Farbpenetrationswerten (els $p = 0,007$, Tetric Evo Ceram $p = 0,028$, Grand $p = 0$, vgl. Tabelle 9). Dabei weisen els und Grandio ohne Adhäsivanwendung signifikant geringere Farbpenetrationswerte auf. Bei Tetric Evo Ceram ist der Unterschied nur von theoretischer Relevanz, da die Farbpenetrationswerte sowohl mit, als auch ohne Adhäsivanwendung 100 % betragen.

Nach TCML beträgt die Farbpenetration bei allen Kompositen ohne Adhäsivanwendung 100 %. Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man für els 100 % Farbpenetration, für Tetric Evo Ceram 63,1 % und für Grandio 35,0 %. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden els ($p = 0,01$), Tetric Evo Ceram ($p = 0$) und Grandio ($p = 0$) statistisch signifikant in ihren Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 9). Dabei weisen Tetric Evo Ceram und Grandio geringere Farbpenetrationswerte auf. Beim Komposit els ist dieser statistische Unterschied nur von theoretischer Relevanz, da sowohl mit, als auch ohne Adhäsivanwendung eine vollständige Farbpenetration vorliegt.

Vergleicht man die Farbpenetration im Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzt diese bei keinem der Komposite ohne Adhäsivanwendung einen Einfluss auf die Farbpenetrationswerte (vgl. Tabelle 12). Bei der Anwendung des Adhäsivs AdheSE One ergibt sich beim Komposit ein einen statistisch signifikanter Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration ($p = 0,028$, vgl. Tabelle 12). Die Farbpenetrationswerte vor TCML waren dabei geringer als nach TCML.

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des Adhäsivs, unabhängig der Parameter „Komposit“ und „Zeit“, ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0,007 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 9). Hinsichtlich des Parameters „Zeit“ ergibt unabhängig von den anderen beiden Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ kein statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha > \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 12). Hinsichtlich des Einflusses des Parameters „Komposit“ ergibt sich ein statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0 \leq \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 10 und 11).

5.1.2 Farbpenetration im Innenbereich der Füllung

5.1.2.1 Gesamtfarbpenetration insgesamt (Schmelz und Dentin)

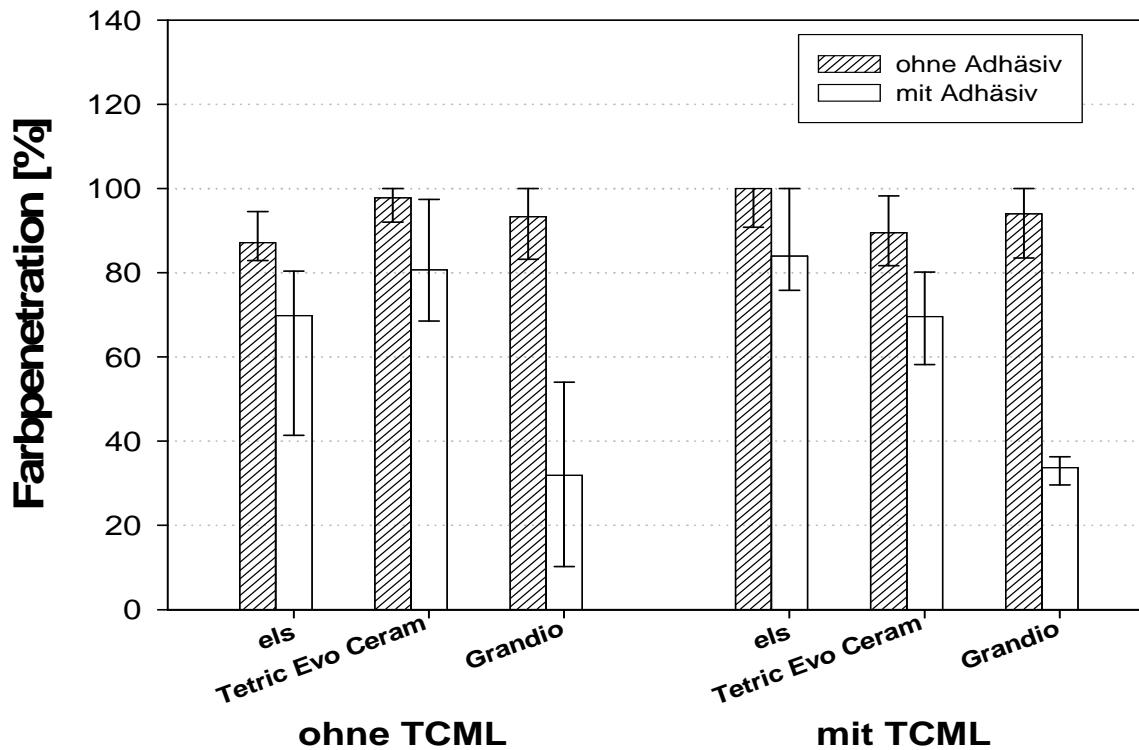


Abbildung.18: Farbpenetration im Schmelz und Dentin entlang der gesamten Restaurierungsgrenze (Schmelz und Dentin) in Prozent für den Innenteil der Restauration. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 18 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte im Schmelz und Dentin entlang der gesamten Restaurierungsgrenze (Schmelz und Dentin) in Prozent für den Innenteil der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML, so weist, els 87,2 % Farbpenetration auf, Tetric Evo Ceram 97,8 % und Grandio 93,3 %. Dabei unterscheiden sich die Farbpenetrationswerte der Komposite

els und Tetric Evo Ceram ($p = 0,045$, vgl. Tabelle 14) statistisch signifikant voneinander. Bei Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML eine Farbpenetration von 69,8 % bei els, 80,7 % bei Tetric Evo Ceram und 31,9 % bei Grandio bestimmt werden. Zwischen Grandio und Tetric Evo Ceram ($p = 0,001$) und Grandio und els ($p = 0,008$) besteht ein statistisch signifikanter Unterschied (vgl. Tabelle 15), wobei die Farbpenetration bei Grandio statistisch signifikant geringer ist als bei Tetric Evo Ceram und els. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden sich ohne TCML die Komposite els ($p = 0,002$), Tetric Evo Ceram ($p = 0,033$) und Grandio ($p = 0$) statistisch signifikant in den Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 13). Bei allen Kompositen sind die Farbpenetrationswerte mit Adhäsivanwendung signifikant geringer als ohne Adhäsivanwendung.

Nach TCML betrug die Farbpenetration bei els 100 %, Tetric Evo Ceram 89,5 % und 94,0 % bei els ohne Adhäsivanwendung. Bei der statistischen Analyse konnten keine signifikanten Unterschiede im Ausmaß der Farbpenetration zwischen den drei Kompositen festgestellt werden (vgl. Tabelle 14). Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man für els 84 % Farbpenetration, 69 % für Tetric Evo Ceram und 33,7 % für Grandio. Dabei hatte els sowohl statistisch signifikant höhere Farbpenetrationswerte als Tetric Evo Ceram ($p = 0,012$, vgl. Tabelle 15) und Grandio ($p = 0$, vgl. Tabelle 26). Außerdem weist Tetric Evo Ceram statistisch signifikant höhere Farbpenetrationswerte auf als Grandio ($p = 0$, vgl. Tabelle 16). Betrachtet man die Farbpenetration im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) so ist sie bei els ($p = 0,024$), Tetric Evo Ceram ($p = 0,001$) und Grandio ($p = 0$) mit Adhäsivanwendung statistisch signifikant geringer (vgl. Tabelle 13).

Vergleicht man die Farbpenetration im Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzt diese nur beim Komposit els, sowohl ohne als auch mit Anwendung des Adhäsivs AdheSE One einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration ($p = 0,024$ ohne Adhäsiv, $p = 0,020$ mit Adhäsiv, vgl. Tabelle 16). Die Farbpenetrationswerte vor TCML waren in beiden Fällen kleiner als nach TCML.

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des Adhäsivs, unabhängig der Parameter „Komposit“ und „Zeit“, ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 13). Der Einfluss des Parameters „Zeit“ ergibt unabhängig von den beiden anderen Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ keinen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0,007 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 16). Hinsichtlich des Einflusses des Parameters „Komposit“ ergibt sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,001 \leq \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 14 und 15).

5.1.2.2 Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelzlänge-Komposit-Grenzfläche

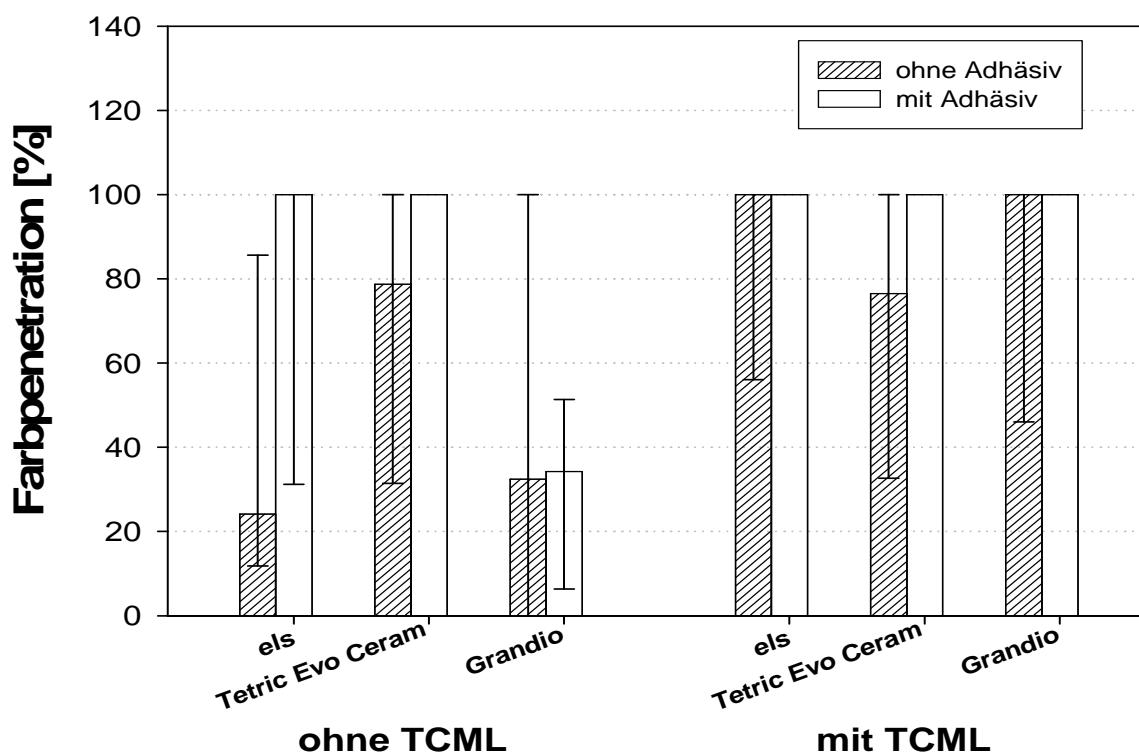


Abbildung 19: Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelz-Komposit-Grenzfläche in Prozent für den Innenteil der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 19 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte im Schmelz entlang der Schmelz-Komposit-Grenzfläche in Prozent für den Innenteil der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML so erhält man 24,1 % bei els, 78,7 % bei Tetric Evo Ceram und 32,4 % bei Grandio. Allerdings unterscheiden sich die Farbpenetrationswerte der Komposite nicht statistisch signifikant voneinander (vgl. Tabelle 14). Bei Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML bei den Kompositen els und Tetric Evo Ceram eine vollständige Farbpenetration von 100 % und bei Grandio von 34,2 % beobachtet werden. Dabei weist Grandio sowohl statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte als Tetric Evo Ceram ($p = 0$) und els ($p = 0,028$) auf (vgl. Tabelle 15). Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheidet sich ohne TCML nur das Komposit els ($p = 0,028$) statistisch signifikant in den Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 20). Es weist mit Adhäsivanwendung signifikant höhere Farbpenetrationswerte als ohne auf.

Nach TCML betrug die Farbpenetration 100 % bei els, 78,7 % bei Tetric Evo Ceram und 100 % bei Grandio. Aufgrund der hohen Streuung der Einzelwerte unterscheiden sich die Farbpenetrationswerte nicht statistisch signifikant (vgl. Tabelle 14). Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man für alle Komposite eine 100 % Farbpenetration. Dabei hat els sowohl statistisch signifikant höhere Farbpenetrationswerte als Tetric Evo Ceram ($p = 0,01$, vgl. Tabelle 15) und Grandio ($p = 0,006$, vgl. Tabelle 15). Betrachtet man die Farbpenetration im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) so ist sie bei Tetric Evo Ceram ($p = 0,001$) und Grandio ($p = 0,028$) mit Adhäsivanwendung statistisch signifikant geringer (vgl. Tabelle 14). Bei Grandio besitzt diese Aussage nur eine theoretische Bedeutung, da die beiden Medianwerte (mit / ohne Adhäsiv) 100 % betragen.

Vergleicht man die Farbpenetration im Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzt diese nur beim Komposit els ($p = 0,010$) ohne Anwendung des Adhäsivs AdheSE One einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration. Mit Adhäsivanwendung besteht beim Komposit Grandio ($p = 0$) ein

statistisch signifikanter Unterschied im Ausmaß der Farbpenetration. Die Farbpenetrationswerte waren in beiden Fällen vor TCML kleiner als nach TCML.

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des Adhäsivs, unabhängig der Parameter „Komposit“ und „Zeit“, ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 001 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 13). Der Einfluss des Parameters „Zeit“ ergibt unabhängig von den anderen beiden Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ ebenfalls einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 16). Hinsichtlich des Einflusses des Parameters „Komposit“ ergibt sich ebenfalls ein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha = 0 \leq \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 14 und 15).

5.1.2.3 Farbpenetration im Dentin bezogen auf Dentin-Komposit-Grenzfläche

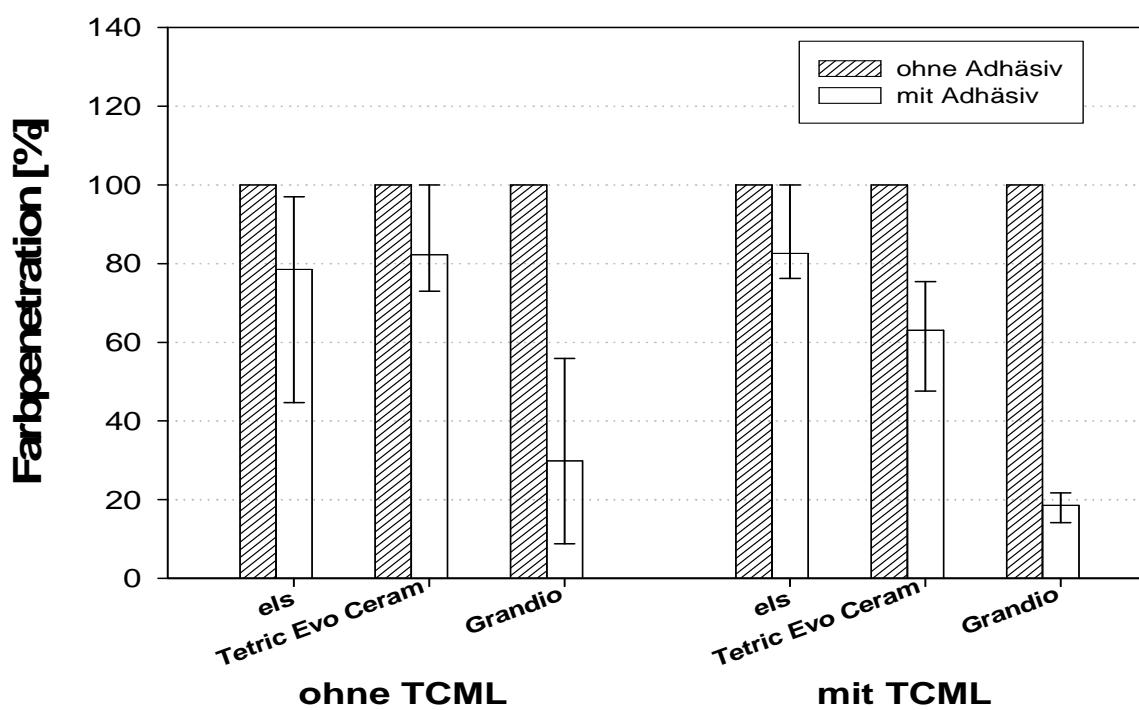


Abbildung 20: Farbpenetration im Dentin bezogen auf die Dentin-Komposit-Grenzfläche in Prozent für den Innenteil der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv sowie, ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Abbildung 20 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte im Dentin bezogen auf die Dentin-Komposit-Grenzfläche in Prozent für den Innenteil der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML, so weisen alle Komposite eine vollständige Farbpenetration von 100 % auf. Folglich gibt es keine signifikanten Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Komposite. Bei Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML eine Farbpenetration von 78,5 % bei els, 82,3 % bei Tetric Evo Ceram und 29,9 % bei Grandio bestimmt werden. Zwischen Grandio und els ($p = 0,007$) und Grandio und Tetric Evo Ceram ($p = 0,006$) besteht ein statistisch signifikanter Unterschied (vgl. Tabelle 15) in den Farbpenetrationswerten. Dabei weist Grandio statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte als els und Tetric Evo Ceram auf. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden sich alle Komposite ohne TCML statistisch signifikant in ihren Farbpenetrationswerten (els $p = 0$, Tetric Evo Ceram $p = 0,002$, Grandio $p = 0$, vgl. Tabelle 13). Dabei weisen els, Tetric Evo Ceram und Grandio mit Adhäsivanwendung signifikant geringere Farbpenetrationswerte auf.

Nach TCML betrug die Farbpenetration bei allen Kompositen ohne Adhäsivanwendung 100 %. Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man für els 82,6 % Farbpenetration, für Tetric Evo Ceram 63,1 % und für Grandio 18,6 %. Zwischen els und Tetric Evo Ceram ($p = 0,001$), Grandio und Tetric Evo Ceram ($p = 0$) und Grandio und els ($p = 0$) besteht ein statistisch signifikanter Unterschied (vgl. Tabelle 15) in den Farbpenetrationswerten. Dabei sind die Farbpenetrationswerte von Tetric Evo Ceram und Grandio statistisch signifikant geringer als die von els und die von Grandio niedriger als die von Tetric Evo Ceram. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden sich els ($p = 0,001$), Tetric Evo Ceram ($p = 0$) und Grandio ($p = 0$) statistisch signifikant in ihren Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 13). Dabei weisen alle Komposite mit Adhäsivanwendung statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte auf als ohne.

Vergleicht man die Farbpenetration im Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzt diese Variable sowohl ohne als auch bei Anwendung von AdheSE One keinen statistisch signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration (vgl. Tabelle 16).

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des Adhäsivs, unabhängig der Parameter „Komposit“ und „Zeit“, ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 13). Hinsichtlich des Parameters „Zeit“ ergibt sich unabhängig von den anderen beiden Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ kein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha > \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 16). Hinsichtlich des Einflusses des Parameters „Komposit“ ergibt sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha = 0 \leq \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 14 und 15).

5.1.3 Farbpenetration im Randbereich der Füllung

5.1.3.1 Gesamtfarbpenetration insgesamt (Schmelz und Dentin)

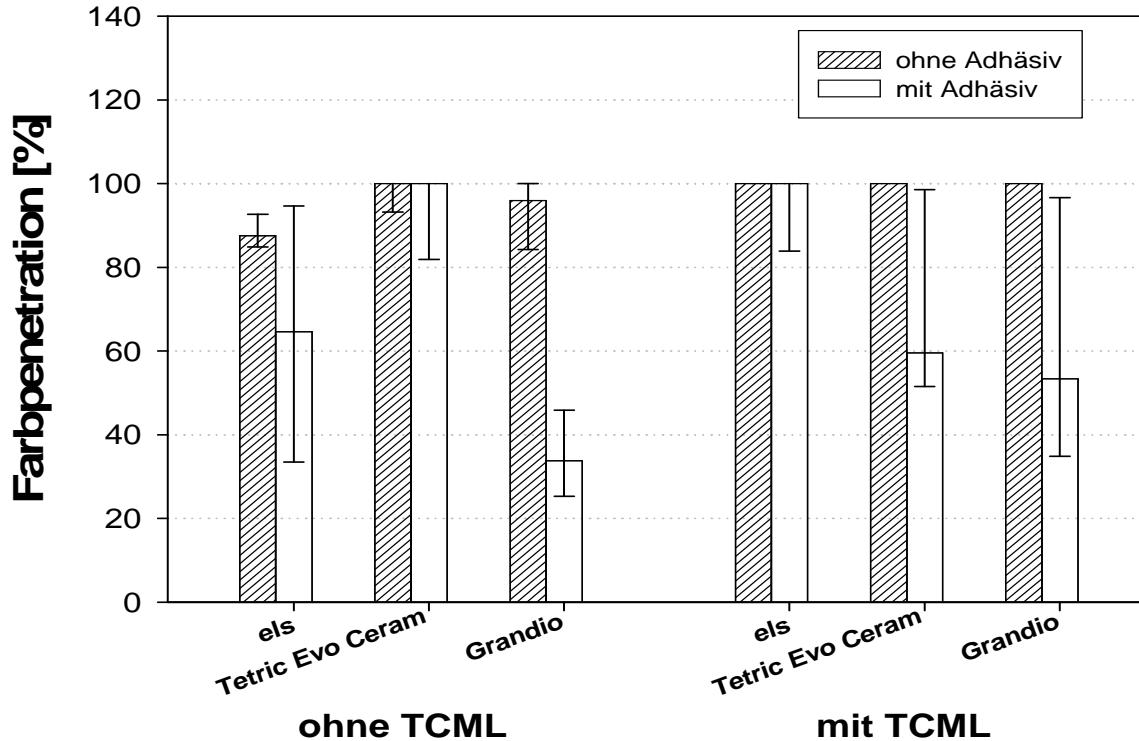


Abbildung 21: Farbpenetration im Schmelz und Dentin entlang der gesamten Restaurierungsgrenze (Schmelz und Dentin) in Prozent für den Randbereich der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 21 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte im Schmelz und Dentin entlang der gesamten Restaurierungsgrenze (Schmelz und Dentin) in Prozent für den Randbereich der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML, so weisen, els 87,6 %, Tetric Evo Ceram 100 % und Grandio 96 %

Farbpenetration auf. Allerdings unterscheiden sich die Farbpenetrationswerte der Komposite nicht statistisch signifikant voneinander (vgl. Tabelle 29). Bei Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML eine Farbpenetration von 64,6 % bei els, 100% bei Tetric Evo Ceram und 33,8 % bei Grandio bestimmt werden. Zwischen Grandio und Tetric Evo Ceram besteht ein statistisch signifikanter Unterschied ($p = 0,001$, vgl. Tabelle 30), wobei die Farbpenetration bei Grandio statistisch signifikant geringer ist als bei Tetric Evo Ceram. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden sich ohne TCML die Komposite els ($p = 0,033$) und Grandio ($p = 0$) statistisch signifikant in den Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 17). Bei beiden Kompositen sind die Farbpenetrationswerte mit Adhäsivanwendung signifikant geringer als ohne Adhäsivanwendung.

Nach TCML betrug die Farbpenetration bei allen Kompositen ohne Adhäsivanwendung 100 %. Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man für els 100 % Farbpenetration, 59,6 % für Tetric Evo Ceram und 53,4 % für Grandio. Dabei hat els sowohl statistisch signifikant höhere Farbpenetrationswerte als Tetric Evo Ceram ($p = 0,014$, vgl. Tabelle 30) und Grandio ($p = 0,012$, vgl. Tabelle 19). Betrachtet man die Farbpenetration im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) so ist sie bei Tetric Evo Ceram ($p = 0,0002$) und Grandio ($p = 0,001$) mit Adhäsivanwendung statistisch signifikant geringer (vgl. Tabelle 17).

Vergleicht man die Farbpenetration im Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzt diese beim Komposit els ohne Anwendung des Adhäsivs AdheSE One einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration ($p = 0,001$, vgl. Tabelle 20). Wurde das Adhäsiv AdheSE One angewendet, so hat die Variable „Zeit“ sowohl bei els ($p = 0,007$) und Grandio ($p = 0,045$) einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration (vgl. Tabelle 20). Die Farbpenetrationswerte vor TCML waren in allen Fällen kleiner als nach TCML.

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des Adhäsivs, unabhängig der Parameter „Komposit“ und „Zeit“, ergibt einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0,001 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 17). Der Einfluss des Parameters „Zeit“ ergibt unabhängig von den beiden anderen Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ ebenfalls einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = 0,001 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 20). Hinsichtlich des

Einflusses des Parameters „Komposit“ ergibt sich ebenfalls ein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,001 \leq \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 18 und 19).

5.1.3.2 Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelzlänge-Komposit-Grenzfläche

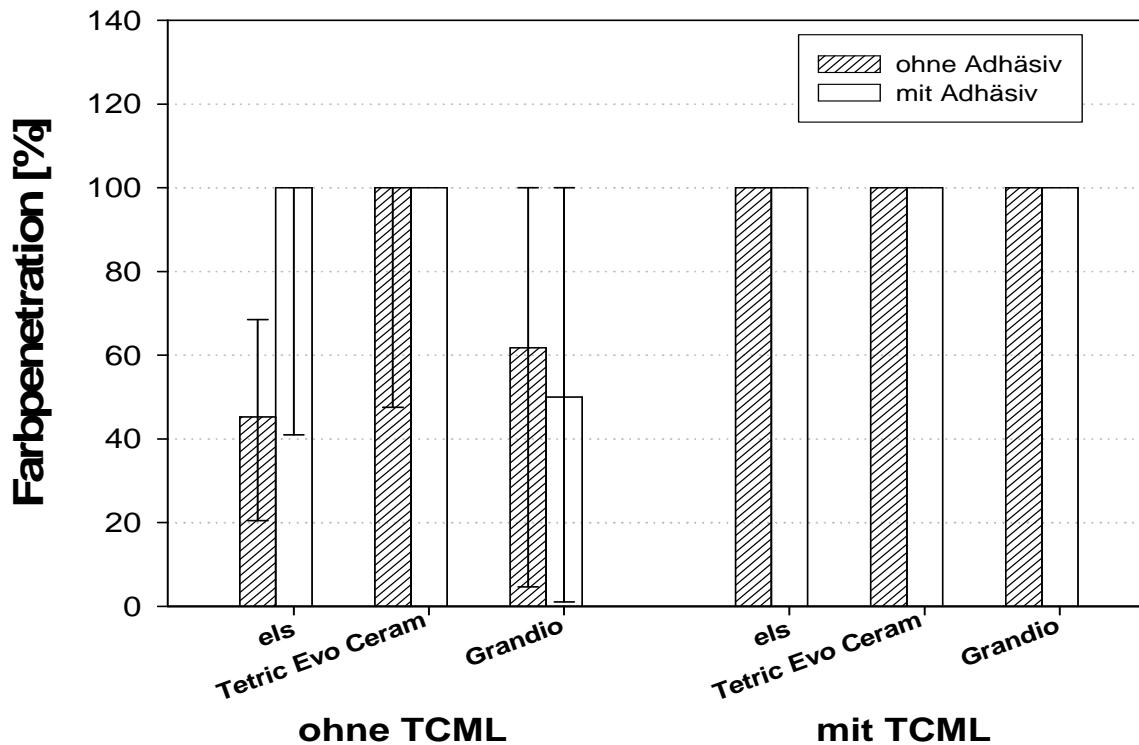


Abbildung 22: Farbpenetration im Schmelz bezogen auf die Schmelz-Komposit-Grenzfläche in Prozent für den Randbereich der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 22 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte im Schmelz entlang der Schmelz-Komposit-Grenzfläche in Prozent für den Randbereich der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML so erhält man 45,3 % bei els, 100 % bei Tetric Evo Ceram und 61,8 % bei Grandio. Allerdings unterscheiden sich die Farbpenetrationswerte der Komposite nicht statistisch signifikant voneinander (vgl. Tabelle 18). Bei Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML bei den Kompositen els und Tetric Evo Ceram eine vollständige Farbpenetration von 100 % und bei Grandio von 50,0 % beobachtet werden. Dabei weißt Grandio statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte als Tetric Evo Ceram ($p = 0,014$) auf (vgl. Tabelle 19). Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheidet sich keines der Komposite statistisch signifikant in seinen Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 17).

Nach TCML beträgt die Farbpenetration bei allen Kompositen 100 %. Es sind auch statistisch keine signifikanten Unterschiede zu erkennen (vgl. Tabelle 18). Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man für alle Komposite eine 100 % Farbpenetration. Bei Tetric Evo Ceram und els besteht ein statistisch signifikanter Unterschied in den Farbpenetrationswerten, der jedoch nur von theoretischer Relevanz ist, da beide Medianwerte 100 % betragen. Betrachtet man die Farbpenetration im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) so ist sie bei Tetric Evo Ceram ($p = 0,033$, vgl. Tabelle 17) ein statistisch signifikanter Unterschied zu erkennen. Dieser besitzt nur eine theoretische Bedeutung, da die beiden Medianwerte (mit / ohne Adhäsiv) 100 % betragen.

Vergleicht man die Farbpenetration in Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzt diese nur beim Komposit els ($p = 0$) ohne Anwendung des Adhäsivs AdheSE One einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration. Mit Adhäsivanwendung besteht beim Komposit Grandio ($p = 0,006$) ein statistisch signifikanter Unterschied im Ausmaß der Farbpenetration. Die Farbpenetrationswerte sind in beiden Fällen vor TCML kleiner als nach TCML.

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des „Adhäsivs“, unabhängig der Parameter „Komposit“ und „Zeit“, ergibt keinen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha = > \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 17). Der Einfluss des Parameters „Zeit“ ergibt unabhängig von den beiden anderen Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ einen statistisch signifikanten Unterschied ($\alpha =$

$0 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 20). Hinsichtlich des Einflusses des Parameters Komposit“ ergibt sich kein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha > \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 18 und 19).

5.1.3.3 Farbpenetration im Dentin bezogen auf Dentin-Komposit-Grenzfläche

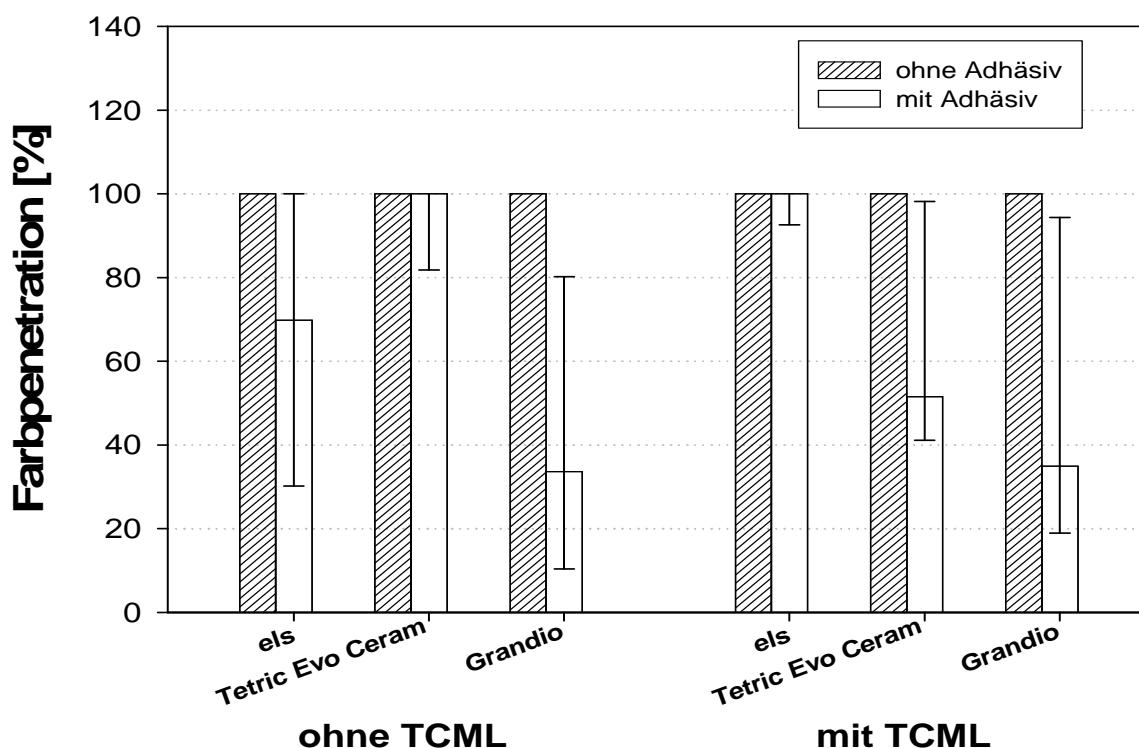


Abbildung 23: Farbpenetration im Dentin bezogen auf die Dentin-Komposit-Grenzfläche in Prozent für den Randbereich der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Abbildung 23 zeigt eine Zusammenfassung der prozentualen Farbpenetrationswerte im Dentin bezogen auf die Dentin-Komposit-Grenzfläche in Prozent für den Randteil der Füllung. Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit

Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Betrachtet man zunächst die einzelnen Komposite ohne Adhäsivanwendung vor TCML, so weisen alle Komposite eine vollständige Farbpenetration von 100 % auf. Folglich gibt es keine signifikanten Unterschiede beim paarweisen Vergleich der Komposite. Bei Verwendung des Adhäsivs AdheSE One kann ohne TCML eine Farbpenetration von 69,8 % bei els, 100 % bei Tetric Evo Ceram und 33,7 % bei Grandio bestimmt werden. Dabei weist Grandio statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte auf als Tetric Evo Ceram ($p = 0,014$, vgl. Tabelle 19). Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheiden sich die Komposite els ($p = 0,006$) und els ($p = 0$) ohne TCML statistisch signifikant in ihren Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 17). Dabei weisen els und Grandio mit Adhäsivanwendung signifikant geringere Farbpenetrationswerte auf.

Nach TCML betrug die Farbpenetration bei allen Kompositen ohne Adhäsivanwendung 100 %. Wurden die Kavitäten mit AdheSE One vorbehandelt und anschließend einer thermomechanischen Wechselbelastung ausgesetzt, so erhält man für els 100 % Farbpenetration, für Tetric Evo Ceram 51,6 % und für Grandio 35,0 %. Zwischen els und Tetric Evo Ceram ($p = 0,002$) und Grandio und els ($p = 0,001$) besteht ein statistisch signifikanter Unterschied (vgl. Tabelle 19) in den Farbpenetrationswerten. Dabei sind die Farbpenetrationswerte von Tetric Evo Ceram und Grandio statistisch signifikant geringer als die von els. Im Hinblick auf die Adhäsivanwendung (ohne / mit Adhäsiv) unterscheidet sich Tetric Evo Ceram ($p = 0$) und Grandio ($p = 0$) statistisch signifikant in ihren Farbpenetrationswerten (vgl. Tabelle 17). Dabei weisen alle Komposite mit Adhäsivanwendung statistisch signifikant geringere Farbpenetrationswerte auf als ohne.

Vergleicht man die Farbpenetration im Hinblick auf die Variable „Zeit“ (ohne / mit TCML), so besitzt diese Variable sowohl ohne als auch bei Anwendung von AdheSE One nur bei els mit Adhäsivanwendung einen statistisch signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration (vgl. Tabelle 20). Dabei sind die Farbpenetrationswerte ohne TCML geringer als mit TCML.

Die Anwendung der Error-Rates-Methode im Bezug auf den Einfluss des Adhäsivs, unabhängig der Parameter „Komposit“ und „Zeit“, ergibt keinen statistisch

signifikanten Unterschied ($\alpha \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 17). Hinsichtlich des Parameters „Zeit“ ergibt sich unabhängig von den beiden anderen Parametern „Komposit“ und „Adhäsiv“ ein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha = 0 \leq \alpha^* (k = 6) = 0,00851244$, vgl. Tabelle 20). Hinsichtlich des Einflusses des Parameters „Komposit“ ergibt sich ein statistisch signifikanter Unterschied ($\alpha = 0,001 \leq \alpha^* (k = 12) = 0,00426532$, vgl. Tabelle 18 und 19).

5.2 Lage der Farbpenetration

Die Ergebnisse über die Lage der Farbpenetration sind als prozentuale Häufigkeit nach dem Prinzip Maximum in Abbildung 24 bis 27 dargestellt (vgl. Tabelle 21 bis 24). Die Graphen zeigen das Auftreten der Farbpenetration ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) für die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio mit und ohne Adhäsivanwendung.

5.2.1 Anteil der Farbpenetration beginnend an der Schmelz-Komposit-Grenzfläche

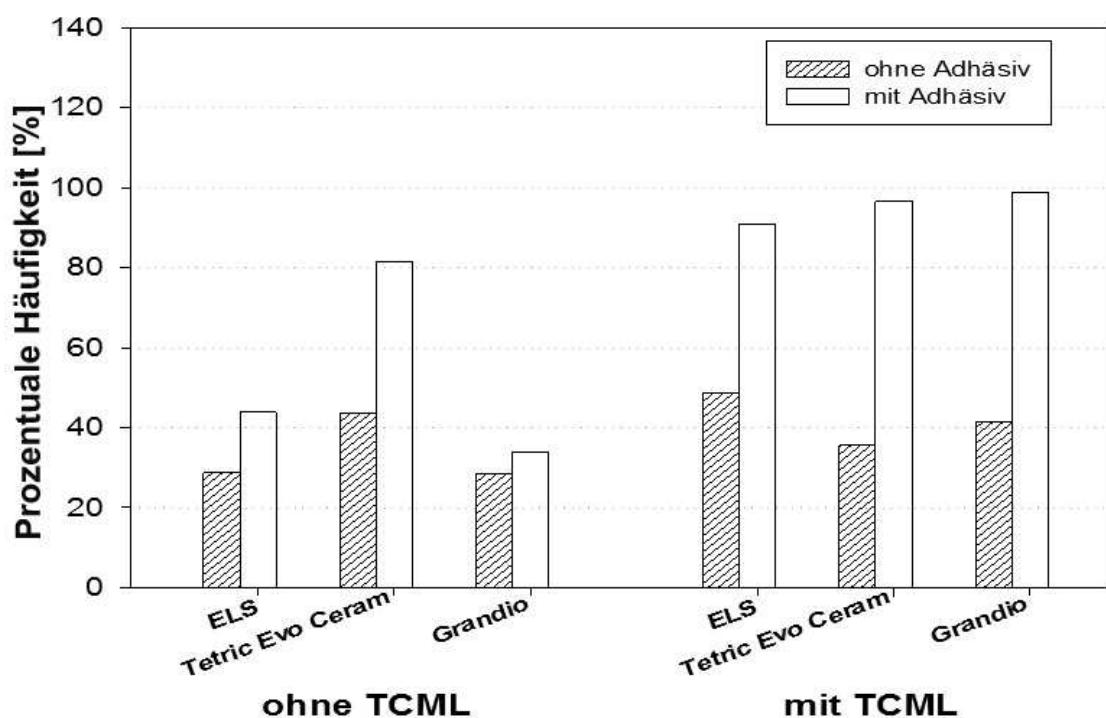


Abbildung 24: Darstellung der prozentualen Häufigkeit der Farbpenetration beginnend koronal an der Schmelz-Komposit-Grenzfläche (Code 91xx) in Prozent für die gesamte Füllung (Rand- und Innenteil). Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 24 beschreibt die prozentuale Häufigkeit der Farbpenetration, beginnend koronal an der Schmelz-Komposit-Grenzfläche (Code 91xx), in Prozent für die gesamte Füllung (Rand- und Innenteil). Die Komposite els, Tetric Evo Ceram

und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Ohne TCML und ohne Adhäsiv verteilen sich die Anteile der Farbpenetration von außen koronal an der Schmelz-Komposit-Grenzfläche beginnend folgendermaßen, 28,8 % bei els, 43,5 % bei Tetric Evo Ceram und 28,6 % bei Grandio. Wobei sich ohne TCML und mit Adhäsiv Werte von 43,9 % für els, 82,5 % für Tetric Evo Ceram und 36,0 % für Grandio ergeben.

Die Anteile der Farbpenetration beginnend koronal an der Schmelz-Komposit-Grenzfläche liegen nach thermomechanischer Wechselbelastung und ohne Anwendung des Adhäsivs AdheSE One bei 48,6 % für els, 35,6 % für Tetric Evo Ceram und 41,3 % für Grandio. Nach TCML und mit Adhäsiv ergeben sich 91,0 % für els, 96,6 % für Tetric Evo Ceram und 98,9 % für Grandio.

5.2.2 Anteil der Farbpenetration über die Schmelz-Dentin-Grenze

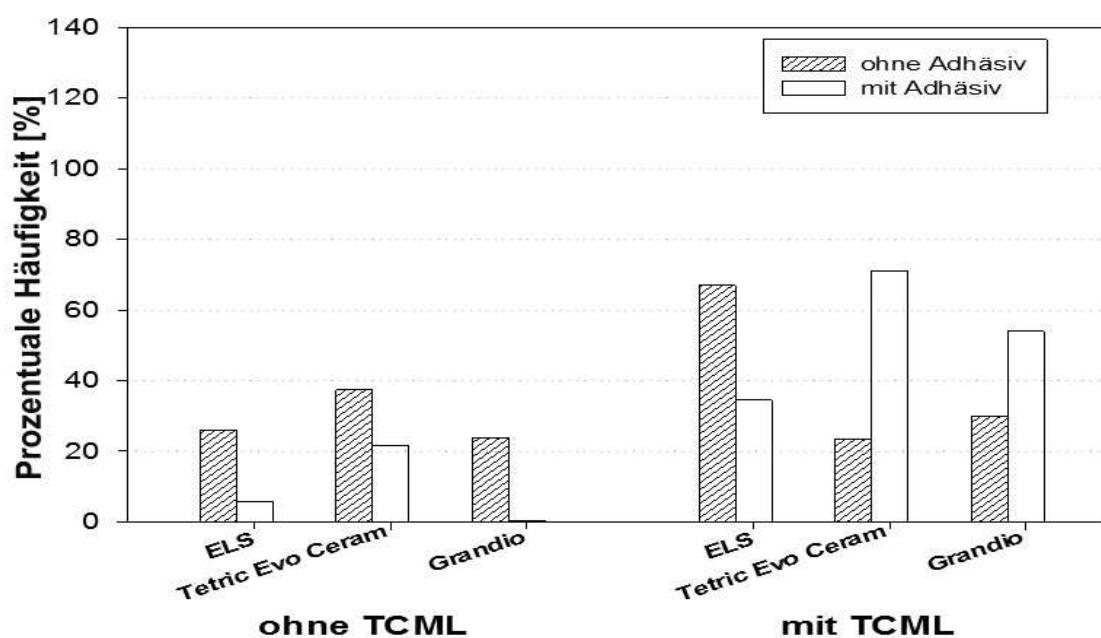


Abbildung 25: Darstellung der prozentualen Häufigkeit der Farbpenetration über die Schmelz-Dentin-Grenze (Code 9x1x) in Prozent für die gesamte Füllung (Rand- und Innenteil). Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 25 beschreibt, die prozentuale Häufigkeit der Farbpenetration über die Schmelz-Dentin-Grenze (Code 9x1x) in Prozent für die gesamte Füllung (Rand- und Innenteil). Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Ohne TCML und ohne Adhäsiv verteilen sich die Anteile der Farbpenetration über die Schmelz-Dentin-Grenze folgendermaßen: 26,0 % bei els, 37,4 % bei Tetric Evo Ceram und 23,9 % bei Grandio, wobei sich ohne TCML und mit Adhäsiv Werte von 5,9 % für els, 21,7 % für Tetric Evo Ceram und 0,5 % für Grandio ergeben.

Die Anteile der Farbpenetration über die Schmelz-Dentin-Grenze liegen nach thermomechanischer Wechselbelastung und ohne Anwendung des Adhäsivs AdheSE One bei 67,0 % für els, 23,1 % für Tetric Evo Ceram und 30,1 % für Grandio. Nach TCML und mit Adhäsiv ergeben sich 34,5 % für els, 71,0 % für Tetric Evo Ceram und 53,9 % für Grandio.

5.2.3 Anteil der Farbpenetration beginnend an der Dentin-Komposit Grenzfläche

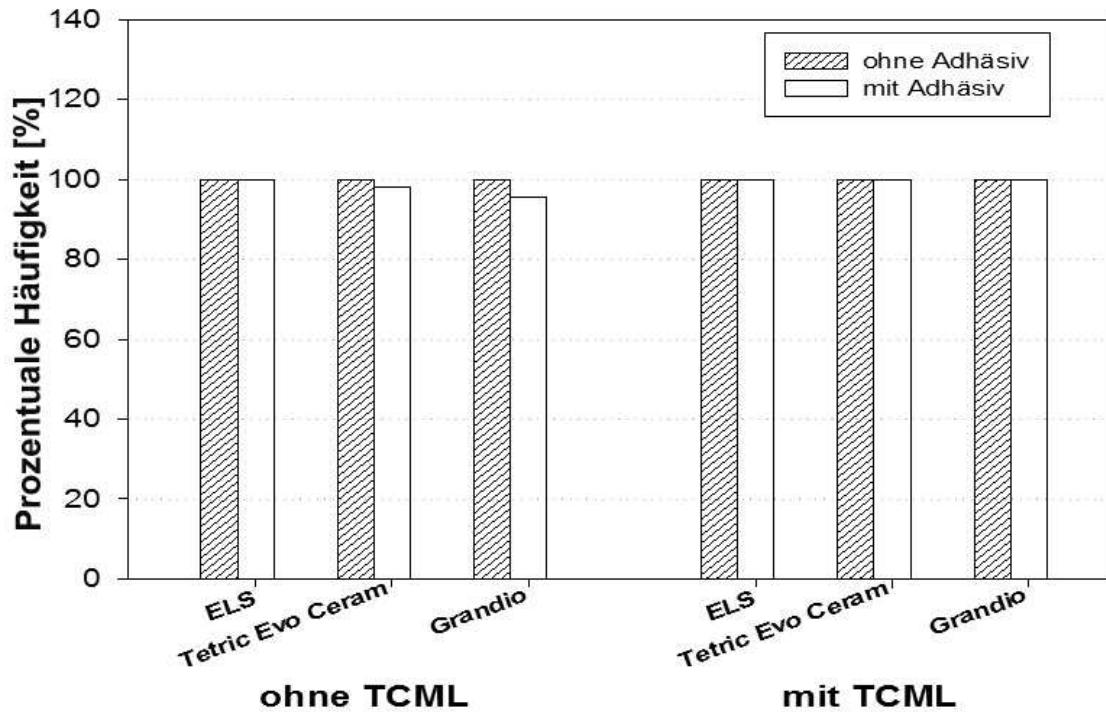


Abbildung 26: Darstellung der prozentualen Häufigkeit der Farbpenetration beginnend apikal an der Dentin-Komposit-Grenzfläche (Code 9xx1) in Prozent für die gesamte Füllung (Rand- und Innenteil). Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 26 beschreibt die prozentuale Häufigkeit der Farbpenetration, beginnend apikal an der Dentin-Komposit-Grenzfläche (Code 9xx1) in Prozent für die gesamte Füllung (Rand- und Innenteil). Die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Ohne TCML und ohne Adhäsiv beträgt die prozentuale Häufigkeit der Farbpenetration von außen apikal an der Dentin-Komposit-Grenzfläche beginnend bei allen Kompositen 100 %. Ohne TCML und mit Adhäsiv ergeben sich Werte von 100 % für els, 98,1 % für Tetric Evo Ceram und 95,6 % für Grandio ergeben.

Die Anteile der Farbpenetration beginnend apikal an der Dentin-Komposit-Grenzfläche liegen nach thermomechanischer Wechselbelastung und ohne Anwendung des Adhäsivs AdheSE One bei allen Kompositen bei 100 %. Nach TCML und mit Adhäsiv ergeben sich ebenfalls 100 % für alle Komposite.

5.2.4 Anteil der Farbpenetration von außen in beide Zahnhartsubstanzen

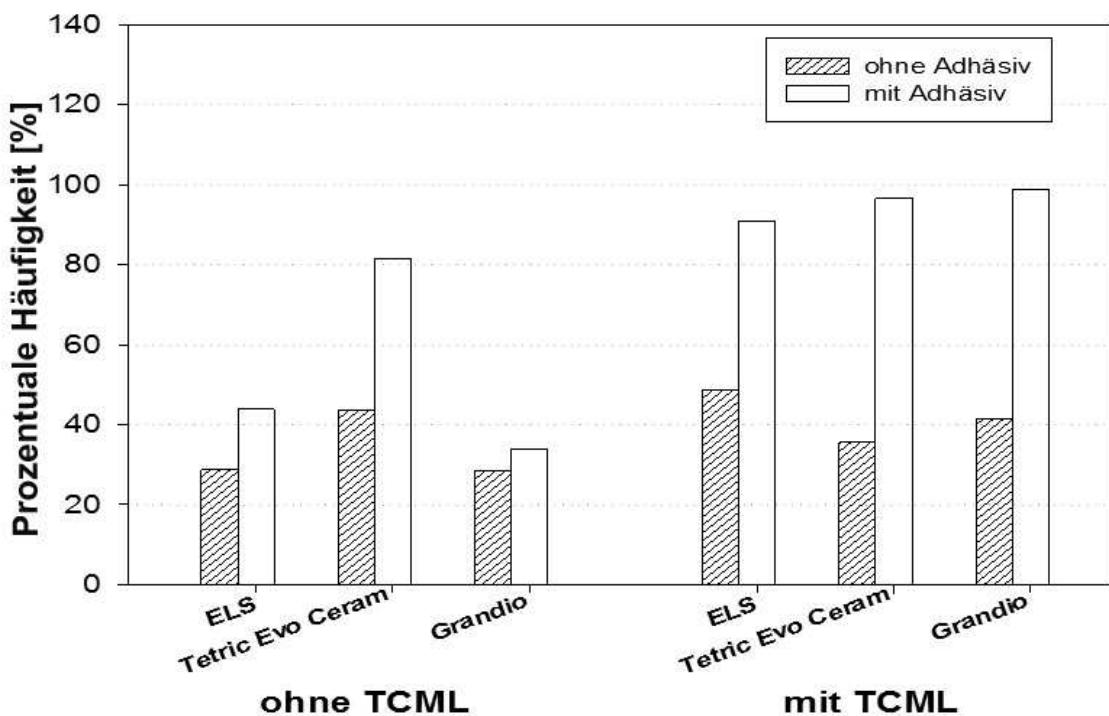


Abbildung 27: Darstellung der prozentualen Häufigkeit der Farbpenetration beginnend koronal und apikal an der Schmelz- und Dentin-Komposit-Grenzfläche (Code 91x1) in Prozent für die gesamte Füllung (Rand- und Innenteil). Die Komposite ELS, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Die Abbildung 27 beschreibt die prozentuale Häufigkeit der Farbpenetration beginnend koronal und apikal an der Schmelz- und Dentin-Komposit-Grenzfläche (Code 91x1) in Prozent für die gesamte Füllung (Rand- und Innenteil). Die Komposite ELS, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden ohne und mit Adhäsiv sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

Diese Abbildung entspricht der Abbildung 25 da alle Schnitte die eine Farbpenetration über den Schmelz aufwiesen zugleich auch eine Farbpenetration über das Dentin aufwiesen (vgl. Tabellen 20 und 23)

Ohne TCML und ohne Adhäsiv verteilen sich die Anteile der Farbpenetration von außen koronal und apikal an der Schmelz- und Dentin-Komposit-Grenzfläche beginnend folgendermaßen, 28,8 % bei els, 43,5 % bei Tetric Evo Ceram und 28,6 % bei Grandio. Ohne TCML und mit Adhäsiv geben sich Werte von 43,9 % für els, 82,5 % für Tetric Evo Ceram und 36,0 % für Grandio.

Die Anteile der Farbpenetration beginnend koronal und apikal an der Schmelz- und Dentin-Komposit-Grenzfläche liegen nach thermomechanischer Wechselbelastung und ohne Anwendung des Adhäsivs AdheSE One bei 48,6 % für els, 35,6 % für Tetric Evo Ceram und 41,3 % für Grandio. Nach TCML und mit Adhäsiv ergeben sich 91,0 % für els, 96,6 % für Tetric Evo Ceram und 98,9 % für Grandio.

6. Diskussion

6.1 Materialien und Methode

6.1.1 Untersuchungsgut und Lagerung

Ziel dieser in vitro Studien war es, im Labor kliniknahe Bedingungen zu simulieren und eine Vergleichbarkeit zu anderen in vitro Untersuchungen zu schaffen (172). In der vorliegenden Untersuchung wurden, wie in anderen Arbeiten empfohlen (83;160;195), füllungs- und kariesfreie, menschliche Molaren mit abgeschlossenem Wurzelwachstum verwendet. Als Lagermedium nach der Extraktion wurde in der vorliegenden Studie 0,5 %-ige Chloraminlösung verwendet. Chloraminlösung wird in vergleichbaren Studien sehr häufig als Lagermedium verwendet. Es beeinflusst die Haftkraft von Dentinadhäsiven nicht (172). Neben Chloraminlösung werden in der Literatur noch Thymol, destilliertes Wasser, Kochsalzlösungen, Formalin und andere Lagerungsmedien beschrieben (58;59;118;172). Nach der Präparation und Restauration wurden die Versuchszähne in physiologischer Kochsalzlösung bei 37 °C gelagert, um den Bedingungen in der Mundhöhle möglichst nahe zu kommen.

6.1.2 Präparation und Kavitätendesign

In der vorliegenden in vitro Untersuchung wurden 144 Molaren untersucht, welche standardisierte, ca. 3 mm hohe, 6 mm breite und 1,5 mm tiefe Kavitäten (vestibulär-zervikal) entlang der Schmelz-Zement-Grenze erhielten. Die Präparation erfolgte entsprechend den Regeln der Adhäsivtechnik. Sie wurde mit kugelförmigen Präparationsinstrumenten durchgeführt, dadurch resultierte eine Kavität mit abgerundeten Innenkanten ohne Unterschnitte. Die schmelzbegrenzten Anteile des Kavitätenrandes wurden mittels Feinkorndiamanten 1,5 mm breit angeschrägt. Die Schmelzanschrägung bewirkt einen günstigeren Anschnitt der Schmelzprismen und trägt damit zu einer besseren Schmelzhaftung bei (38;136). Diese Präparationsform mit Schmelzanschrägung und gerade auslaufender Dentinstufe wird in zahlreichen anderen Studien angewandt (135;147;154).

Der Abstand des Kavitätenbodens von der Pulpakammer variiert selbst bei standardisierter Kavität von Zahn zu Zahn, wie auch bei dieser Studie beobachtet werden konnte. Das hat möglicherweise einen Einfluss auf den adhäsiven Verbund,

da bei pulpanahem Dentin ein höherer Anteil an Dentintubuli vorherrscht (93). Daraus resultiert eine höhere intrinsische Feuchtigkeit des Dentins, welche zu niedrigeren Haftwerten führen kann (152). Dieser Effekt lässt sich nicht eliminieren, da bei natürlichen Zähnen die Dicke der Dentinschicht in gewissen Grenzen variabel ist.

Hinsichtlich des Erhalts der marginalen Integrität stellt eine Klasse-V-Kavität mit dem beschriebenen Kavitätendesign aufgrund des relativ günstigen C-Faktors (Verhältnis von gebundener zu freier Oberfläche) geringe Anforderungen an das Adhäsivsystem (27). Sie bietet jedoch es keine mechanische Retention. Daher ist das Design der Kavität geeignet um den Einfluss eines Ein-Schritt-Adhäsivsystems auf die marginale Integrität zu testen.

6.1.3 Adhäsivsystem, Komposite, Polymerisation

Die marginale Qualität von Kompositrestaurierungen hängt entscheidend vom Zusammenspiel des Adhäsivsystems mit dem verwendeten Komposit ab. Beim Adhäsivsystem ist nicht nur die chemische Zusammensetzung, sondern auch die Techniksensibilität und die Anzahl der Arbeitsschritte für den klinischen Erfolg ausschlaggebend (47;170;177). Der Wechsel vom Goldstandard des Mehrschritt-Etch&Rinse-Adhäsivsystems zum One-Bottle-Adhäsiv bringt dem Anwender in der Praxis den Vorteil, dass sich die Zeitspanne verkürzt, während der die Klasse-V-Kavität trocken gehalten werden muss (133). Zudem wird die Gingiva nicht durch Säureantouchierung gereizt. Dadurch kann eine Kontaminierung der Kavität durch Blut vermieden werden. GIACCHETTI et al. konnten in ihrer Untersuchung zeigen, je weniger Arbeitsschritte ein Adhäsivsystem erfordert, desto weniger ist die Randqualität der Restauration vom Behandler abhängig (76).

Im Labor, sowie auch in klinischen Untersuchungen sind die Überlebensraten von Füllungen mit Ein-Schritt-Adhäsivsystem bei Klasse I und Klasse II Kavitäten mit denen von Mehr-Schritt-Adhäsivsystemen vergleichbar (89;90;110). In Klasse V Kavitäten sind Einschritt-Adhäsivsysteme jedoch den Mehr-Schritt-Adhäsivsystemen in den Überlebensraten deutlich unterlegen (91). HEINTZE et al. konnten zeigen, dass die Haftwerte des Adhäsivsystems (microtensile bond strength) mit dem klinischen Erfolg korrelieren (92).

In vitro konnten ABDALLAEINE et al. bei Ein-Schritt-Adhäsivsystemen nach Wasserlagerung eine Abnahme der Scherhaftwerte nachweisen (2). BLUNCK et al. zeigten in ihrer Studie, dass die Randqualität (REM Auswertung) bei Einschritt-Adhäsiven nach thermomechanischer Wechselbelastung signifikant abnahm (20). Des Weiteren zeigten BRESCHI et al, dass Wasserlagerung und thermomechanische Wechselbelastung die marginale Integrität herabsetzen (Farbpenetrationstest) (29).

In der Literatur zeigt AdheSE One, das in dieser Studie verwendete Ein-Schritt-Adhäsivsystem, ähnliche Eigenschaften wie andere Ein-Schritt-Adhäsivsysteme. Blunck et al Zeigten in ihrer Studie (REM Randanalyse), dass das adhäsive Potential (Randqualität) von AdheSE One am Zahnschmelz ähnlich dem anderer Ein-Schritt-Adhäsive ist, jedoch statistisch signifikant geringer als das von Etch&Rinse-Adhäsivsystemen (21). Auch BELOICA et al. konnten in ihrer Untersuchung der mikrotensile bond strength und der Scherhaftwerte zeigen dass AdheSE One geringere Haftwerte als Etch&Rinse-Adhäsivsysteme aufweist . Das Problem dieser adhäsiven Verbindung ist, dass sie nicht so stabil ist, wie die von Etch&Rinse-Systemen (18;21). Besonders nach thermomechanischer Belastung nimmt in dieser Studie die Farbpenetration im Grenzbereich Zahnschmelz/Komposit stark zu.

In der zahnärztlichen Praxis werden für die Versorgung von Klasse-V-Kavitäten konventionelle Komposite, fließfähige Komposite, Compomere und Glasionomere eingesetzt. YAZICI et al. konnten bei einem Vergleich der adhäsiven angewendeten Füllungswerkstoffen für Zahnhalbfüllungen keinen statistisch signifikanten Unterschied in der Randqualität feststellen (199).

Neben der Einschicht-Technik (Bulk-Technik) kann die Mehrschicht-Technik (Inkrement-Technik) zur Applikation von Kompositen verwendet werden (73). Bei der Einschicht-Technik, die in dieser Studie angewendet wurde, unterliegen die verarbeiteten Materialien während der Polymerisation einer hohen Schrumpfung, welche die Ausbildung eines Randspaltes (Mikroleakage) begünstigt (9). Verwendet man als Applikationsart die Mehrschichttechnik, so reduziert sich die Mikroleakage signifikant. Dieser Einfluss auf die Güte der marginalen Integrität wirkt sich allerdings erst bei größeren Kavitäten aus (9;87).

Die Polymerisation in der vorliegenden Studie wurde durch kontinuierliche Belichtung für 40 s mit einer Halogen-Polymerisationslampe durchgeführt. Einige Autoren geben

an, dass durch die Anwendung von Soft-Start-Polymerisation die Schrumpfungs- spannung verringert werden kann. Dadurch lässt sich auch die marginale Qualität der Restaurationen verbessern (41;69;96). LOPES et al. hingegen fand keinen Zusammenhang zwischen Randqualität und Polymerisationsmodus bei konventionellen Kompositen (126). Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen FRIEDL et al. in ihrer Studie. Auch sie konnten eindeutige Verbesserung der Randqualität durch Soft-Start-Polymerisation feststellen (68).

In dieser Studie wurden Komposite mit niedrigen Schrumpfungswerten und unterschiedlichen Polymerisationsstresswerten gewählt (vgl. Tabelle 1) um festzustellen, ob geringere Polymerisationsstresswerte auch geringere Farbpenetrationswerte zur Folge haben. VAN ENDE et al. stellten in ihrer Arbeit fest, dass niedrigere Schrumpfungs- und Polymerisationsstresswerte nicht der allein ausschlaggebende Faktor für eine hohe Randqualität der Restauration sind (189). Zudem zeigten TANVROJN et al. dass niedrigere Schrumpfungswerte nicht mit höherer Randqualität gleichzusetzen sind (176). Auch scheint eine alleinige Reduktion des Polymerisationsstresses keinen signifikanten Einfluss auf die marginale Integrität von Kompositrestaurationen zu haben (174). In der vorliegenden Studie wurden auch weder Hinweise darauf gefunden, dass Komposite mit geringerer Polymerisationsschrumpfung oder geringeren Polymerisations- stresswerten bessere marginale Qualität aufweisen (siehe Kap. 5.1, 5.2, 5.3)

6.1.4 Zwischenlagerung

Die Probekörper wurden nach der Fertigstellung für 24 h in physiologischer Kochsalzlösung bei 37 °C gelagert. Die Wasserlagerung wird deshalb empfohlen, da hierbei Veränderungen in den Restaurationsmaterialien auftreten. Komposite zeigen allgemein eine hygrokopische Expansion, da sie in der Lage sind, Wasser aufzunehmen, durch welche zum Teil weitere Füllungsüberschüsse erkannt und beseitigt werden können (142). Durch die Wasseraufnahme resultiert eine Volumenzunahme, die der anfänglichen Polymerisationsschrumpfung entgegen wirkt. Theoretisch können so Spannungen im Material reduziert werden. Zum anderen kann dieser Effekt einen Einfluss auf bestehende Randspalten haben (108). Die hygrokopische Expansion kann die Schrumpfung überkompensieren und zu einer

Reduktion der primär gebildeten Randspalten führen (108;183). RUTTERMANN et al. fanden heraus, dass die hygroskopische Expansion die Schrumpfung hochvisköser Komposite nicht kompensieren kann (166). MOMOI et al. wiesen in ihrer Untersuchung eine sehr geringe Wasserabsorption bei Hybridkompositen nach. Die dadurch resultierende Materialexpansion konnte bereits nach 24 Stunden beobachtet werden (142).

6.1.5 Thermomechanische Wechselbelastung

In der Mundhöhle unterliegen alle Füllungsmaterialien Alterungsprozessen. Um bei in vitro Untersuchungen Aussagen über die Langzeitstabilität von Kompositrestorationen treffen zu können, werden diese im Labor künstlich gealtert. In der Mundhöhle belasten hauptsächlich thermische und mechanische Einflüsse den Komposit-Zahn-Verbund (55). Im Labor kann man diesen Alterungsprozess durch thermomechanische Wechselbelastung simulieren. Thermische und mechanische Belastung der Restaurationen können zu Verformungen im Komposit und Zahn führen, die den Verbund zwischen Zahnhartsubstanz und Füllungsmaterial negativ beeinflussen. Unterschiedliche thermische Ausdehnungskoeffizienten von Füllungsmaterial und Zahnhartsubstanz führen im Verbundbereich zu Spannungen (30;141;183). Sind die einwirkenden Kräfte größer, als die des adhäsiven Verbundes, kommt es zu einer Spaltbildung zwischen Zahnhartsubstanz und Füllung. Sind bereits Randspalten vorhanden, so wird durch die Verformung von Zahnhartsubstanz und Füllungsmaterial Flüssigkeit in den Randspalt gesaugt und dann wieder herausgepresst. Durch diesen Effekt kann die Anzahl und die Dimension von Randspalten zunehmen (30;183).

In der vorliegenden Studie wurden die Probekörper wie folgt gealtert. Sie durchliefen 5000 Zyklen thermischer Belastung zwischen 8 °C und 55 °C. Dazu kam mechanische Belastung durch okklusalen Druck bei 72,5 N, mit einer Frequenz von 1,5 Hz (500.000 Zyklen). Wenn davon ausgegangen wird, dass in der menschlichen Mundhöhle im Seitenzahngebiet ca. 250.000 Belastungen pro Jahr stattfinden (115), so erfuhrn die Proben dieser Studie eine Alterung von 2 Jahren. Studien haben gezeigt, dass sich die Auswirkungen der thermischen Belastung bei Ein-Schritt-

Adhäsivsystemen bereits nach 2.000 – 3000 Zyklen mit hoher Wahrscheinlichkeit manifestiert haben (39;185).

In vielen Studien konnte gezeigt werden, dass Dentinadhäsive trotz anfänglich guter Ergebnisse nach der thermomechanischen Alterung Schwächen aufweisen (30;113;183). Andere Studien belegen, dass thermomechanische Belastung der adhäsiv befestigten Restaurationen keine signifikante Veränderung hinsichtlich der Randspaltbildung verursacht (130;162). Allerdings scheint die thermische Belastung und Wasserlagerung die Randqualität bei Ein-Schritt-Adhäsivsystemen stark negativ zu beeinflussen, was auch in der vorliegenden Studie nachgewiesen werden konnte (20).

6.1.6 Farbpenetration

Eine Möglichkeit der Prüfung der marginalen Integrität stellt die Farbpenetrationsmessung dar. Hierbei wird mit Hilfe der Diffusion von Lösungen entlang der Grenzflächen zwischen Restauration und Zahnhartsubstanz die marginale Integrität (Randdichtigkeit) untersucht (65;117). Silbernitrat gehört zu den gebräuchlichsten chemischen Indikatoren bei Farbpenetrationstests. Durch seine geringe Partikelgröße (0,06 nm) wird die Silbernitratfärbung zu den strengsten Prüfmethoden für den adhäsiven Verbund gezählt (50). Die Partikelgröße ist wesentlich kleiner als ein durchschnittliches Bakterium (0,5 µm - 1 µm). Aufgrund der Partikelgröße kann es nicht nur zur Erkennung von Mikro-, sondern auch von Nanoleakage verwendet werden (156;167). Die Handhabung des Silbernitrats ist im Vergleich zu anderen Farbpenetrationstestes einfach und wenig techniksensibel. Allerdings können die Silberionen auch in Dentinkanäle, in Schmelzsprünge und den Zement eindringen, wodurch eine Beurteilung möglicherweise erschwert wird (204).

In der vorliegenden Studie wurden die Proben für zwei Stunden in 50 % aq. Ag(NO)₃ eingelegt, bevor die Entwicklung des Silbernitrats zum sichtbaren Silber für sechs Stunden unter Neonlicht und dem Fotoentwickler Tetinal erfolgte. Die Silberionen werden bei der Reaktion zu metallischem Silber reduziert, wodurch die dunkle Farbe entsteht. Es konnte gezeigt werden, dass ab einer Lagerung von mindestens 2h in 50 % aq. Ag(NO)₃ kein statistisch signifikanter Fortschritt der Farbpenetration mehr erfolgt (35). Unter Lichteinwirkung (Leuchtstoffröhre) und durch Zugabe von

Silberionen in Form von Kristallisationskeimen im Fotoentwickler beträgt die „Entwicklungszeit“ ca. 6 h (196). Zudem wurde in Untersuchungen ermittelt, dass die reduzierten Silberpartikel nicht weiter in die Tiefe wandern (196).

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Diskussion der prozentualen Farbpenetration

6.2.1.1 Einfluss des Adhäsivsystems

In der vorliegenden Studie wurde untersucht welchen, Einfluss das Ein-Schritt-Adhäsivsystem AdheSE One auf die marginale Integrität von Klasse-V-Füllungen mit drei unterschiedlichen konventionellen Kompositen hat. Die Füllungen wurden dabei sowohl mit, als auch ohne thermomechanischer Wechselbelastung untersucht, um Aussagen über das Langzeitverhalten der Kompositrestaurationen treffen zu können. Als Kontrollgruppe wurden Kompositrestaurationen ohne Adhäsivanwendung verwendet. Die Kavitäten der Kontrollgruppen wurden nur mit Orthophosphorsäure vorbehandelt.

Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass die Anwendung des Adhäsivsystems AdheSE One einen signifikanten Einfluss auf das Ausmaß der Farbpenetration besitzt. Betrachtet man die gesamte Füllung (Dentin- und Schmelz-Kompositgrenzfläche), und die Dentin-Kompositgrenzfläche, so wird das Ausmaß der Farbpenetration durch die Anwendung von AdheSE One für alle Materialien, sowohl vor als auch nach thermomechanischer Wechselbelastung reduziert. Allerdings waren auch mit Adhäsivanwendung noch hohe Farbpenetrationswerte vorhanden.

Bei der Betrachtung der Grenzfläche Schmelz-Komposit fällt auf, dass bei den Proben ohne TCML mit AdheSE One tendenziell mehr Farbpenetration auftritt, als bei denen der Kontrollgruppe. Beim Komposit els ist dieser Zusammenhang statistisch signifikant. Nach TCML zeigt sich dieser Zusammenhang nicht mehr, da nach TCML in allen Fällen eine vollständige Farbpenetration der Schmelz-Komposit Grenzfläche vorliegt.

Wie in fast allen vergleichbaren Studien (129;155;159) kann auch in dieser Studie gezeigt werden, dass die Adhäsivanwendung den Grad der Farbpenetration von

Kompositrestaurationen verringert. Allerdings sind Ein-Schritt-Adhäsivsysteme gemessen an den Haft- und Farbpenetrationswerten den Etch&Rinse-Adhäsivsystemen unterlegen (8;181;191).

In anderen Studien wurde festgestellt, dass Ein-Schritt-Adhäsivsysteme vor allem im Schmelzbereich deutliche Schwächen aufweisen (21;34). Dies zeigt sich auch in dieser Studie. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch KAHVECİ et al. (106). HEINTZE et al. konnten zudem nachweisen, dass der adhäsive Verbund von AdheSE One keine hohe Hydrolysestabilität besitzt (91). Mögliche Ursachen sind zum einen die geringe Konversionsrate, wie NAVARRA et al. (145) feststellten oder die geringe Konversationsrate in Kombination mit einer sehr dünnen Hybridschicht wie SANTINI et al. in ihrer Arbeit feststellten (169). DIENG-SARR et al. zeigten, dass AdheSE One zu den stark sauren Self-Etch-Adhäsivsystemen zählt (46). Deshalb entstehen bei der Konditionierung viele Kalziumsalze und Wasser, welche nicht oder nur teilweise aus der Hybridschicht entfernt werden können. Dadurch wird die Ausbildung von Nanoleakage begünstigt.

6.2.1.2 Einfluss des Komposit

Bei der Betrachtung der Farbpenetrationswerte (gesamte Restauration, Schmelz- und Dentinbereich) der gesamten Restauration und des Innen- und Randbereichs der Restauration zeigt sich für jedes Material ein gewisser Verlust der marginalen Integrität bis hin zu einer durchgehenden Spaltbildung mit vollständiger Farbpenetration. Unter Adhäsivanwendung zeigten sich durchwegs geringere Penetrationswerte.

In der Kontrollgruppe (ohne das Adhäsiv AdheSE One), liegen die Farbpenetrationswerte sehr nah zusammen und unterscheiden sich nicht signifikant. Ohne Adhäsivanwendung liegen die Farbpenetrationswerte zwischen 87 % und 100 %. Wird hingegen das Adhäsiv AdheSE One verwendet unterscheiden sich die unterschiedlichen Kompositmaterialien statistisch signifikant in ihren Farbpenetrationswerten. Grandio mit Adhäsiv weißt sowohl vor, als auch nach thermomechanischer Wechselbelastung die geringsten Farbpenetrationswerte auf. Vor thermomechanischer Wechselbelastung unterscheiden sich die übrigen beiden Materialien nicht signifikant in ihren Farbpenetrationswerten. Nach

thermomechanischer Wechselbelastung, weiß Tetric Evo Ceram signifikant geringere Farbpenetrationswerte als als auf. Anders als man bei der Auswahl der Füllungsmaterialien vermutet, zeigte sich in der vorliegenden Untersuchung kein direkter Zusammenhang zwischen den Polymerisationsstresswerten der Füllungsmaterialien (vgl. Kapitel 2.5) und dem Ausmaß der Farbpenetration.

ASMUSSEN et al. stellten in ihrer Untersuchung fest, dass für eine optimale Adaptation des Füllungsmaterials an den Zahnhartsubstanzen das Komposit und das Adhäsivsystem aufeinander abgestimmt sein müssen (12). In mehreren Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die marginale Integrität der Restauration wesentlich von beiden Komponenten abhängig ist (47;116). Die Materialeigenschaften der Komposite, die einen entscheidenden Einfluss auf die marginale Integrität der Restauration haben sind Polymerisationsschrumpfung, das Elastizitätsmodul und die thermischen Ausdehnungskoeffizienten (26;79;82;157).

ILIE et al. konnten zeigen, dass auch die Polymerisationsschrumpfung einen signifikanten Einfluss auf die marginale Integrität besitzt (97). UNO et al. wiesen in ihrer Studie nach, dass eine Reduktion des Polymerisationsstress zu höheren Haftwerten zwischen der Zahnhartsubstanz und dem Füllungskomposit führt (186). Zu ähnlichen Ergebnissen kamen auch DAVIDSON et al. in ihrer Untersuchung (42).

In dieser Studie konnte jedoch kein direkter Zusammenhang zwischen der Höhe des Polymerisationsstress und den Farbpenetrationswerten nachgewiesen werden. Zu einem ähnlichen Ergebnis kamen auch KLUG et al. in ihrer Untersuchung zum Einfluss eines Ein-Schritt-Adhäsivsystems auf die marginale Integrität von Klasse-V-Restaurationen mit drei unterschiedlichen konventionellen Kompositen (119). Diese Ergebnisse stehen auch im Einklang mit den Untersuchungen von CALHEIROS et al. (32). Sie konnten in ihrer Untersuchung bei zylindrischen Klasse-V-Restaurationen zeigen, dass der Polymerisationsstress nicht für jedes verwendete Adhäsivsystem einen signifikanten Einfluss auf die marginale Integrität (Farbpenetrationstest) der Restauration besitzt (Adper Single Bond 2 zeigte einen direkten Zusammenhang zwischen Polymerisationsstress und marginaler Integrität. Bei AdperTM PromptTM L-PopTM war kein direkter Zusammenhang nachzuweisen) (32). GERDOLLE et al. konnten in ihrer Farbpenetrationsuntersuchung von Klasse-V-Restaurationen keinen direkten Zusammenhang zwischen Polymerisationsschrumpfung und marginaler Integrität nachweisen (75).

6.2.1.3 Einfluss der Zeit

In der vorliegenden Studie wurden die Proben sowohl vor, als auch nach thermomechanischer Wechselbelastung untersucht. Durch Anwendung der Error-Rates-Methode konnte nachgewiesen werden, dass die künstliche Alterung der Proben keinen signifikanten Einfluss auf das Auftreten der Farbpenetration entlang der Restaurationsgrenze besaß, unabhängig der Adhäsivanwendung und des Materials. Bei der Betrachtung der Medianwerte fällt allerdings auf, dass in vielen Fällen durch thermomechanische Wechselbelastung eine Verschlechterung der Randqualität auftritt. Besonders stark fällt das bei der Betrachtung der Farbpenetration im Zahnschmelz auf. Allerdings weisen die untersuchten Proben zum Teil schon vor der thermomechanischen Wechselwirkung sehr hohe Farbpenetrationswerte auf, dass eine nachfolgende Belastung keine deutliche Erhöhung der Medianfarbpenetrationen mehr erbringen kann.

In vergleichbaren Studien konnte gezeigt werden, dass thermomechanische Alterung einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Randqualität von Klasse-V-Kompositrestaurationen besitzen kann (130;135;161). Diesen Effekt fanden auch BELLi et al. bei ihrer Untersuchung mit AdheSE One(14).

In anderen Studien konnte dagegen nachgewiesen werden, dass die thermomechanische Wechselbelastung nicht immer einen Einfluss auf die Randqualität von Klasse-V-Restaurationen besitzen muss (3;8;49). Dies ist vor allem dann der Fall, wenn schon vor der thermomechanischen Wechselbelastung hohe Farbpenetrationswerte vorhanden waren (71).

6.2.2 Lage der Farbpenetration

Erstmalig in der Literatur wurde in dieser Studie versucht durch einen Zahlencode nachzuweisen aus welcher Richtung die Farbpenetration erfolgte. Dazu wurde die prozentuale Häufigkeit der Farbpenetration an drei Orten der Kompositrestauration gemessen. Diese waren der Rand der Restauration im Schmelz, der Rand der Restauration im Dentin und die Schmelz-Dentin-Grenze.

Bei der Untersuchung des Ortes der Farbpenetration konnte ermittelt werden, dass das Adhäsivsystem in Schmelzbereichen (Code 91xx) wie auch bei der prozentualen

Farbpenetrationsauswertung Schwächen aufweist. Die Randqualität war ohne Adhäsivanwendung ohne TCML bei allen Materialien deutlich höher als bei alleiniger Schmelzätzung. Nach TCML lagen die Farbpenetrationswerte mit AdheSE One nahe bei 100 %, wo hingegen die Werte bei alleiniger Schmelzätzung bei 50 % lagen. Mit Ausnahme von Tetric Evo Ceram vor TCML mit AdheSE One lagen die Farbpenetrationswerte der einzelnen Materialien eng beisammen.

An der Übergangszone vom Schmelz zum Dentin (Code 9x1x) konnte dagegen vor thermomechanischer Wechselbelastung durch Adhäsivanwendung eine deutliche Verringerung der Farbpenetration erreicht werden. Nach TCML war das nur noch für das Komposit als möglich. Der apikal im Dentin gelegene Füllungsrand (Code 9xx1) wies bei fast allen Prüfgruppen einen Integritätsverlust auf.

In der Literatur werden bis jetzt nur Bewertungsfaktoren für den Grad der Farbpenetration verwendet (13;105;137). Jedoch wurde bisher nicht versucht die Richtung der Farbpenetration der Färbelösung mithilfe eines Zahlencodes festzuhalten und auszuwerten. In der vorliegenden Studie wurde hingegen mit einem Zahlencode die Lage der aufgetretenen Farbpenetration genauer bestimmt. Dabei ließ sich gut erkennen, dass am Dentin das Eindringen von Färbelösung nur in sehr seltenen Fällen ganz zu vermeiden war. Eine direkte Korrelation zur prozentualen Farbpenetration war jedoch aufgrund der möglicherweise nicht linear zur Schnittfläche auftretenden Farbpenetration nicht möglich.

7. Zusammenfassung

In der vorliegenden in vitro Untersuchung sollte der Frage nachgegangen werden, ob die marginale Integrität bei Klasse-V-Kompositrestaurationen von unterschiedlichen Faktoren, wie Schrumpfung oder Polymerisationsstress, durch die Anwendung eines Ein-Schritt-Adhäsivsystems, oder künstliche Alterung beeinflusst werden kann.

Hierfür wurden die Vestibulärflächen von 144 extrahierten menschlichen Molaren mit Klasse-V-Kompositrestaurationen versorgt. Die Kavitäten wurden mit dem Ein-Schritt-Adhäsiv AdheSE One vorbehandelt und mit drei konventionellen Kompositen (els, Tetric Evo Ceram, Grandio), welche unterschiedliche Polymerisationsstresswerte aufweisen gefüllt. Als Kontrollgruppe wurden Kompositrestaurationen ohne Adhäsivanwendung verwendet (die Kavität, sowohl Schmelz als auch Dentin wurden vor der Restauration mit Phosphorsäure behandelt). Alle Proben wurden sowohl vor, als auch nach thermomechanischer Wechselbelastung untersucht. Zur Beurteilung der marginalen Integrität der Füllungen wurden vorhandene Spalträume durch Farbpenetration mit Silberionen sichtbar gemacht. Anschließend wurden die Probekörper in vestibulär oraler Richtung in 300 µm dicke Scheiben geschnitten und die Farbpenetration ausgewertet. Die Ergebnisse der prozentualen Farbpenetrationswerte veranschaulichen den Einfluss des Adhäsivsystems. Im Schmelzbereich führte die Anwendung des Adhäsivsystems AdheSE One eher zu einer Verschlechterung der marginalen Integrität. Im Dentinbereich dagegen war eine statistisch signifikante Verbesserung der Adaptation des Komposit an die Zahnhartsubstanz zu erkennen. Die drei verwendeten Komposite zeigen unterschiedliche Farbpenetrationswerte. Es konnte jedoch kein Zusammenhang „niedrigerer Polymerisationsstress => weniger Farbpenetrationswerte“ nachgewiesen werden. Über den Einfluss der thermomechanischen Wechselbelastung kann im Rahmen dieser Studie keine Aussage getroffen werden. Sie führte nur in manchen Fällen zu einer Abnahme der Randqualität, dieser Effekt war in der vorliegenden Studie nicht statistisch signifikant.

Die marginale Qualität von Klasse-V-Restaurationen kann durch die Anwendung des Ein-Schritt-Adhäsivsystems AdheSE One beeinflusst werden, es bleiben jedoch Randspalten nachweisbar. Offensichtlich haben weitere Faktoren wie Materialzusammensetzung der Komposite, physikalische Parameter, Kavitätengeometrie, Füllungs-, und Polymerisationsmodus einen entscheidenden Einfluss auf den Erhalt der marginalen Integrität von Kompositrestaurationen.

8. Anhang

8.1 Farbpenetration bezogen auf die gesamte Füllung

FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	89,0	85,6	98,8	73,1	41,4	95,3
	Tetric Evo Ceram	100,0	97,1	100,0	100,0	85,7	100,0
	Grandio	96,3	85,3	100,0	40,8	28,2	68,1
mit TCML	els	100,0	100,0	100,0	100,0	91,4	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	69,6	58,9	98,6
	Grandio	100,0	100,0	100,0	53,4	34,9	96,6

FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Schmelz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	46,1	22,1	87,9	100,0	100,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	69,3	100,0	100,0	100,0	100,0
	Grandio	61,8	5,1	100,0	57,0	26,6	100,0
mit TCML	els	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Grandio	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Dentin/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	100,0	100,0	100,0	78,5	45,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	100,0	81,8	100,0
	Grandio	100,0	100,0	100,0	51,0	18,7	81,3
mit TCML	els	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	63,1	47,6	98,2
	Grandio	100,0	100,0	100,0	35,0	19,0	94,4

FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	6,6	5,6	14,9	9,5	7,0	18,3
	Tetric Evo Ceram	14,8	9,3	23,8	28,2	17,7	38,2
	Grandio	7,0	0,5	11,5	9,4	4,6	14,9
mit TCML	els	25,3	17,7	40,6	27,4	26,1	30,7
	Tetric Evo Ceram	15,4	11,3	20,5	25,1	21,4	27,8
	Grandio	22,4	17,5	42,4	28,1	20,7	38,5

FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	88,0	85,3	91,9	68,9	38,8	80,0
	Tetric Evo Ceram	91,7	85,3	93,1	73,6	60,7	87,2
	Grandio	92,4	85,2	94,8	38,0	14,9	65,3
mit TCML	els	88,6	83,0	92,6	74,8	67,5	85,3
	Tetric EvoFlow	74,8	67,5	85,3	53,1	38,0	75,5
	Ultraseal XT plus	88,5	81,5	91,0	25,2	15,8	55,4

Tabelle 6: Farbpenetration in Prozent der gesamten Restauration für die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio ohne und mit TCML, ohne und mit Adhäsiv. Es werden die Medianwerte, 25%-Perzentilen und 75%-Perzentilen dargestellt.

8.2 Farbpenetration für den Innenteil der Füllung

FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	87,2	82,9	94,5	69,8	41,4	80,4
	Tetric Evo Ceram	97,8	92,0	100,0	80,7	68,5	97,4
	Grandio	93,3	83,2	100,0	31,9	10,2	54,0
mit TCML	els	100,0	90,8	100,0	84,0	75,8	100,0
	Tetric Evo Ceram	89,5	81,7	98,3	69,6	58,2	80,2
	Grandio	94,0	83,5	100,0	33,7	29,6	36,3

FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Schmelz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	24,1	11,8	85,6	100,0	31,2	100,0
	Tetric Evo Ceram	78,7	31,4	100,0	100,0	100,0	100,0
	Grandio	32,4	0,0	100,0	34,2	6,3	51,3
mit TCML	els	100,0	56,1	100,0	100,0	100,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	76,5	32,6	100,0	100,0	100,0	100,0
	Grandio	100,0	46,0	100,0	100,0	100,0	100,0

FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Dentin/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	100,0	100,0	100,0	78,5	44,7	97,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	82,3	73,0	100,0
	Grandio	100,0	100,0	100,0	29,9	8,8	55,9
mit TCML	els	100,0	100,0	100,0	82,6	76,2	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	63,1	47,6	75,4
	Grandio	100,0	100,0	100,0	18,6	14,2	21,7

FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	6,6	5,6	14,9	7,3	4,4	10,0
	Tetric Evo Ceram	10,9	4,3	17,3	16,6	14,4	23,6
	Grandio	2,8	0,0	11,5	4,8	1,0	9,4
mit TCML	els	12,9	6,0	25,1	19,3	16,0	25,1
	Tetric Evo Ceram	9,5	4,5	13,4	22,7	18,2	26,0
	Grandio	15,7	5,6	24,6	22,7	18,0	25,6

FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	87,2	81,7	91,9	68,1	38,6	73,5
	Tetric Evo Ceram	87,9	84,8	92,5	66,2	59,0	71,3
	Grandio	89,6	81,3	94,8	25,2	7,0	44,6
mit TCML	els	87,2	81,8	91,2	70,5	61,2	76,7
	Tetric EvoFlow	86,2	78,5	89,2	53,1	38,0	62,7
	Ultraseal XT plus	84,2	80,0	88,7	15,1	11,4	17,8

Tabelle 7: Farbpenetration in Prozent der gesamten Restauration für die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio ohne und mit TCML, ohne und mit Adhäsiv. Es werden die Medianwerte, 25%-Perzentilen und 75%-Perzentilen dargestellt.

8.3 Farbpenetration für den Randteil der Füllung

FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	87,6	84,9	92,7	64,6	33,5	94,7
	Tetric Evo Ceram	100,0	93,2	100,0	100,0	81,9	100,0
	Grandio	96,0	84,3	100,0	33,8	25,3	45,9
mit TCML	els	100,0	100,0	100,0	100,0	83,9	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	59,6	51,6	98,6
	Grandio	100,0	100,0	100,0	53,4	34,9	96,6

FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Schmelz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	45,3	20,5	68,5	100,0	41,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	47,6	100,0	100,0	100,0	100,0
	Grandio	61,8	4,7	100,0	50,0	1,1	100,0
mit TCML	els	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
	Grandio	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Dentin/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	100,0	100,0	100,0	69,8	30,2	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	100,0	81,8	100,0
	Grandio	100,0	100,0	100,0	33,7	10,4	80,2
mit TCML	els	100,0	100,0	100,0	100,0	92,6	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0	100,0	51,6	41,1	98,2
	Grandio	100,0	100,0	100,0	35,0	19,0	94,4

FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	6,6	5,6	14,9	6,5	4,7	16,5
	Tetric Evo Ceram	11,9	8,2	21,4	27,7	17,6	38,2
	Grandio	6,6	,5	9,4	7,4	,7	14,2
mit TCML	els	25,3	17,6	40,6	27,0	14,7	30,7
	Tetric Evo Ceram	15,4	7,0	20,5	24,7	21,1	25,2
	Grandio	18,9	11,6	30,6	28,1	20,7	38,5

FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit		ohne Adhäsiv			mit Adhäsiv		
		Med	25%	75%	Med	25%	75%
ohne TCML	els	87,0	76,4	90,5	60,3	28,7	80,0
	Tetric Evo Ceram	90,2	71,4	93,0	69,9	51,9	83,2
	Grandio	91,5	84,3	92,5	27,1	8,4	34,9
mit TCML	els	83,0	77,4	92,6	72,5	64,2	85,3
	Tetric EvoFlow	87,0	85,1	89,0	43,8	31,7	75,5
	Ultraseal XT plus	85,8	74,0	90,1	25,2	13,0	55,5

Tabelle 8: Farbpenetration in Prozent der gesamten Restauration für die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio ohne und mit TCML, ohne und mit Adhäsiv. Es werden die Medianwerte, 25%-Perzentilen und 75%-Perzentilen dargestellt.

8.4 Signifikanztabellen

In den folgenden Tabellen sind die Signifikanzwerte der einzeln untersuchten Parameter Adhäsiv, Material und Zeit dargestellt. Angegeben sind Werte für die gesamte Restauration, den Innenbereich und den Randbereich. Bei dem Vermerk „n.s.“ (= nicht signifikant) wurde für die Irrtumswahrscheinlichkeit der Wert $p > 0,05$ ermittelt.

Die Error-Rates-Method bezieht sich auf folgende Werte für α^* :

$\alpha^* (k=6) = 0,00851244$ (geltend für Adhäsiv und Zeit)

$\alpha^* (k=12) = 0,00426532$ (geltend für Material)

8.4.1 Signifikanztabellen gesamte Restauration

8.4.1.1 Adhäsiv gegeneinander

Kriterium	Parameter	Material		
		Adhäsiv	els	Tetric Evo Ceram
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,02	n.s.	0
	mit TCML	n.s.	0,002	0,001
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	0,001	0,005	0
	mit TCML	0,002	0	0
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,045	n.s.
	mit TCML	n.s.	0,007	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,007	0,028	0
	mit TCML	0,01	0	0
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,014	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	0,002	n.s.

Tabelle 9: Signifikanzwerte im Adhäsivvergleich: kein Adhäsiv (Anätzen der Kavität) und Ein-Schritt-Adhäsivsystem AdheSE One in Abhängigkeit von Komposit (els, Tetric Evo Ceram und Grandio) und Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.1.2 Material gegeneinander ohne Adhäsivanwendung

Kriterium	Parameter Material	Material ohne Adhäsiv		
		els – Tetric Evo Ceram	Tetric Evo Ceram – Grandio	els – Grandio
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	0,024	0,006	n.s.
	mit TCML	0,02	0,017	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	0,014
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,02	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.

Tabelle 10: Signifikanzwerte im Materialvergleich: els, Tetric Evo Ceram und Grandio ohne Adhäsivanwendung (Anätzen der Kavität) in Abhängigkeit von Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.1.3 Material gegeneinander mit Adhäsivanwendung

Kriterium	Parameter Material	Material mit Adhäsiv		
		els – Tetric Evo Ceram	Tetric Evo Ceram – Grandio	els – Grandio
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,001	n.s.
	mit TCML	0,01	n.s.	0,006
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,02	n.s.
	mit TCML	0,017	n.s.	0
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	0,02	0	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,02	n.s.
	mit TCML	0	n.s.	0
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,002	0,014
	mit TCML	0,14	n.s.	n.s.

Tabelle 11: Signifikanzwerte im Materialvergleich: els, Tetric Evo Ceram und Grandio mit Adhäsivanwendung (Anätzen der Kavität) in Abhängigkeit von Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.1.4 Zeit gegeneinander

Kriterium	Parameter	Material		
		Zeit	els	Tetric Evo Ceram
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	0,007	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	0,014	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne Adhäsiv	0	n.s.	0
	mit Adhäsiv	0,004	n.s.	0
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	0,028	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	0,002	n.s.	0,024
	mit Adhäsiv	n.s.	n.s.	0

Tabelle 12: Signifikanzwerte im Zeitvergleich: ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung in Abhängigkeit von Adhäsiv (ohne und mit Adhäsiv) und Komposit (els, Tetric Evo Ceram und Grandio).

8.4.2 Signifikanzwerte für den Innenbereich der Restauration

8.4.2.1 Adhäsiv gegeneinander

Kriterium	Parameter	Material		
		Adhäsiv	els	Tetric Evo Ceram
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,002	0,033	0
	mit TCML	0,024	0,001	0
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	0,002	0	0
	mit TCML	0	0	0
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,078	n.s.
	mit TCML	n.s.	0	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0	0,002	0
	mit TCML	0,001	0	0
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,028	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	0,001	0,028

Tabelle 13: Signifikanzwerte im Adhäsivvergleich: kein Adhäsiv (Anätzen der Kavität) und Ein-Schritt-Adhäsivsystem AdheSE One in Abhängigkeit von Komposit (els, Tetric Evo Ceram und Grandio) und Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.2.2 Material gegeneinander ohne Adhäsivanwendung

Kriterium	Parameter Material	Material ohne Adhäsiv		
		els – Tetric Evo Ceram	Tetric Evo Ceram – Grandio	els– Grandio
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,045	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,039	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	0,039
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.

Tabelle 14: Signifikanzwerte im Materialvergleich: els, Tetric Evo Ceram und Grandio ohne Adhäsivanwendung (Anätzen der Kavität) in Abhängigkeit von Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.2.3 Material gegeneinander mit Adhäsivanwendung

Kriterium	Parameter Material	Material mit Adhäsiv		
		els – Tetric Evo Ceram	Tetric Evo Ceram – Grandio	els – Grandio
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,001	0,008
	mit TCML	0,012	0	0
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,01	0,012
	mit TCML	0,002	0	0
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	0,001	0,001	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,006	0,007
	mit TCML	0,001	0	0
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0	0,028
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.

Tabelle 15: Signifikanzwerte im Materialvergleich: els, Tetric Evo Ceram und Grandio mit Adhäsivanwendung (Anätzen der Kavität) in Abhängigkeit von Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.2.4 Zeit gegeneinander

Kriterium	Parameter	Material		
		Zeit	els	Tetric Evo Ceram
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	0,024	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	0,020	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne Adhäsiv	0,010	n.s.	0,006
	mit Adhäsiv	0	0,045	0
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	0,010	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	n.s.	n.s.	0

Tabelle 16: Signifikanzwerte im Zeitvergleich: ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung in Abhängigkeit von Adhäsiv (ohne und mit Adhäsiv) und Komposit (els, Tetric Evo Ceram und Grandio).

8.4.3 Signifikanztabellen für den Randbereich der Füllung

8.4.3.1 Adhäsiv gegeneinander

Kriterium	Parameter	Material		
		Adhäsiv	els	Tetric Evo Ceram
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,033	n.s.	0
	mit TCML	n.s.	0,002	0,001
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	0,002	0,014	0
	mit TCML	n.s.	0	0
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,033	n.s.
	mit TCML	n.s.	0,024	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	0,006	n.s.	0
	mit TCML	n.s.	0	0
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	0,033	n.s.

Tabelle 17: Signifikanzwerte im Adhäsivvergleich: kein Adhäsiv (Anätzen der Kavität) und Ein-Schritt-Adhäsivsystem AdheSE One in Abhängigkeit von Komposit (els, Tetric Evo Ceram und Grandio) und Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.3.2 Material gegeneinander ohne Adhäsivanwendung

Kriterium	Parameter Material	Material ohne Adhäsiv		
		els – Tetric Evo Ceram	Tetric Evo Ceram – Grandio	els – Grandio
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,033	n.s.
	mit TCML	0,017	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	n.s.	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.

Tabelle 18: Signifikanzwerte im Materialvergleich: els, Tetric Evo Ceram und Grandio ohne Adhäsivanwendung (Anätzen der Kavität) in Abhängigkeit von Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.3.3 Material gegeneinander mit Adhäsivanwendung

Kriterium	Parameter Material	Material mit Adhäsiv		
		els – Tetric Evo Ceram	Tetric Evo Ceram – Grandio	els – Grandio
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,001	n.s.
	mit TCML	0,014	n.s.	0,012
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,008	n.s.
	mit TCML	0,014	n.s.	0
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne TCML	0,010	0	n.s.
	mit TCML	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,014	n.s.
	mit TCML	0,002	n.s.	0,001
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne TCML	n.s.	0,014	n.s.
	mit TCML	0,033	n.s.	n.s.

Tabelle 19: Signifikanzwerte im Materialvergleich: els, Tetric Evo Ceram und Grandio mit Adhäsivanwendung (Anätzen der Kavität) in Abhängigkeit von Zeit (ohne TCML, mit TCML).

8.4.3.4 Zeit gegeneinander

Kriterium	Parameter Zeit	Material		
		els	Tetric Evo Ceram	Grandio
FP insgesamt bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	0,001	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	0,007	n.s.	0,045
FP im Schmelz bezogen auf die Länge der Grenzfläche Schmelz/Komposit	ohne Adhäsiv	n.s.	n.s.	0,033
	mit Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Länge der Grenzfläche Dentin/Komposit	ohne Adhäsiv	0	n.s.	0
	mit Adhäsiv	0,007	n.s.	0
FP im Schmelz bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	n.s.	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	0,028	n.s.	n.s.
FP im Dentin bezogen auf die Gesamtlänge der Grenzfläche Zahnhartsubstanz/Komposit	ohne Adhäsiv	0	n.s.	n.s.
	mit Adhäsiv	n.s.	n.s.	0,006

Tababelle 20: Signifikanzwerte im Zeitvergleich: ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung in Abhängigkeit von Adhäsiv (ohne und mit Adhäsiv) und Komposit (els, Tetric Evo Ceram und Grandio).

8.5 Lage der Farbpenetration

Die Tabellen 21 bis 24 fassen die Ergebnisse der Lager der Farbpenetration (Prinzip Maximum) in Prozent für die Komposite els, Tetric Evo Ceram und Grandio ohne und mit Adhäsivanwendung, sowie ohne und mit thermomechanischer Wechselbelastung zusammen (Median).

CODE 91xx (in %)		ohne Adhäsiv	mit Adhäsiv
ohne TCML	els	28,8	43,9
	Tetric Evo Ceram	43,5	82,5
	Grandio	28,6	36,0
mit TCML	els	48,6	91,0
	Tetric Evo Ceram	35,6	96,6
	Grandio	41,3	98,9

Tabelle 21: Prozentuale Häufigkeit des Eindringens von Silbernitratlösung beginnend am koronal gelegenen Füllungsrand im Schmelz, Code 91xx. Untersucht werden die Komposite els, Tetric Evo Ceram ohne und mit Adhäsiv, sowie vor und nach thermomechanischer Wechselbelastung.

CODE 9x1x (in %)		ohne Adhäsiv	mit Adhäsiv
ohne TCML	Els	26,0	5,9
	Tetric Evo Ceram	37,4	21,7
	Grandio	23,9	0,5
mit TCML	Els	67,0	34,5
	Tetric Evo Ceram	23,1	71,0
	Grandio	30,1	53,9

Tabelle 22: Prozentuale Häufigkeit des Überschreitens der Schmelz-Dentin-Grenze, Code 9x1x. Untersucht werden die Komposite els, Tetric Evo Ceram ohne und mit Adhäsiv, sowie vor und nach thermomechanischer Wechselbelastung.

CODE 9xx1 (in %)		ohne Adhäsiv	mit Adhäsiv
ohne TCML	Els	100,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	98,2
	Grandio	100,0	100,0
mit TCML	Els	100,0	100,0
	Tetric Evo Ceram	100,0	100,0
	Grandio	100,0	100,0

Tabelle 23: Prozentuale Häufigkeit des Eindringens von Silbernitratlösung beginnend am apikal gelegenen Füllungsrand im Dentin, Code 9xx1. Untersucht werden die Komposite els, Tetric Evo Ceram ohne und mit Adhäsiv, sowie vor und nach thermomechanischer Wechselbelastung.

CODE 91x1 (in %)		ohne Adhäsiv	mit Adhäsiv
ohne TCML	Els	28,8	43,9
	Tetric Evo Ceram	43,5	82,5
	Grandio	28,6	36,0
mit TCML	Els	48,6	91,0
	Tetric Evo Ceram	35,6	96,6
	Grandio	41,3	98,9

Tabelle 24: Prozentuale Häufigkeit des Eindringens von Silbernitratlösung beginnend am koronal gelegenen Füllungsrand im Schmelz und am apikal gelegenen Füllungsrand im Dentin, Code 91xx. Untersucht werden die Komposite els, Tetric Evo Ceram ohne und mit Adhäsiv, sowie vor und nach thermomechanischer Wechselbelastung.

8.6 Graphen

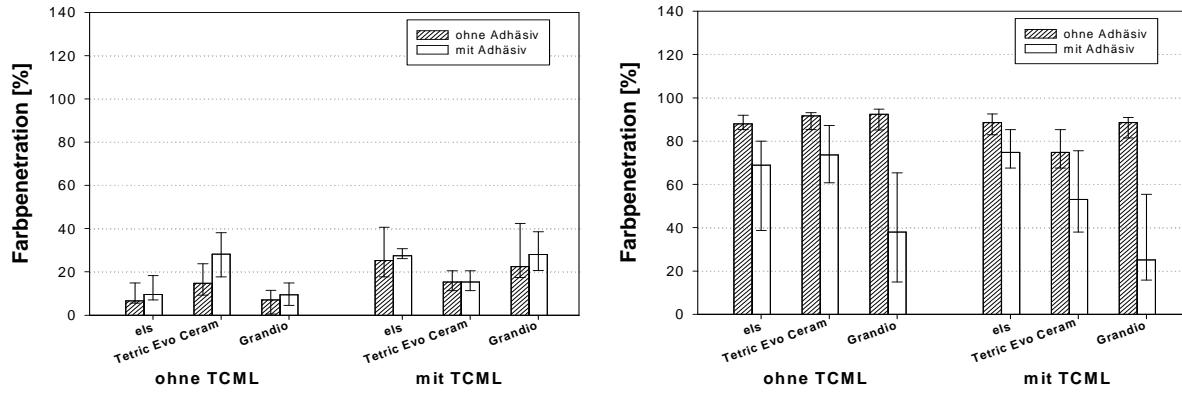


Abbildung 28 und 29: links: prozentuale Farbpenetration im Schmelz in Relation zur Gesamtlänge der Restaurationsgrenze (Schmelz und Dentin) für die gesamte Füllung
rechts: prozentuale Farbpenetration im Dentin in Relation zur Gesamtlänge der Restaurationsgrenze (Schmelz und Dentin) für die gesamte Füllung
Die Füllungsmaterialien els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden jeweils ohne und mit Adhäsiv, sowie vor und nach thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

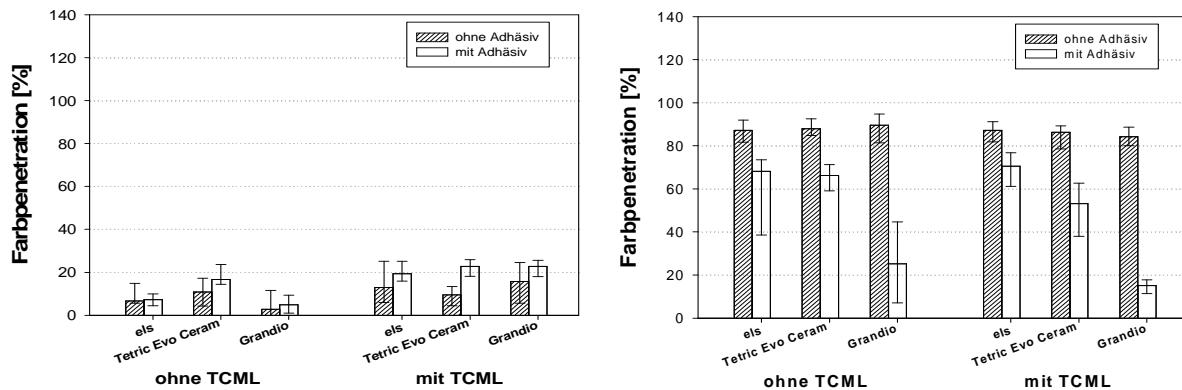


Abbildung 30 und 31: links: prozentuale Farbpenetration im Schmelz in Relation zur Gesamtlänge der Restaurationsgrenze (Schmelz und Dentin) für den Innenteil der Füllung
rechts: prozentuale Farbpenetration im Dentin in Relation zur Gesamtlänge der Restaurationsgrenze (Schmelz und Dentin) für den Innenteil der Füllung
Die Füllungsmaterialien els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden jeweils ohne und mit Adhäsiv, sowie vor und nach thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

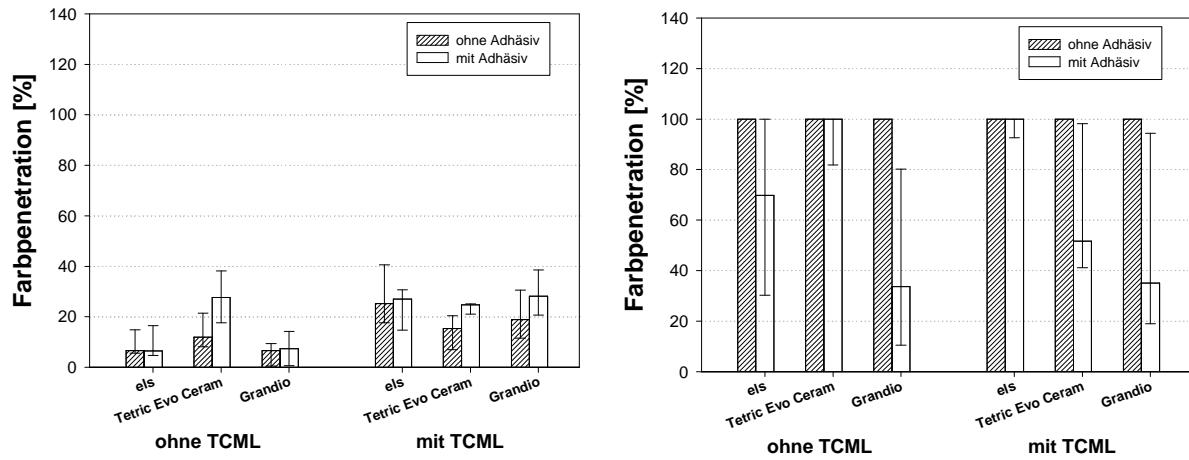


Abbildung 32 und 33: links: prozentuale Farbpenetration im Schmelz in Relation zur Gesamtlänge der Restaurationsgrenze (Schmelz und Dentin) für den Randteil der Füllung
rechts: prozentuale Farbpenetration im Dentin in Relation zur Gesamtlänge der Restaurationsgrenze (Schmelz und Dentin) für den Randteil der Füllung
Die Füllungsmaterialien els, Tetric Evo Ceram und Grandio wurden jeweils ohne und mit Adhäsiv, sowie vor und nach thermomechanischer Wechselbelastung (TCML) untersucht.

9. Materialliste

- [M1] Chloramin T Trihydrat (0,5%), LOT 102426, Fa. Merk KGaA, D-Darmstadt
- [M2] Universalkürette SC 4R4L Nr. 6, Hu-Friedy Mfg. Co. Inc., D-Leimen
- [M3] HAWE Occlubrush kelchförmig, LOT 867286, Fa. Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co KG, D-Lemgo
HAWE Occlubrush zylinderförmig, LOT 867285, Fa. Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co KG, D-Lemgo
HAWE Occlubrush spitzig, LOT 867287, Fa. Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co KG, D-Lemgo
- [M4] Stangenguttapercha (weiß), LOT 666689, Fa. Dentsply DeTrey GmbH, D-Konstanz
- [M5] Pattern Resin LS, Pulver: LOT 5070904, Flüssigkeit: LOT 0502231, Fa. GC Dental Products Corporation, Tokyo (Japan)
- [M6] Kochsalzlösung, Fa. Merk, D-Darmstadt
- [M7] Präparationsdiamant kugelförmig (Ø 1,8 mm), LOT 38090, Fa. Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co KG, D-Lemgo,
Feinkorndiamanten kugelförmig (Ø 2,3 mm), LOT 044754, Fa. Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co KG, D-Lemgo
- [M8] Feinkorndiamanten flammenförmig (Ø 1,6 mm, l = 10 mm), LOT 608267, Fa. Komet, Gebr. Brasseler GmbH & Co KG, D-Lemgo
- [M9] Total Etch (37% Phosphorsäure), LOT J27665, Fa. Ivoclar/Vivadent AG, D-Ellwangen
- [M10] AdheSE One, Fa. LOT K14344, Vivapen Ivoclar/Vivadent AG, D-Ellwangen
- [M11] Spectrum Curing Light Polymerisationslampe S/Nr. 2984 Typ 201.RE, Nr. 14756, Fa. Dentsply DeTrey GmbH, D-Konstanz
- [M12] HS-Kugelstopfer medium, Henry Schein, D-Langen
- [M13] HS-Heidemann spartel mittel, Henry Schein, D-Langen
- [M14] elis extra low shrinkage A3, LOT 07.2011-38, Fa. Saremco Dental AG, Ch-Rebstein
- [M15] Grandio Caps A3, LOT 711044, Fa. Voco, D-Cuxhaven
- [M16] Tetric Evo Ceram A2, LOT J23963, Fa. Ivoclar/Vivadent AG, D-Ellwangen
- [M17] Soflex-Polierscheiben (Ø 9,5 mm), Grob: LOT P061012, Medium: LOT P070605,
Fein: LOT P060411, Superfein: LOT P070426, Fa. 3M ESPE AG, D-Seefeld
- [M18] Polierinstrumente Brownie (LOT: 0808186), Greenie (LOT: 0508197), Fa. Shofu Dental GmbH, D-Ratingen
- [M19] Wärmeschrank Typ U 10, F.-Nr.: 832212, Fa. Memmert GmbH & Co. KG, D-Schwabach
- [M20] TCML-Maschine, Technische Werkstatt der Universität Regensburg, D-Regensburg
- [M21] Impregum Penta Soft, LOT 292022/292861, Fa. 3M ESPE AG, D-Seefeld
- [M22] Epoxidharz: Rencast CW 2215, LOT: AC 76523502, Härter: REN HY 5162,
LOT: AA 51453800, Fa. Gößl & Pfaff GmbH, D-Karlskron / Brautlach

- [M23] *Nagellack rot, lasting finish nail polish 030 Dancin Queen, Ref.-No.: 5464, Fa. Rimmel, London (UK)*
- [M24] *50 Gew% AgNO₃-Lösung (AgNO₃ 99,9% in Aqua bidest), Fa. Carl Roth GmbH & Co, D-Karlsruhe*
- [M25] *Tetenal Ultrafin Plus S/W Feinstkornentwickler, LOT: 736018, Fa. Tetenal AG & Co. KG, D- Norderstedt*
- [M26] *Leuchtstoffröhre Philips Master PL-S 840/2P, 11Watt/900 Lumen, Fa. Treu Elektrogroßhandel GmbH, D-Augsburg*
- [M27] *Paladur Kaltpolymerisat, Pulver (rosa): LOT 015861, Flüssigkeit: LOT 013032, Fa. Heraeus Kulzer GmbH & Co KG, D-Hanau*
- [M28] *Innenlochsäge Leitz 1600, Serien-Nr.: 9711900, Fa. Leica Microsystems GmbH, D-Wetzlar*
- [M29] *Petrischalen, Fa. Merk, D-Darmstadt*
- [M30] *Kamera Canon EOS D30 Typ DS 126131, Serien-Nr.: 0630507968, Canon Inc., Tokyo (Japan)
Makroobjektiv Canon EF 100mm 1/2.8 Macro USM Macrolens, Canon Inc., Tokyo (Japan)*
- [M31] *Ringblitz Canon Macro Ring Lite MR-14EX, Canon Inc., Tokyo (Japan)*
- [M32] *Optimas 6.1, Version 6.21.19, Fa. Media Cybernetics Inc., Bethesda (USA)*
- [M33] *Microsoft Office Excel 2003, Version 11.8237.8221, Fa. Microsoft GmbH, D-Unterschleißheim*
- [M34] *Daten- und Statistikanalyse-Software SPSS 16, Version 5.0, Fa. SPSS/Inc., Chicago, Illinois (USA)*
- [M35] *Sigmaplot 2002, Version 8.0, Fa. Systat Software Inc., San Jose (USA)*

10. Literaturverzeichnis

- (1) Abdalla AI, Davidson CL. Comparison of the marginal and axial wall integrity of in vivo and in vitro made adhesive class V restorations. *J Oral Rehabil* 1993;20(3):257-69.
- (2) Abdalla AI, Feilzer AJ. Two-year water degradation of self-etching adhesives bonded to buccal enamel. *Oper Dent* 2009 Nov;34(6):732-40.
- (3) Aguilar LT, Rezende NP, Reis A, Loguercio AD, Grande RH, Ballester RY, et al. Tensile bond strength of adhesive systems--effects of primer and thermocycling. *Pesqui Odontol Bras* 2002 Jan;16(1):37-42.
- (4) Airolidi RL, Krejci I, Lutz F. In vitro evaluation of dentinal bonding agents in mixed Class V cavity preparations. *Quintessence Int* 1992 May;23(5):355-62.
- (5) Alomari QD, Reinhardt JW, Boyer DB. Effect of liners on cusp deflection and gap formation in composite restorations. *Oper Dent* 2001 Jul;26(4):406-11.
- (6) Althoff O, Hartung M. Advances in light curing. *Am J Dent* 2000 Nov;13(Spec No):77D-81D.
- (7) Anusavice KJ, Brantley WA. *Phillip's Science of Dental Materials*. 11th Edition ed. Philadelphia: WB Saunders; 2003.
- (8) Arisu HD, Uctasli MB, Eliguezeloglu E, Ozcan S, Omuerlue H. The effect of occlusal loading on the microleakage of class V restorations. *Oper Dent* 2008 Mar;33(2):135-41.
- (9) Ariyoshi M, Nikaido T, Foxton RM, Tagami J. Influence of filling technique and curing mode on the bond strengths of composite cores to pulpal floor dentin. *Dent Mater J* 2010 Oct 14;29(5):562-9.
- (10) Asmussen E. Penetration of restorative resins into acid etched enamel. I. Viscosity, surface tension and contact angle of restorative resin monomers. *Acta Odontol Scand* 1977;35(4):175-82.
- (11) Asmussen E, Peutzfeldt A. Direction of shrinkage of light-curing resin composites. *Acta Odontol Scand* 1999 Dec;57(6):310-5.
- (12) Asmussen E, Peutzfeldt A. Resin composites: strength of the bond to dentin versus surface energy parameters. *Dent Mater* 2005 Nov;21(11):1039-43.
- (13) Barkmeier WW, Cooley RL. Laboratory evaluation of adhesive systems. *Oper Dent* 1992;Suppl 5:50-61.
- (14) Belli R, Sartori N, Peruchi LD, Guimaraes JC, Araujo E, Monteiro S Jr, et al. Slow progression of dentin bond degradation during one-year water storage under simulated pulpal pressure. *J Dent* 2010 Jul 3.
- (15) Belli S, Ozcopur B, Yesilyurt C, Bulut G, Ding X, Dorsman G. The effect of loading on microTBS of four all-in-one adhesives on bonding to dentin. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2009 Nov;91(2):948-56.

- (16) Beloica M, Carvalho C, Radocici I, Margevelashilicil M. Efficacy of all-in-one adhesive systems on unground enamel. *Intern Dent SA* 2008 Sep 1;Vol. 10, No. 5(September/October 2008):12-8.
- (17) Beloica M, Goracci C, Carvalho Ca, Radovic I, Margvelashvili M, Vulicevic ZR, et al. Microtensile vs microshear bond strength of all-in-one adhesives to unground enamel. *J Adhes Dent* 2010 Dec;12(6):427-33.
- (18) Ben-Amar A, Pilo R, Shapinko E, Lewinstein I. A microleakage study of single-bottle adhesives applied to enamel and cementum and aged by both occlusal loading and thermocycling. *Quintessence Int* 2005 Mar;36(3):177-82.
- (19) Beun S, Glorieux T, Devaux J, Vreven J, Leloup G. Characterization of nanofilled compared to universal and microfilled composites. *Dent Mater* 2007 Jan;23(1):51-9.
- (20) Blunck U, Zaslansky P. Effectiveness of all-in-one adhesive systems tested by thermocycling following short and long-term water storage. *J Adhes Dent* 2007;9 Suppl 2:231-40.
- (21) Blunck U, Zaslansky P. Enamel margin integrity of Class I one-bottle all-in-one adhesives-based restorations. *J Adhes Dent* 2011 Feb;13(1):23-9.
- (22) Bowen R inventor; Dental filling material comprising vinyl silane treated fused silca and a binder consisting of the reaction product of bisphenol and glycidyl acrylate. 1962.
- (23) Bowen R. Effect of particle shape and size distibution in a reinforced polymer. *J Am Dent Assoc* 1964 Oct;69:481-95.
- (24) 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 Feb;74(3):439-45.
- (25) Braden M, Clarke RL, Nicholson J, Parker S. Polymeric dental materials. Springer Berlin; 1997.
- (26) Braem MJ, Lambrechts P, Gladys S, Vanherle G. In vitro fatigue behavior of restorative composites and glass ionomers. *Dent Mater* 1995 Mar;11(2):137-41.
- (27) Braga RR, Boaro LC, Kuroe T, Azevedo CL, Singer JM. Influence of cavity dimensions and their derivatives (volume and 'C' factor) on shrinkage stress development and microleakage of composite restorations. *Dent Mater* 2006 Sep;22(9):818-23.
- (28) Braga RR, Ferracane JL. Alternatives in polymerization contraction stress management. *Crit Rev Oral Biol Med* 2004;15(3):176-84.
- (29) Breschi L, Mazzoni A, Ruggeri A, Cadenaro M, Di LR, De Stefano DE. Dental adhesion review: aging and stability of the bonded interface. *Dent Mater* 2008 Jan;24(1):90-101.
- (30) Bullard RH, Leinfelder KF, RUSSELL CM. Effect of coefficient of thermal expansion on microleakage. *J Am Dent Assoc* 1988 Jun;116(7):871-4.
- (31) Buonocore M. A simple method of increasing the adhesion of acrylic filling materials to enamel surfaces. *J Dent Res* 1955 Dec;34(6):849-53.
- (32) Calheiros FC, Sadek FT, Boaro LC, Braga RR. Polymerization stress related to radiant exposure and its effect on microleakage of composite restorations. *J Dent* 2007 Dec;35(12):946-52.

- (33) Campos PE, Sampaio Filho HR, Barceleiro MO. Occlusal loading evaluation in the cervical integrity of Class II cavities filled with composite. *Oper Dent* 2005 Nov;30(6):727-32.
- (34) Cardoso MV, de Almeida NA, Mine A, Coutinho E, Van LK, De MJ, et al. Current aspects on bonding effectiveness and stability in adhesive dentistry. *Aust Dent J* 2011 Jun;56 Suppl 1:31-44.
- (35) Chen X, Cuijpers V, Fan M, Frencken JE. Optimal use of silver nitrate and marginal leakage at the sealant-enamel interface using micro-CT. *Am J Dent* 2009 Oct;22(5):269-72.
- (36) Cheung GS. Reducing marginal leakage of posterior composite resin restorations: a review of clinical techniques. *J Prosthet Dent* 1990 Mar;63(3):286-8.
- (37) Choi KK, Condon JR, Ferracane JL. The effects of adhesive thickness on polymerization contraction stress of composite. *J Dent Res* 2000 Mar;79(3):812-7.
- (38) Crawford PJ, Whittaker DK, Owen GM. The influence of enamel prism orientation on leakage of resin-bonded restorations. *J Oral Rehabil* 1987 May;14(3):283-9.
- (39) Crim GA, Swartz ML, Phillips RW. Comparison of four thermocycling techniques. *J Prosthet Dent* 1985 Jan;53(1):50-3.
- (40) Cvitko E, Denehy G, Boyer DB. Effect of matrix systems and polymerization techniques on microleakage of Class II resin composite restorations. *Am J Dent* 1992 Dec;5(6):321-3.
- (41) Dall'Magro E, Correr AB, Costa AR, Correr GM, Consani RL, Correr-Sobrinho L, et al. Effect of different photoactivation techniques on the bond strength of a dental composite. *Braz Dent J* 2010;21(3):220-4.
- (42) Davidson CL, De Gee AJ, Feilzer A. The competition between the composite-dentin bond strength and the polymerization contraction stress. *J Dent Res* 1984 Dec;63(12):1396-9.
- (43) Davidson CL, Feilzer AJ. Polymerization shrinkage and polymerization shrinkage stress in polymer-based restoratives. *J Dent* 1997 Nov;25(6):435-40.
- (44) De Gee AJ, Kleverlaan CJ. Characterization of composites to their shrinkage and contraction stress. 15 September 2006 Trinity College Dublin UiChadhain.
- (45) De Munck, Van Meerbeek B, Satoshi I, Vargas M, Yoshida Y, Armstrong S, et al. Microtensile bond strengths of one- and two-step self-etch adhesives to bur-cut enamel and dentin. *Am J Dent* 2003 Dec;16(6):414-20.
- (46) Dieng-Sarr F, Sharrock P, Dabsie F, Gregoire G. Modifications of the organic and mineral fractions of dental tissues following conditioning by self-etching adhesives. *J Dent* 2011 Feb;39(2):141-7.
- (47) Dietschi D, Maeder M, Campanile G, Holz J. Influence of a new experimental bonding agent on marginal seal of Class V restorations: an in vitro study. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1992;102(12):1455-60.
- (48) Ding PG, Matzer AR, Wolff D, Mente J, Pioch T, Staehle HJ, et al. Relationship between microtensile bond strength and submicron hiatus at the composite-dentin interface using CLSM visualization technique. *Dent Mater* 2009 Dec 4.

- (49) Dos Santos PA, Garcia PP, Palma-Dibb RG. Shear bond strength of adhesive systems to enamel and dentin. Thermocycling influence. *J Mater Sci Mater Med* 2005 Aug;16(8):727-32.
- (50) Douglas WH, Fields RP, Fundingsland J. A comparison between the microleakage of direct and indirect composite restorative systems. *J Dent* 1989 Aug;17(4):184-8.
- (51) Eichner K, Kappert HF. *Zahnärztliche Werkstoffe und ihre Verarbeitung 1: Grundlagen und ihre Verarbeitung*. Thieme Georg Verlag; 2005.
- (52) Eick JD, Robinson SJ, Chappell RP, Cobb CM, Spencer P. The dentinal surface: its influence on dentinal adhesion. Part III. *Quintessence Int* 1993 Aug;24(8):571-82.
- (53) Eick JD, Welch FH. Polymerization shrinkage of posterior composite resins and its possible influence on postoperative sensitivity. *Quintessence Int* 1986 Feb;17(2):103-11.
- (54) Eliades GC, Vougiouklakis GJ, Caputo AA. Degree of double bond conversion in light-cured composites. *Dent Mater* 1987 Feb;3(1):19-25.
- (55) Ernst CP, Canbek K, Euler T, Willershausen B. In vivo validation of the historical in vitro thermocycling temperature range for dental materials testing. *Clin Oral Investig* 2004 Sep;8(3):130-8.
- (56) Ernst CP, Willershausen B. Eine aktuelle Standortbestimmung zahnärztlicher Füllungskomposite. *ZM* 2003;93:30-40.
- (57) Farea M, Masudi S, Wan Bakar WZ. Apical microleakage evaluation of system B compared with cold lateral technique: In vitro study. *Aust Endod J* 2010 Aug;36(2):48-53.
- (58) Federlin M, Krifka S, Herpich M, Hiller KA, Schmalz G. Partial ceramic crowns: influence of ceramic thickness, preparation design and luting material on fracture resistance and marginal integrity in vitro. *Oper Dent* 2007 May;32(3):251-60.
- (59) Federlin M, Sipos C, Hiller KA, Thonemann B, Schmalz G. Partial ceramic crowns. Influence of preparation design and luting material on margin integrity--a scanning electron microscopic study. *Clin Oral Investig* 2005 Mar;9(1):8-17.
- (60) Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res* 1987 Nov;66(11):1636-9.
- (61) Ferrance JL. Status of research on new fillers and new resins for dental composites. In: Tagami J, Toledano M, Prati C, editors. *Advanced adhesive dentistry. Third International Kuraray Symposium. Cirimido (Como), Italy by Erredue G; 1999*. p. 3-29.
- (62) Ferracane JL. Developing a more complete understanding of stresses produced in dental composites during polymerization. *Dent Mater* 2005 Jan;21(1):36-42.
- (63) Ferracane JL, Berge HX, Condon JR. In vitro aging of dental composites in water--effect of degree of conversion, filler volume, and filler/matrix coupling. *J Biomed Mater Res* 1998 Dec 5;42(3):465-72.
- (64) Ferrari M, Tay FR. Technique sensitivity in bonding to vital, acid-etched dentin. *Oper Dent* 2003 Jan;28(1):3-8.

- (65) Finger W, Thiemann J. Correlation between in vitro and in vivo wear of posterior restorative materials. *Dent Mater* 1987 Oct;3(5):280-6.
- (66) Finger WJ. Dentin bonding agents. Relevance of in vitro investigations. *Am J Dent* 1988 Sep;1 Spec No:184-8.
- (67) Frankenberger R, Strobel WO, Taschner M, Krämer N, Petschelt A. Total Etch vs. Self-Etch-Evaluation klassischer Parameter unterschiedlicher Adhäsivsysteme Total Etch vs. Self-etch-Evaluation of Characteristic Parameters of Different Adhesive Systems. *ZWR* 2004;113:188-96.
- (68) Friedl KH, Schmalz G, Hiller KA, Markl A. Marginal adaption of Class V restorations with and without "softstart-polymerization". *Oper Dent* 2000 Jan;25(1):26-32.
- (69) Froes-Salgado NR, Pfeifer CS, Francci CE, Kawano Y. Influence of photoactivation protocol and light guide distance on conversion and microleakage of composite restorations. *Oper Dent* 2009 Jul;34(4):408-14.
- (70) Furuya K. Electron microscopic study of canine dentin and odontoblast following the insertion of various composite resin monomers. *Fukuoka Shika Daigaku Gakkai Zasshi* 1989;16(4):572-99.
- (71) Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent* 1999 Feb;27(2):89-99.
- (72) Gale MS, Darvell BW, Cheung GS. Three-dimensional reconstruction of microleakage pattern using a sequential grinding technique. *J Dent* 1994 Dec;22(6):370-5.
- (73) Gallo JR, III, Bates ML, Burgess JO. Microleakage and adaptation of Class II packable resin-based composites using incremental or bulk filling techniques. *Am J Dent* 2000 Aug;13(4):205-8.
- (74) Gente M, Sommer AP. Verringerung der linearen Schrumpfung lichthärtbarer Komposite durch selektive Bestrahlung. *Dtsch Zahnärztl* 1999;729-31.
- (75) Gerdolle DA, Mortier E, Droz D. Microleakage and polymerization shrinkage of various polymer restorative materials. *J Dent Child (Chic)* 2008 May;75(2):125-33.
- (76) Giachetti L, Scaminaci RD, Bertini F, Pierleoni F, Nieri M. Effect of operator skill in relation to microleakage of total-etch and self-etch bonding systems. *J Dent* 2007 Apr;35(4):289-93.
- (77) Gladys S, Van MB, Lambrechts P, Vanherle G. Microleakage of adhesive restorative materials. *Am J Dent* 2001 Jun;14(3):170-6.
- (78) Gordan VV, Vargas MA, Cobb DS, Denehy GE. Evaluation of acidic primers in microleakage of Class 5 composite resin restorations. *Operative dentistry* 1998 Sep;23(5):244-9.
- (79) Guggenberger R, Weinmann W. Exploring beyond methacrylates. *Am J Dent* 2000 Nov;13(Spec No):82D-4D.
- (80) Gwinnett AJ. Bonding of restorative resins to enamel. *Int Dent J* 1988 Jun;38(2):91-6.
- (81) Hahn P, Weyen G, Fischer P, Plogmann S, Hannig M. Marginal and internal adaptation of composite restorations to dentin in vivo and in vitro. *Am J Dent* 2008 Dec;21(6):356-60.

- (82) Haller B. Recent developments in dentin bonding. *Am J Dent* 2000 Feb;13(1):44-50.
- (83) Haller B, Hofmann N, Klaiber B, Bloching U. Effect of storage media on microleakage of five dentin bonding agents. *Dent Mater* 1993 May;9(3):191-7.
- (84) Hannig M, Friedrichs C. Comparative in vivo and in vitro investigation of interfacial bond variability. *Oper Dent* 2001 Jan;26(1):3-11.
- (85) Hashimoto M. A review--micromorphological evidence of degradation in resin-dentin bonds and potential preventional solutions. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater* 2010 Jan;92(1):268-80.
- (86) Hashimoto M, Fujita S, Endo K, Ohno H. In vitro degradation of resin-dentin bonds with one-bottle self-etching adhesives. *Eur J Oral Sci* 2009 Oct;117(5):611-7.
- (87) He Z, Shimada Y, Sadr A, Ikeda M, Tagami J. The effects of cavity size and filling method on the bonding to Class I cavities. *J Adhes Dent* 2008 Dec;10(6):447-53.
- (88) HEINTZE S, Forjanic M, Cavalleri A. Microleakage of Class II restorations with different tracers--comparison with SEM quantitative analysis. *J Adhes Dent* 2008 Aug;10(4):259-67.
- (89) Heintze SD. Systematic reviews: I. The correlation between laboratory tests on marginal quality and bond strength. II. The correlation between marginal quality and clinical outcome. *J Adhes Dent* 2007;9 Suppl 1:77-106.
- (90) Heintze SD, Blunck U, Gohring TN, Rousson V. Marginal adaptation in vitro and clinical outcome of Class V restorations. *Dent Mater* 2009 May;25(5):605-20.
- (91) Heintze SD, Cavalleri A. Retention loss of class v restorations after artificial aging. *J Adhes Dent* 2010 Dec;12(6):443-9.
- (92) Heintze SD, Thunpitayakul C, Armstrong SR, Rousson V. Correlation between microtensile bond strength data and clinical outcome of Class V restorations. *Dent Mater* 2011 Feb;27(2):114-25.
- (93) Hellwig E. *Einführung in die Zahnerhaltung*. München; Jena: Urban & Fischer; 2003.
- (94) Hickel R. Moderne Füllungswerkstoffe. *Dtsch Zahnärztl* 1997;52:572-85.
- (95) Hilton TJ, Ferracane JL. Cavity preparation factors and microleakage of Class II composite restorations filled at intraoral temperatures. *Am J Dent* 1999 Jun;12(3):123-30.
- (96) Ilie N, Jelen E, Hickel R. Is the soft-start polymerisation concept still relevant for modern curing units? *Clin Oral Investig* 2011 Feb;15(1):21-9.
- (97) Ilie N, Kunzelmann KH, Hickel R. Evaluation of micro-tensile bond strengths of composite materials in comparison to their polymerization shrinkage. *Dent Mater* 2006 Jul;22(7):593-601.
- (98) Inoue S, Van Meerbeek B, Vargas M, Yoshida Y, Lambrechts P, Vanherle G (2000). Adhesion mechanism of self-etching adhesives. In: Advanced adhesive dentistry. Proceedings of the 3rd International Kuraray Symposium, Dec. 3-4, 1999, Granada, Spain. Tagami J, Toledano M, Prati CA, editors. Cirimido, Italy: Grafiche Erredue, pp. 131-148.

- (99) Inoue S, Vargas MA, Abe Y, Yoshida Y, Lambrechts P, Vanherle G, et al. Microtensile bond strength of eleven contemporary adhesives to dentin. *J Adhes Dent* 2001;3(3):237-45.
- (100) Inoue S, Vargas MA, Abe Y, Yoshida Y, Lambrechts P, Vanherle G, et al. Microtensile bond strength of eleven contemporary adhesives to dentin. *J Adhes Dent* 2001;3(3):237-45.
- (101) Inoue S, Vargas MA, Abe Y, Yoshida Y, Lambrechts P, Vanherle G, et al. Microtensile bond strength of eleven contemporary adhesives to enamel. *Am J Dent* 2003 Oct;16(5):329-34.
- (102) Ivoclar Vivadent AG. Wissenschaftliche Produktinformation AdheSE-One. *ZWR* 2009;114:98-105.
- (103) Janda R. Der Stand der Entwicklung auf dem Gebiet der Zahnfuellungskunststoffe. *Quintessenz* 1988;39:1393-8.
- (104) Janda R. Kunststoffverbundsysteme: Grundlagen, Anwendung, Verarbeitung, Prüfung. VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1990.
- (105) Jang KT, Chung DH, Shin D, Garcia-Godoy F. Effect of eccentric load cycling on microleakage of Class V flowable and packable composite resin restorations. *Oper Dent* 2001 Nov;26(6):603-8.
- (106) Kahveci O, Belli S. Composite bond strength to intact enamel with current simplified adhesives. *J Adhes Dent* 2011 Feb;13(1):31-7.
- (107) Kanca J, III, Suh BI. Pulse activation: reducing resin-based composite contraction stresses at the enamel cavosurface margins. *Am J Dent* 1999 Jun;12(3):107-12.
- (108) Kemp-Scholte CM, Davidson CL. Overhang of Class V composite resin restorations from hygroscopic expansion. *Quintessence Int* 1989 Aug;20(8):551-3.
- (109) Kimmes NS, Barkmeier WW, Erickson RL, Latta MA. Adhesive bond strengths to enamel and dentin using recommended and extended treatment times. *Oper Dent* 2010 Jan;35(1):112-9.
- (110) Kiremitci A, Alpaslan T, Gurgan S. Six-year clinical evaluation of packable composite restorations. *Oper Dent* 2009 Jan;34(1):11-7.
- (111) Kleverlaan CJ, Feilzer AJ. Polymerization shrinkage and contraction stress of dental resin composites. *Dent Mater* 2005 Dec;21(12):1150-7.
- (112) Kobler A SHGC. Klinische Untersuchung des selbstätzenden Einkomponenten- Adhäsivs AdheSE One – Einjahresergebnisse. *Dtsch Zahnärztl Z* 2009 Sep;64(9):558-565 2009 Sep 1.
- (113) Koike T, Hasegawa T, Manabe A, Itoh K, Wakumoto S. Effect of water sorption and thermal stress on cavity adaptation of dental composites. *Dent Mater* 1990 Jul;6(3):178-80.
- (114) Koran P, Kurschner R. Effect of sequential versus continuous irradiation of a light-cured resin composite on shrinkage, viscosity, adhesion, and degree of polymerization. *Am J Dent* 1998 Feb;11(1):17-22.
- (115) Krejci I, Lutz F. In vitro test results of the evaluation of dental restoration systems. Correlation with in-vivo results. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1990;100(12):1445-9.
- (116) Krejci I, Lutz F. Marginal adaptation of Class V restorations using different restorative techniques. *Journal of dentistry* 1991;19(1):24-32.

- (117) Krejci I, Reich T, Lutz F, Albertoni M. In vitro-Testverfahren zur Evaluation dentaler Restaurationssysteme, 1. Computergesteuerter Kausimulator. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1990;100:953-9.
- (118) Krifka S, Anthofer T, Fritzsch M, Hiller KA, Schmalz G, Federlin M. Ceramic inlays and partial ceramic crowns: influence of remaining cusp wall thickness on the marginal integrity and enamel crack formation in vitro. *Oper Dent* 2009 Jan;34(1):32-42.
- (119) Krifka S, Federlin M, FISCHER C, KLUG K, Hiller KA, Schmalz G. In vitro marginal integrity of Class V restorations. 2008 Queen Elizabeth II Conference Centre Poster Hall 1.
- (120) Krifka S, Petzel C, Hiller KA, Frank EM, Bosl C, Spagnuolo G, et al. Resin monomer-induced differential activation of MAP kinases and apoptosis in mouse macrophages and human pulp cells. *Biomaterials* 2010 Apr;31(11):2964-75.
- (121) Kullmann W. Untersuchungen zum Verlauf der Polymerisationskontraktion von selbst- und lichthaertenden Kompositen. *Dtsch Zahnaerztl Z* 1989;44:711-3.
- (122) Kullmann W. *Atlas der Zahnerhaltung*. München: Hanser-Verlag 1990.
- (123) Kunzelmann KH, Hickel R. Klinische Aspekte der Adhäsivtechnik mit plastischen Werkstoffen in: *Die Adhäsivtechnologie. Ein Leitfaden in Theorie und Praxis Dent Net Masters*, 3M ESPE 2001.
- (124) Lee IB, Cho BH, Son HH, Um CM. A new method to measure the polymerization shrinkage kinetics of light cured composites. *J Oral Rehabil* 2005 Apr;32(4):304-14.
- (125) Lopes GC, Baratieri LN, de Andrade MA, Vieira LC. Dental adhesion: present state of the art and future perspectives. *Quintessence Int* 2002 Mar;33(3):213-24.
- (126) Lopes MB, Costa LA, Consani S, Gonini AJ, Sinhoreti MA. SEM evaluation of marginal sealing on composite restorations using different photoactivation and composite insertion methods. *Indian J Dent Res* 2009 Oct;20(4):394-9.
- (127) Lovell LG, Newman SM, Bowman CN. The effects of light intensity, temperature, and comonomer composition on the polymerization behavior of dimethacrylate dental resins. *J Dent Res* 1999 Aug;78(8):1469-76.
- (128) Lutz F. In vivo and in vitro wear of potential posterior composites. *J dent res* 1984;63(6):914-20.
- (129) Mali P, Deshpande S, Singh A. Microleakage of restorative materials: an in vitro study. *J Indian Soc Pedod Prev Dent* 2006 Mar;24(1):15-8.
- (130) Mandras RS, Retief DH, Russell CM. The effects of thermal and occlusal stresses on the microleakage of the Scotchbond 2 dentinal bonding system. *Dent Mater* 1991 Jan;7(1):63-7.
- (131) Margvelashvili M, Beloica M, Carvalho CA, Papacchini F, Cantoro A, GORACCI C. Bonding Potential of All-in-One Adhesives to Ground Enamel. Saturday, July 5, 2008 Metro Toronto Convention Centre Exhibit Hall D-E
- (132) MARGVELASHVILI M, GORACCI C, BELOICA M, Papacchini F, Ferrari M. In vitro evaluation of bonding effectiveness to dentin of all-in-one adhesives. *J Dent* 2010 Feb;38(2):106-12.

- (133) Martin FE. Adhesive bonding--some clinical considerations. *Ann R Australas Coll Dent Surg* 2006 Sep;18:30-5.
- (134) Mazhari F, Mehrabkhani M, Sadeghi S, Malekabadi KS. Effect of beveling on marginal microleakage of buccal-surface fissure sealants in permanent teeth. *Eur Arch Paediatr Dent* 2009 Dec;10(4):241-3.
- (135) Mehl A, Hartl S, Kunzelmann KH, Hickel R. Quantitative und qualitative Randspaltanalyse zervikaler Füllungen. *Dtsch Zahnärztl* 1994;815-8.
- (136) Mehl A, Sobota M, Hickel R. Softstartpolymerisation von Kompositen in Klasse V Kavitäten. *Dtsch Zahnärztl* 1997;824-7.
- (137) Michalaki MG, Oulis CJ, Lagouvardos P. Microleakage of three different sealants on sound and questionable occlusal surfaces of permanent molars: an in vitro study. *Eur Arch Paediatr Dent* 2010 Feb;11(1):26-31.
- (138) Miguel A, de la Macorra JC. A predictive formula of the contraction stress in restorative and luting materials attending to free and adhered surfaces, volume and deformation. *Dent Mater* 2001 May;17(3):241-6.
- (139) Mitra SB, Wu D, Holmes BN. An application of nanotechnology in advanced dental materials. *J Am Dent Assoc* 2003 Oct;134(10):1382-90.
- (140) Mixson J, Eick JD, Chappell RP, Tira DE, Moore DL. Comparison of two-surface and multiple-surface scoring methodologies for in vitro microleakage studies. *Dent Mater* 1991 Jul;7(3):191-6.
- (141) 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 Oct;69(10):1659-63.
- (142) Momoi Y, McCabe JF. Hygroscopic expansion of resin based composites during 6 months of water storage. *Br Dent J* 1994 Feb 5;176(3):91-6.
- (143) Moosavi H, Moazzami SM, Loh S, Salari S. Microleakage evaluation of core buildup composite resins with total-etch and self-etch adhesive systems. *J Contemp Dent Pract* 2010;11(2):009-16.
- (144) Munksgaard EC, Hansen EK, Kato H. Wall-to-wall polymerization contraction of composite resins versus filler content. *Scand J Dent Res* 1987 Dec;95(6):526-31.
- (145) Navarra CO, Cadenaro M, Codan B, Mazzoni A, Sergo V, De Stefano DE, et al. Degree of conversion and interfacial nanoleakage expression of three one-step self-etch adhesives. *Eur J Oral Sci* 2009 Aug;117(4):463-9.
- (146) Nikaido T, Kunzelmann KH, Chen H, Ogata M, Harada N, Yamaguchi S, et al. Evaluation of thermal cycling and mechanical loading on bond strength of a self-etching primer system to dentin. *Dent Mater* 2002 May;18(3):269-75.
- (147) Nikolaenko SA, Lohbauer U, Roggendorf M, Petschelt A, Dasch W, Frankenberger R. Influence of c-factor and layering technique on microtensile bond strength to dentin. *Dent Mater* 2004 Jul;20(6):579-85.

- (148) O'Brien WJ. *Dental materials and their selection*. Chicago: Quintessence Pub. Co.; 1997.
- (149) Park J, Chang J, Ferracane J, Lee IB. How should composite be layered to reduce shrinkage stress: incremental or bulk filling? *Dent Mater* 2008 Nov;24(11):1501-5.
- (150) Pashley DH, Tay FR. Aggressiveness of contemporary self-etching adhesives. Part II: etching effects on unground enamel. *Dent Mater* 2001 Sep;17(5):430-44.
- (151) Paul SJ, Welter DA, Ghazi M, Pashley D. Nanoleakage at the dentin adhesive interface vs microtensile bond strength. *Oper Dent* 1999 May;24(3):181-8.
- (152) Perdigao J. Dentin bonding as a function of dentin structure. *Dent Clin North Am* 2002 Apr;46(2):277-301, vi.
- (153) Perdigao J, Lopes M. Dentin bonding--state of the art 1999. *Compend Contin Educ Dent* 1999 Dec;20(12):1151-2.
- (154) 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 Oct;13(5):239-44.
- (155) Piemjai M, Thaveeratana A, Nakabayashi N. Marginal integrity between a prefabricated composite block and enamel, DEJ, and dentin. *Am J Dent* 2010 Oct;23(5):285-91.
- (156) Pioch T, Staehle HJ, Duschner H, Garcia-Godoy F. Nanoleakage at the composite-dentin interface: a review. *Am J Dent* 2001 Aug;14(4):252-8.
- (157) Prati C, Nucci C, Davidson CL, Montanari G. Early marginal leakage and shear bond strength of adhesive restorative systems. *Dent Mater* 1990 Jul;6(3):195-200.
- (158) Puckett AD, Fitchie JG, Kirk PC, Gamblin J. Direct Composite Restorative Materials. *Dent clin North Am* 2007;51(3):659-75.
- (159) Raskin A, Tassery H, D'Hoore W, Gonthier S, Vreven J, Degrange M, et al. Influence of the number of sections on reliability of in vitro microleakage evaluations. *Am J Dent* 2003 Jun;16(3):207-10.
- (160) RETIEF DH, Mandras RS, RUSSELL CM, Denys FR. Extracted human versus bovine teeth in laboratory studies. *Am J Dent* 1990 Dec;3(6):253-8.
- (161) Rigsby DF, Retief DH, Bidez MW, Russell CM. Microlakage of class V restorations subjected to temperature and load cycling. *J dent res* 1991;70(Spec. issue April):388.
- (162) Rigsby DF, Retief DH, Bidez MW, Russell CM. Effect of axial load and temperature cycling on microleakage of resin restorations. *Am J Dent* 1992 Jun;5(3):155-9.
- (163) Rossomando KJ, Wendt SL, Jr. Thermocycling and dwell times in microleakage evaluation for bonded restorations. *Dent Mater* 1995 Jan;11(1):47-51.
- (164) Roulet JF. *Degradation of Dental Polymers*. S. Karger Verlag AG (Switzerland); 1987.
- (165) Rueggeberg F. Contemporary issues in photocuring. *Compend Contin Educ Dent Suppl* 1999 Nov;(25):S4-15.

- (166) Ruttermann S, Kruger S, Raab WH, Janda R. Polymerization shrinkage and hygroscopic expansion of contemporary posterior resin-based filling materials--a comparative study. *J Dent* 2007 Oct;35(10):806-13.
- (167) Sano H, Takatsu T, Ciucchi B, Horner JA, Matthews WG, Pashley DH. Nanoleakage: leakage within the hybrid layer. *Oper Dent* 1995 Jan;20(1):18-25.
- (168) Sano H, Yoshikawa T, Pereira PN, Kanemura N, Morigami M, Tagami J, et al. Long-term durability of dentin bonds made with a self-etching primer, *in vivo*. *J Dent Res* 1999 Apr;78(4):906-11.
- (169) Santini A, Miletic V. Quantitative micro-Raman assessment of dentine demineralization, adhesive penetration, and degree of conversion of three dentine bonding systems. *Eur J Oral Sci* 2008 Apr;116(2):177-83.
- (170) Santini A, Plasschaert AJ, Mitchell S. Marginal leakage of filled dentin adhesives used with wet and dry bonding techniques. *Am J Dent* 2000 Apr;13(2):93-7.
- (171) Schweikl H, Spagnuolo G, Schmalz G. Genetic and cellular toxicology of dental resin monomers. *J Dent Res* 2006 Oct;85(10):870-7.
- (172) Soderholm KJ. Correlation of *in vivo* and *in vitro* performance of adhesive restorative materials: a report of the ASC MD156 Task Group on Test Methods for the Adhesion of Restorative Materials. *Dent Mater* 1991 Apr;7(2):74-83.
- (173) Söderholm KJ. Hydrolytic degradation of dental composites and effects of silane-treatment and filler fraction on compressive strength and thermal expansion of composites. 1984.
- (174) Strydom C. Polymerization and polymerization shrinkage stress: fast cure versus conventional cure. *SADJ* 2005 Jul;60(6):252-3.
- (175) Tagami J, Nikaido T, Nakajima M, Shimada Y. Relationship between bond strength tests and other *in vitro* phenomena. *Dent Mater* 2010 Feb;26(2):e94-e99.
- (176) Tantbirojn D, Pfeifer CS, Braga RR, Versluis A. Do Low-shrink Composites Reduce Polymerization Shrinkage Effects? *J Dent Res* 2011 May;90(5):596-601.
- (177) Tay FR, Gwinnett AJ, Pang KM, Wei SH. Variability in microleakage observed in a total-etch wet-bonding technique under different handling conditions. *J Dent Res* 1995 May;74(5):1168-78.
- (178) Tay FR, Pashley DH, Suh BI, Carvalho RM, Itthagaran A. Single-step adhesives are permeable membranes. *J Dent* 2002 Sep;30(7-8):371-82.
- (179) Tay FR, Pashley DH, Yoshiyama M. Two modes of nanoleakage expression in single-step adhesives. *J Dent Res* 2002 Jul;81(7):472-6.
- (180) Taylor MJ, Lynch E. Microleakage. *J Dent* 1992 Feb;20(1):3-10.
- (181) Thomsen KB, Peutzfeldt A. Resin composites: strength of the bond to dentin versus mechanical properties. *Clin Oral Investig* 2007 Mar;11(1):45-9.

- (182) Tjan AH, Dunn JR. Microleakage at gingival dentin margins of Class V composite restorations lined with light-cured glass ionomer cement. *J Am Dent Assoc* (1939) 1990 Dec;121(6):706-10.
- (183) Torstenson B, Brannstrom M. Contraction gap under composite resin restorations: effect of hygroscopic expansion and thermal stress. *Oper Dent* 1988;13(1):24-31.
- (184) Tsunekawa M, Usami Y, Iwaku M, Setcos JC, Marshall SJ. A new light-activated adhesive cavity liner: an in vitro bond strength and microleakage study. *Dent Mater* 1992 Sep;8(5):296-8.
- (185) Uno S, Abo T, Tanaka T, Sano H. In vitro sealing performance of two one-step adhesive systems in cervical cavities. *J adhesive dent* 2004;6(3):211-9.
- (186) Uno S, Shimokobe H. Contraction stress and marginal adaptation of composite restorations in dentinal cavity. *Dent Mater J* 1994 Jun;13(1):19-24.
- (187) Van Meerbeek B, Vargas M, Inoue S, Yoshida Y, Peumans M, Lambrechts P, et al. Adhesives and cements to promote preservation dentistry. *Oper dent* 2001;26:119-44.
- (188) Van Meerbeek B, Yoshida Y, Lambrechts P, Vanherle G, Duke ES, Eick JD, et al. A TEM study of two water-based adhesive systems bonded to dry and wet dentin. *J dent res* 1998;77(1):50.
- (189) Van Ende A, De Munck J, Mine A, Lambrechts P, Van Meerbeek. Does a low-shrinking composite induce less stress at the adhesive interface? *Dent Mater* 2010 Mar;26(3):215-22.
- (190) Van Meerbeek, Conn LJ, Jr., Duke ES, Eick JD, Robinson SJ, Guerrero D. Correlative transmission electron microscopy examination of nondemineralized and demineralized resin-dentin interfaces formed by two dentin adhesive systems. *J Dent Res* 1996 Mar;75(3):879-88.
- (191) Van Meerbeek De Munck J, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Vijay P, et al. Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent* 2003 May;28(3):215-35.
- (192) Venhoven BA, De Gee AJ, Davidson CL. Light initiation of dental resins: dynamics of the polymerization. *Biomaterials* 1996 Dec;17(24):2313-8.
- (193) Voco. Wissenschaftliche Produktinformation Grandio / Grandio Flow. www.voco.com/praparate/de/html/prodinfo/wi/WP_DE_Grandio.pdf 6 A.D. Feb 12; 2006.
- (194) Walter R, Macedo GV, Oliveira GM, Swift EJ, Jr. Adhesive bond strengths using self- and light-cured composites. *J Contemp Dent Pract* 2009;10(6):E025-E032.
- (195) Wendt SL, McInnes PM, Dickinson GL. The effect of thermocycling in microleakage analysis. *Dent Mater* 1992 May;8(3):181-4.
- (196) Wu W, Cobb E, Dermann K, Rupp NW. Detecting margin leakage of dental composite restorations. *J Biomed Mater Res* 1983 Jan;17(1):37-43.
- (197) Xie H, Zhang F, Wu Y, Chen C, Liu W. Dentine bond strength and microleakage of flowable composite, compomer and glass ionomer cement. *Aust Dent J* 2008 Dec;53(4):325-31.

- (198) Xu HHK, Eichmiller FC, Antonucci JM, Schumacher GE, Ives LK. Dental resin composites containing ceramic whiskers and precured glass ionomer particles. *Dental Materials* 2000;16(5):356-63.
- (199) Yazici AR, Celik C, Ozgunaltay G. Microleakage of different resin composite types. *Quintessence Int* 2004 Nov;35(10):790-4.
- (200) Yoshida K, Greener EH. Effect of photoinitiator on degree of conversion of unfilled light-cured resin. *J Dent* 1994 Oct;22(5):296-9.
- (201) Yoshida Y, Nagakane K, Fukuda R, Nakayama Y, Okazaki M, Shintani H, et al. Comparative study on adhesive performance of functional monomers. *J Dent Res* 2004 Jun;83(6):454-8.
- (202) Yoshikawa T, Sano H, Burrow MF, Tagami J, Pashley DH. Effects of dentin depth and cavity configuration on bond strength. *J Dent Res* 1999 Apr;78(4):898-905.
- (203) Zachrisson BU, Skogan O, Hoymyrh S. Enamel cracks in debonded, debanded, and orthodontically untreated teeth. *Am J Orthod* 1980 Mar;77(3):307-19.
- (204) Zivkovic S. Quality assessment of marginal sealing using 7 dentin adhesive systems. *Quintessence Int* 2000 Jun;31(6):423-9.

11. Danksagung

Herrn Professor Dr. G. Schmalz danke ich für die Überlassung des Themas und für die Anleitung zu wissenschaftlichem Arbeiten.

Frau Dr. S. Krifka danke ich für die Einführung in die Methodik, und die Unterstützung bei der Durchführung dieser Untersuchungen. Insbesondere für die freundliche und sehr engagierte Betreuung bei der Durchführung dieser Studie, für die Hilfe bei der Auswertung der Ergebnisse, sowie für die wertvolle Unterstützung bei der Erstellung des hier vorliegenden Manuskripts.

Ebenso herzlich bedanken möchte ich mich bei den Mitarbeiterinnen der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie. Hier sind besonders Frau B. Bey und Frau H. Ebensberger zu erwähnen, die mich während der gesamten Durchführung und Auswertung der Studie tatkräftig unterstützt haben.

Herrn Dr. rer. nat. K.-A. Hiller gilt mein Dank für die statistische Auswertung der Ergebnisse und Beratung.

Vielen Dank allen Zahnärzten, die uns freundlicherweise extrahierte Zähne zur Durchführung dieser Studie zur Verfügung gestellt haben und natürlich auch deren Patienten.

Schlussendlich danke ich meinen Kollegen des Forschungsprojekts Klasse V Composite Füllungen Frau Katrin Klug, Herr Clemens Fischer, Herr Thomas Kasparbauer, Frau Jana Matusche und ganz besonders meinem Boxenpartner und Freund Herrn Dr. med. dent Christoph Baitinger.

