

Aus der Klinik für Zahnerhaltung und Parodontologie,
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel und der
Klinik für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

**Einfluss von Adhäsivsystem und Restaurationsmaterial auf die mechanischen
Eigenschaften selektiv exkavierter Zähne**

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

Von
Julia Kleemann-Lüpkes
aus Emden

Datum der Promotion: 10.03.2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1. Abstract	1
1.1 Abstract (Englisch)	1
1.1.1 Objectives	1
1.1.2 Methods	1
1.1.3 Results	1
1.1.4 Conclusions	2
1.2 Abstract (Deutsch)	2
1.2.1 Ziele	2
1.2.2 Methoden	2
1.2.3 Ergebnisse	3
1.2.4 Schlussfolgerungen	3
2. Einleitung	4
2.1 Karies	4
2.2 Optionen der Kariesexkavation	7
2.3 Mögliche Nachteile der selektiven Kariesexkavation	10
2.4 Ziele der Arbeit	14
3. Material und Methoden	15
3.1 Studiendesign	15
3.2 Extrahierte Zähne und Vorbereitung	17
3.3 Kavitätenpräparation	17
3.4 Erzeugung künstlicher demineralisierter Läsionen	19
3.5 Konditionieren und Füllen der Zähne	20
3.6 Röntgenaufnahmen	21
3.7 Abformung, Replikaherstellung und Randspaltanalyse	22
3.8 Künstliche Alterung	25
3.9 Randspaltanalyse	25
3.10 Fuchsinfärbung und Leakagebestimmung	25

3.11 Frakturmodus, Höckerdehnungsversuch und Bestimmung der Frakturresistenz	26
3.12 Transversale Mikroradiographie	27
3.13 Statistische Analyse	28
4. Ergebnisse	29
4.1 Vergleich der Versuchsgruppen	29
4.2 Auswertung der Qualität der Restaurationsränder	30
4.2.1 Auswertung der Rasterelektronenmikroskopie	30
4.2.2 Auswertung der Mikroleakage	32
4.3 Auswertung der Höckerdehnung	33
4.4 Auswertung der Frakturresistenz und des Frakturmodus	34
5. Diskussion	36
5.1 Quantitative Randanalyse	37
5.2 Mikroleakage	38
5.3 Frakturresistenz und Frakturmodus	39
5.4 Höckerdehnung	41
5.5 Mögliche Einschränkungen durch den allgemeinen Versuchsaufbau	42
6. Schlussfolgerungen	45
7. Literaturverzeichnis	46
8. Eidesstattliche Versicherung	53
9. Lebenslauf	55
10. Publikationsliste	56
11. Danksagung	57

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modell zur Kariesentstehung. Abbildung modifiziert nach Paradigmenwechsel in Karies. Wissenschaft und klinische Praxis nach Paris et al. (5).....	5
Abbildung 2: Mikroskopischer Aufbau einer tiefen Dentinläsion nach Ogawa et al. (13) modifiziert durch Schwendicke (14).	6
Abbildung 3: "Todesspirale des Zahnes" nach Schwendicke (12).	9
Abbildung 4: Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme einer Verbundzone zwischen Komposit und Dentin nach Mine et al. (43).	12
Abbildung 5: Flussdiagramm zum Versuchsablauf	16
Abbildung 6: Ausdehnung der präparierten Kavitäten nach Schwendicke et al. (48).....	18
Tabelle 1: Zusammensetzung der Demineralisationslösung nach Buskes et al. (49)....	19
Abbildung 7: Flussdiagramm zur Gruppeneinteilung der Adhäsivsysteme und Restaurationsmaterialien	20
Abbildung 8: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der unterschiedlichen Randqualitäten der Restaurationsränder in Schmelz oder Dentin. Originalvergrößerung 200-fach. (52).....	24
Abbildung 9: Frakturmodi. a.) Beispiel für eine reparabel-einzustufende Fraktur b.) Beispiel für eine fatale Fraktur (nicht reparabel).	27
Abbildung 10 nach Schwendicke et al. (1): Schnitte durch die restaurierten Zähne mit demineralisierten Läsionen unterhalb der Restauration a.) Fotografie eines in Kunststoff eingebetteten Schnittes. b.) Mikroradiographisches Bild.	29
Abbildung 11: Darstellung der Anteile an akzeptablen Restaurationsrändern in Prozent nach Schwendicke et al. (1).	31
Tabelle 2: Tiefe der gemessenen Mikroleakage in μm (Median, 25./75. Perzentile)	32
Abbildung 12: Darstellung der Höckerdehnung bei 200 N und 400 N in Abhängigkeit von Restaurationsmaterial und Adhäsivsystem nach Schwendicke et al. (1).....	33
Abbildung 13: Darstellung der Frakturresistenztestung in Abhängigkeit von Restaurationsmaterial und Adhäsivsystem nach Schwendicke et al. (1).....	34
Tabelle 3: Analyse des Frakturmodus, Einteilung in katastrophale und reparabile Frakturen in Abhängigkeit von Restaurationsmaterial und Adhäsivsystem	35

1. Abstract

1.1 Abstract (Englisch)

Abstract aus Schwendicke F., Kern M., Dörfer C., Kleemann-Lüpkes J., Paris S., Blunck U. Influence of using different bonding systems and composites on the margin integrity and mechanical properties of selectively excavated teeth *in vitro*. J Dent, 2015;43(3):327-34. (1)

1.1.1 Objectives

Selective (incomplete) caries excavation reduces the risk of pulpal complications, but might compromise the properties of teeth or restorations. Different restorative approaches might be required after selective instead of complete excavation. We compared margin integrity, microleakage and fracture resistance of selectively excavated and differently restored premolars *in vitro*.

1.1.2 Methods

In 72 extracted human premolars, artificial residual lesions were induced on pulpo-axial walls of standardized cavities. Teeth were restored using one of three bonding systems (OptiBond FL, Clearfil SE Bond, G-aenial Bond) and a fibre-enforced (EverX) or standard hybrid composite resin (Filtek Z250). After thermo-mechanical cycling, groups (n = 12) were compared regarding their gingivo-cervical margin integrity (proportion of acceptable margins), microleakage depth, and fracture resistance, with statistical evaluation using generalized linear modelling.

1.1.3 Results

Margin integrity was significantly influenced by the bonding system ($p < 0,001$), but not by the composite ($p = 0,105$). Proportions of acceptable margins were increased in teeth restored with OptiBond FL (median [25th/75th percentiles]: 93 [78/100%]) or Clearfil SE Bond (82 [60/94%]) compared with G-aenial Bond (43 [15/74%]; $p < 0,05$). Neither bonding systems nor composites significantly influenced leakage depth in enamel ($p = 0,749/0,569$) or dentine ($p = 0,112/0,909$). Fracture resistance was significantly influenced by bonding system ($p = 0,008$) and composite ($p = 0,001$), and was higher in teeth restored using OptiBond FL (mean [SD]: 1210 [336] N) compared with Clearfil SE Bond (1007 [208] N) or G-aenial Bond (1023 [281] N, $p < 0,05$), and using EverX (1182 [314] N) instead of Filtek Z250 (979 [228] N; $p < 0,01$).

1.1.4 Conclusions

Bonding systems which perform well in completely excavated teeth also yielded good results for selectively excavated teeth in vitro. Using fibre-enforced composites to restore selectively teeth increased fracture resistance. (1)

1.2 Abstract (Deutsch)

1.2.1 Ziele

Bei der selektiven Kariesexkavation wird pulpanah kariöses Dentin belassen. Infolge dessen sind pulpale Komplikationen seltener. Der Verbleib von kariösem Dentin unter der Restauration kann die mechanischen Eigenschaften von Zahn und Restauration nachteilig beeinflussen. Es könnten besondere Restaurationstechniken oder Restaurationsmaterialien nötig werden, um eine vergleichbare mechanische Stabilität wie nach vollständiger Exkavation zu erreichen. Das Ziel dieser Studie war es Randqualitäten, Mikroleakage, Frakturresistenz, Höckerdehnung und Frakturmodus von selektiv exkavierten und unterschiedlich restaurierten Prämolaren zu vergleichen.

1.2.2 Methoden

72 extrahierte menschliche Prämolaren wurden standardisiert präpariert. Anschließend wurden an den pulpo-axialen Wänden der Kavität künstliche kariöse Läsionen erzeugt. Restauriert wurden die Proben mit drei unterschiedlichen Adhäsivsystemen. Verwendet wurden OptiBond FL, ein in drei Schritten angewendetes Etch-and-Rinse-Adhäsivsystem, Clearfil SE Bond, ein in zwei Schritten angewendetes selbstätzendes (Self-Etch) Adhäsiv und G-aenial Bond, welches zur sogenannten Non-Rinse-Technik zählt und in einem Schritt angewendet wird (2). Zur Restauration wurden Filtek Z250 verwendet, ein konventionelles Hybridkomposit, und ein glasfaserverstärktes Hybridkomposit (EverX) verwendet. Vor und nach einer künstlichen Alterung wurden die Gruppen (n = 12/Gruppe) bezüglich der Randqualität der Restauration im zervikalen Bereich untersucht. Im Anschluss an die künstliche Alterung wurden außerdem Höckerdehnung, Frakturresistenz, Frakturmodus und Mikroleakage untersucht und statistisch mittels verallgemeinerten linearen Modellen analysiert.

1.2.3 Ergebnisse

Im Gegensatz zum Kompositmaterial ($p = 0,105$) zeigte das verwendete Adhäsivsystem einen signifikanten Einfluss auf die Randqualität ($p < 0,001$). Bei Zähnen, die mit OptiBond FL restauriert wurden, waren höhere Anteile an akzeptabler Randqualität (Median [25./75. Perzentile]: 93 [78/100%]) im Vergleich zu Clearfil SE Bond (82 [60/94%]) oder G-aenial Bond (43 [15/74%]; $p < 0,05$) zu verzeichnen. Weder das Adhäsivsystem noch das Kompositmaterial beeinflussten die Mikroleakage bei Rändern, die im Schmelz ($p = 0,749/0,569$) oder im Dentin ($p = 0,112/0,909$) lagen, signifikant. Die Frakturresistenz hingegen wurde signifikant vom Adhäsivsystem ($p = 0,008$) und Kompositmaterial ($p = 0,001$) beeinflusst. Im Vergleich zu Clearfil SE Bond (Mittelwert [Standardabweichung]: 1007 [208] N) oder G-aenial Bond (1023 [281] N, $p < 0,05$), wurden bei OptiBond FL (1210 [336] N) signifikant höhere Frakturresistenzen festgestellt. Bei Zähnen, die mit EverX (1182 [314] N) restauriert wurden, waren ebenfalls höhere Frakturresistenzen festzustellen als bei Zähnen, die mit Filtek Z250 (979 [228] N, $p < 0,01$) restauriert wurden.

1.2.4 Schlussfolgerungen

Adhäsivsysteme, die sich gut für die Restauration vollständig exkavierter Zähne eignen, zeigen auch nach selektiver Exkavation *in vitro* gute Ergebnisse. Das Verwenden von glasfaserverstärkten Kompositen nach selektiver Exkavation zeigte höhere Frakturresistenzen und könnte somit empfehlenswert sein.

2. Einleitung

2.1 Karies

Lange Zeit wurde davon ausgegangen, dass Karies eine Infektionskrankheit sei und somit von einem bestimmten Krankheitserreger ausgehe (3). Diese Theorie wird als spezifische Plaquehypothese bezeichnet. Ausgehend von dieser Hypothese schien es sinnvoll, alle Erreger zu beseitigen, um die Erkrankung zu heilen. Daher war die vollständige Entfernung einer kariösen Läsion lange Zeit das einzige Therapiekonzept zur Heilung eines betroffenen Zahnes. Die spezifische Plaquehypothese sah *Streptococcus mutans* als den für die Erkrankung verantwortlichen Keim an (3). Diese Theorie ist nicht ausreichend, um die Entstehung kariöser Läsionen zu erklären, da das Vorhandensein von *Streptococcus mutans* nicht zwingend mit der Entstehung kariöser Läsionen vergesellschaftet ist. Des Weiteren kann durch die spezifische Plaquehypothese nicht erklärt werden, warum an bestimmten Zähnen und bestimmten Flächen des Zahnes kariöse Läsionen entstehen und an anderen nicht. Daher wird angenommen, dass die Entstehung eines kariogenen Biofilms aus der physiologischen Plaque durch ein Missverhältnis ökologischer Bedingungen resultiert (4). Die sogenannten fermentierbaren Kohlenhydrate werden durch die Bakterien zu organischen Säuren umgewandelt und greifen dann die Zahnhartsubstanz an. Bei zuckerarmer Kost werden komplexe Nahrungsmoleküle nur langsam abgebaut, weshalb es nur zu einem leichten und eher selten auftretenden Abfall des pH-Wertes der Mundhöhle kommt. Bei häufiger Zuckierzufuhr kommt es hingegen zu einer Störung der Homöostase der Mundhöhle mit starkem Abfall des pH-Wertes. Unter diesen Bedingungen können sich nur Bakterien vermehren, die Säuren produzieren und einem niedrigen pH-Wert widerstehen können. Es kommt zu einer Verschiebung in der Plaquemikroflora. Diese Theorie wird als ökologische Plaquehypothese bezeichnet. Der saure pH-Wert bedingt eine Demineralisation der Zahnhartsubstanzen und es entsteht nach und nach eine kariöse Läsion (vgl. hierzu Abbildung 1) (4).

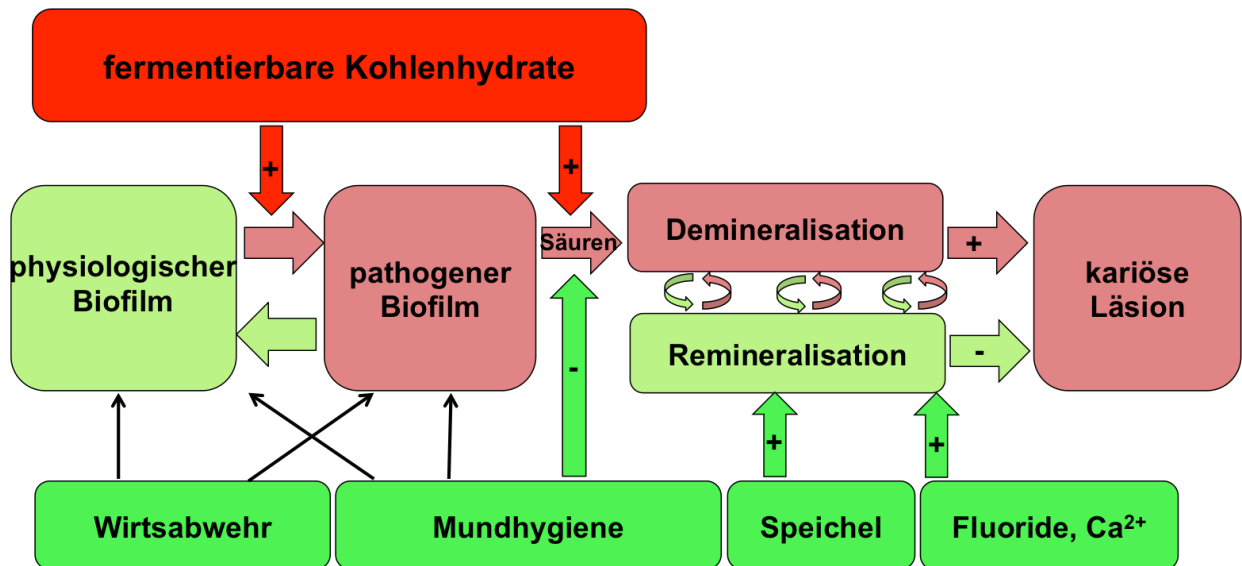


Abbildung 1: Modell zur Kariestentstehung. Aus einem Biofilm mit physiologischer Flora entsteht durch häufige Zufuhr von fermentierbaren Kohlenhydraten ein Biofilm mit pathologischer Flora. Durch die Bakterien innerhalb des pathologischen Biofilms werden Säuren gebildet. Diese führen zu einer Demineralisation der Zahnhartsubstanzen. Bei länger andauerndem Demineralisationsprozess werden klinische Zeichen und Symptome einer kariösen Läsion sichtbar. Abbildung modifiziert nach Paradigmenwechsel in Karies. Wissenschaft und klinische Praxis nach Paris et al. (5).

Die kariöse Läsion sollte als Symptom der Erkrankung und nicht als Erkrankung selbst angesehen werden. Klassischerweise wurde kariöses Dentin vollständig entfernt, um die Infektion zu heilen. Da Karies nicht als reine Infektionskrankheit angesehen werden kann, wird die Ursache der Erkrankung bei der vollständigen Entfernung der kariösen Läsion nicht behandelt. Diese kommt daher eher einer Amputation als einer Heilung gleich. Stattdessen sollten non-invasive Maßnahmen wie Biofilmkontrolle, Ernährungskontrolle oder Remineralisationstherapien genutzt werden, um die kariesverursachenden Faktoren einzuschränken oder das Gleichgewicht zwischen Mineralverlust und -gewinn wiederherzustellen (6).

Als zweite Option stehen mikroinvasive Therapieverfahren zur Verfügung (z.B. Versiegelungen oder Kariesinfiltration). Diese Verfahren wurden erst durch die Entwicklung von adhäsiven Restaurationsmaterialien ermöglicht (7, 8). Es kann unterschieden werden zwischen präventiven Versiegelungen, bei denen intakte Zahnhartsubstanz versiegelt wird, und therapeutischen Versiegelungen, bei denen kavitierte oder nicht kavitierte Läsionen versiegelt werden. Bei beiden Verfahren werden die okklusalen Flächen der behandelten Zähne umgestaltet, indem durch Aufbringen

eines dünnfließenden Komposites die vorhandenen Fissuren in gut zu reinigende, weniger tiefe Fissuren umgewandelt werden. Wichtiger noch als die Umgestaltung scheint die Installation einer Diffusionsbarriere auf dem Zahn zu sein. Dadurch wird das Eindringen kariogener Säuren verhindert und einer weiteren Demineralisation entgegengewirkt (9). Um das Fortschreiten kariöser Läsionen im Approximalbereich zu verhindern, wurde das Verfahren der Kariesinfiltration entwickelt. Hierbei dringt ein gering-visköser Kunststoff in den porösen Schmelz der Läsion ein und verschließt diesen bei seiner Aushärtung (10). Somit wird, wie beschrieben, eine Diffusionsbarriere geschaffen und das Fortschreiten der Läsion verlangsamt oder aufgehalten (11, 12). Diese mikroinvasiven Verfahren werden bisher fast ausschließlich für nicht kavitierte Läsionen angewendet. Für kavitierte Läsionen wird weiterhin eine restaurative Therapie empfohlen, um einerseits eine Umgestaltung der Zahnoberflächen in reinigungsfähigere Strukturen zu erreichen, und andererseits ihre Funktion wiederherzustellen (12). Diese Läsionen reichen meist bereits tief in das Dentin und können nach ihrer Struktur in Zonen unterteilt werden (vgl. hierzu Abbildung 2).

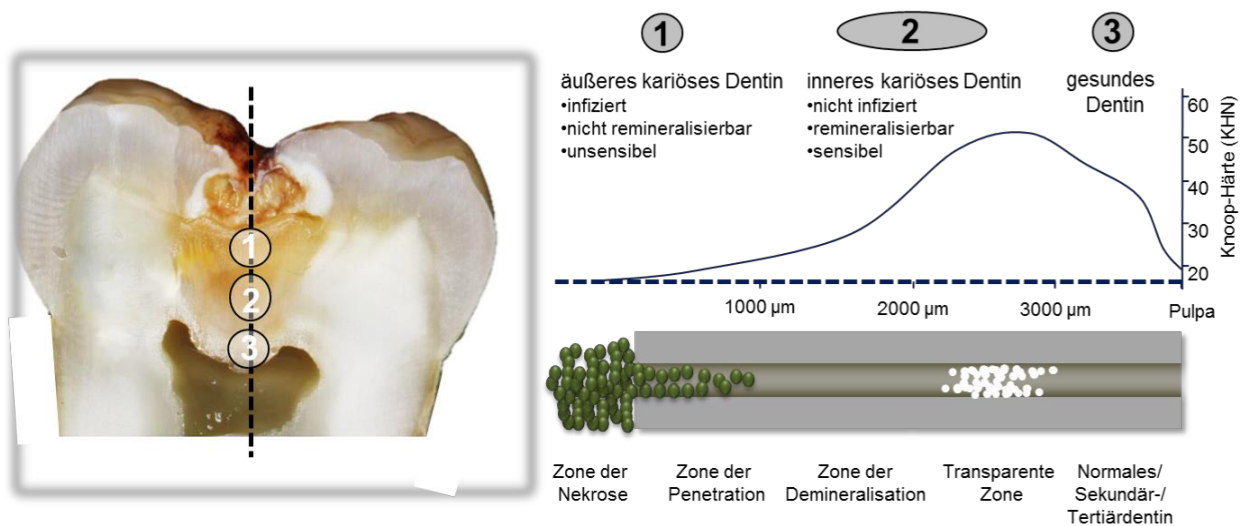


Abbildung 2: Mikroskopischer Aufbau einer tiefen Dentinläsion nach Ogawa et al. (13) modifiziert durch Schwendicke (14).

Diese spezifische histologische Gliederung zeigt folgenden Aufbau: Das äußere kariöse Dentin kann vom inneren kariösen Dentin bezüglich des Mineralgehaltes und der Dentinhärte unterschieden werden. Beide nehmen im Verlauf der Läsion von außen nach innen zu. Eine genauere Gliederung erfolgt in fünf Zonen: Die äußerste Zone wird als Zone der Nekrose bezeichnet und ist durch bakterielle Infektion und proteolytische Zersetzung gekennzeichnet. Daran schließt sich die Zone der Penetration an, welche ebenfalls durch Bakterien infiziert ist. Auf die Zone der Demineralisation folgt die transparente Zone, welche sich durch eine vermehrte Ansammlung von Mineralien innerhalb der Dentintubuli auszeichnet. Von der Pulpa wird zum Eigenschutz sogenanntes Reizdentin gebildet, welches sich durch eine geringere Härte und Organisation von gesundem Dentin unterscheidet (13). Diese histologisch sichtbaren Zonen sind derzeit klinisch nur bedingt voneinander abzugrenzen (15).

2.2 Optionen der Kariesexkavation

Infolge der Veränderung des Verständnisses zur Kariesentstehung hat sich auch der Behandlungsansatz einer tiefen kariösen Läsion stark verändert. Beruhend auf dem beschriebenen Verständnis von Karies als Infektionserkrankung verfolgte die traditionelle Behandlung einer kariösen Läsion die vollständige Entfernung aller bakteriell kontaminierten, demineralisierten Zahnhartsubstanzen. Auch bei dieser sogenannten „vollständigen Kariesentfernung“ bleiben jedoch häufig Bakterien in der Kavität zurück, da es bisher nur wenige praxisnahe Verfahren gibt, um die Vollständigkeit der Entfernung zu überprüfen oder zu gewährleisten (16). Die vollständige Entfernung pulpanaher, kariöser Gewebe in tiefen Läsion erhöht signifikant das Risiko einer Pulpaeröffnung (17) oder einer indirekten Pulpaschädigung (18). Liegt eine Exposition der Pulpa vor, wird im bleibenden Gebiss meist eine direkte Überkappung durchgeführt. Hierbei wird auf das freiliegende Pulpagewebe ein Medikament (z.B. Kalziumhydroxid) aufgetragen (19). Dieses Medikament soll die Induktion von Tertiärdentin begünstigen. In vorherigen Studien konnte jedoch gezeigt werden, dass Zähne, die in dieser Weise therapiert wurden, zum größten Teil nach fünf bis zehn Jahren wurzelkanalbehandelt oder extrahiert werden mussten (20, 21). Es ist daher erstrebenswert, eine Pulpaexposition zu vermeiden und somit die Lebensdauer des Zahnes zu verlängern. Gleichzeitig werden mögliche Schmerzen und Kosten für Nachbehandlungen minimiert (22).

Heutige Exkavationsmethoden streben weniger die Entfernung aller kariogenen Mikroorganismen, als die Kontrolle der Biofilmaktivität in der Läsion an. Die schrittweise Kariesentfernung ist eine dieser Methoden, bei der in zwei Sitzungen in einem Abstand von drei bis sechs Monaten die kariöse Zahnhartsubstanz entfernt wird. Dabei wird zunächst eine Zugangskavität geschaffen und anschließend peripher die kariöse Zahnhartsubstanz möglichst vollständig entfernt. Im Gegensatz dazu wird in der Nähe der Pulpa zunächst kariöses Dentin belassen. Fakultativ wird Kalziumhydroxid appliziert und die Kavität provisorisch verschlossen. In der zweiten Sitzung wird die provisorische Füllung entfernt und die dann noch vorhandene kariöse Läsion beseitigt (23). Dadurch wird der Pulpa-Dentin-Einheit Zeit gegeben, durch Induktion von Odontoblasten Tertiärdentin zu bilden und somit eine dickere Schutzschicht für die Pulpa aufzubauen. Des Weiteren wird in dieser Zeit zurückgelassenes, demineralisiertes Dentin remineralisiert (23-26). Somit muss im zweiten Exkavationsschritt weniger Dentin entfernt werden, als wenn im ersten Schritt vollständig exkaviert worden wäre (18). In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass die Gefahr der Pulpaexposition und postoperativer pulpaler Beschwerden nach der schrittweisen Kariesexkavation deutlich geringer sind als bei der einzeitigen vollständigen Kariesentfernung (27, 28). Nach Eröffnung der provisorischen Füllung konnten deutliche Reduktionen der kariogenen Aktivität der verbleibenden Bakterien festgestellt werden. Dies wurde auf die verminderte Substratzufuhr zurückgeführt (23, 25, 29). Es stellt sich nun die Frage, ob die zweite Eröffnung und eine weitere Exkavation notwendig sind oder ob das kariöse Gewebe bei guter Versiegelung dauerhaft im Zahn belassen werden kann (6, 30, 31). Aus dieser Fragestellung heraus wurde das Verfahren der selektiven Kariesentfernung entwickelt, welches eine weitere Alternative zur konventionellen vollständigen Kariesexkavation darstellt. Hierbei wird das kariöse Hartgewebe nur peripher vollständig entfernt und in Pulpanähe zum Teil belassen. Im Anschluss erfolgt kein provisorischer Verschluss und keine erneute Eröffnung, sondern eine definitive adhäsive Versorgung (28). Wenn nur eine dünne Schicht kariöses Dentin in direkter Nähe zur Pulpa belassen und ein Medikament eingebracht wird, bezeichnet man dieses Verfahren auch als indirekte Überkappung (32). In einer Studie konnte gezeigt werden, dass die selektive Exkavation in weniger Fällen zu postoperativen pulpalen Beschwerden und Pulpaexpositionen führte als die schrittweise Kariesentfernung (27), da hier der zweite Schritt und somit das erneute Eröffnen und Entfernen von Zahnhartsubstanz entfällt. Wenn weniger Substanz entfernt wird und dadurch ein größerer Abstand zur Pulpa

eingehalten wird, scheint es logisch, dass seltener Eröffnungen oder thermische Schädigungen auftreten. Dies wird als entscheidender Vorteil der selektiven Exkavation gegenüber anderer Exkavationsstrategien angesehen (12). Außerdem entstehen durch die selektive Kariesentfernung, im Vergleich zur schrittweisen und vollständigen Kariesexkavation, geringere Kosten (22). Dies ist dadurch verursacht, dass eine geringere Gefahr der Pulpaschädigung besteht und somit Folgebehandlungen seltener nötig werden. Im Falle einer Pulpaschädigung wäre im Anschluss eine Wurzelkanalbehandlung notwendig. Auch könnte durch den höheren Substanzabtrag während der Restauration oder nach Durchführung der Wurzelkanalbehandlung die Stabilität des Zahnes beeinträchtigt werden. Hieraus folgt, dass wiederum prothetische Versorgungen notwendig werden könnten, die erneut Kosten mit sich bringen. Dieser Zyklus wird auch als „Todesspirale des Zahnes“ (vgl. Abbildung 3) bezeichnet (12). Wenn also weniger invasive Verfahren wie die selektive Exkavation angewendet werden, können betroffene Zähne mit einem geringeren Kostenaufwand länger erhalten werden (22).

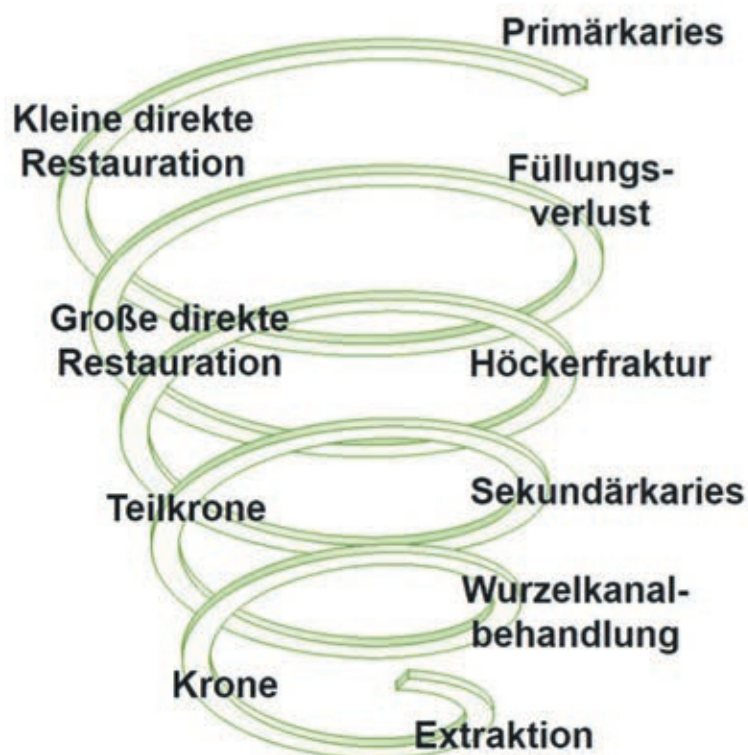


Abbildung 3: "Todesspirale des Zahnes" nach Schwendicke (12). Je früher invasiv therapiert wird, desto eher beginnt der Zyklus aus weiteren Behandlungen. Der Beginn und zeitliche Abstand der Behandlungen bestimmt den Zeitpunkt des Zahnverlustes.

2.3 Mögliche Nachteile der selektiven Kariesexkavation

Beim Verfahren der selektiven Kariesexkavation wird, wie beschrieben, peripher das kariöse Dentin möglichst vollständig entfernt und in Pulpanähe ein Rest veränderten Dentins belassen. Hierbei werden für den peripheren Bereich die konventionellen Exkavationskriterien angewendet. Es werden Farbe, Härte und Feuchtigkeit des Dentins visuell-taktil bewertet. Im zentralen, pulpanahen Kavitätenbereich wird kariös verändertes Dentin bewusst belassen (12). Es ist klinisch schwer festzustellen wie viel kariöses Dentin in der Kavität belassen wird. Aufgrund des fließenden Überganges der verschiedenen Zonen und der nur histologisch feststellbaren Unterschiede ist nicht sicher zu bestimmen inwieweit das belassene Dentin verändert ist (13).

Nach der Exkavation wird die entstandene Kavität definitiv adhäsiv restauriert (33). Problematisch ist hierbei der adhäsive Verbund zum kariösen Dentin, der weniger dauerhaft und vorhersagbar als jener zu gesundem Dentin ist (34, Seite 244-245). Daraus könnte sich zum einen ein insgesamt schwächerer Haftverbund zwischen Dentin und Komposit ergeben, zum anderen ist auch eine Beeinträchtigung der Randintegrität möglich (35). Inwiefern sich bestimmte Adhäsivsysteme in Bezug auf ihren Verbund zu kariösem Dentin besser eignen als andere, bleibt offen.

Bei Verwendung von Etch-and-Rinse-Adhäsivsystemen wird klassischerweise im ersten Schritt der Konditionierung die Zahnhartsubstanz mit Phosphorsäure angeätzt und die gelösten Präzipitate mit Wasser abgesprüht. Im Zuge dieser Konditionierung kommt es zunächst zu einer Demineralisation der obersten Schicht, wodurch ein mikroretentives Relief entsteht. Anschließend wird durch die Benetzung mit den hydrophilen Primer das im Dentin freigelegte Kollagennetzwerk mit den hydrophilen Monomeren durchmischt und es entsteht eine sogenannte Hybridschicht. Diese Hybridschicht wird durch die Applikation des Adhäsivs (amphiphile Monomere) stabilisiert. Durch die anschließende Lichthärtung bildet sich eine Schicht bestehend aus einem Gemisch von Bestandteilen des Adhäsivsystems und der Zahnhartsubstanzen. An diese Schicht kann das Komposit adhäsiv binden (vgl. Abbildung 4). Zusätzlich gibt es heute die selbstätzenden Adhäsivsysteme, bei denen der separate Schritt des Ätzens mit Phosphorsäure und das anschließende Entfernen der Präzipitate entfallen. Diese Systeme werden in einem oder zwei Schritten angewendet und enthalten alle drei oben genannten Komponenten. Da der Smearlayer nicht vollständig entfernt wird, kann die Durchdringung der obersten

Schicht erschwert werden und es entsteht ein dünnerer Hybridlayer als nach Phosphorsäureätzung. (36, 37)

Im kariösen Dentin bedingen der geringere Mineralgehalt und die höhere Porosität der demineralisierten Läsion eine erhöhte Dicke des entstehenden Hybridlayers (37-39). Eine vollständige Penetration durch das Monomer ist aufgrund des dickeren Hybridlayers, der Obliteration der Dentintubuli und der Bildung säureresistenter Kristalle beeinträchtigt (39-41). Die Verwendung von Phosphorsäure könnte sich durch die Entfernung des Smearlayers und die dadurch ermöglichte bessere Penetration des Kunststoffmonomers besonders auf kariösem Dentin als vorteilhaft erweisen. Die verringerte Haftung der üblichen Adhäsivsysteme zum kariösen Dentin könnte zu einem schlechteren Randschluss der Restauration und einer größeren Höckerdehnung des Zahnes während des Kauvorganges führen. Auch durch die geringere Stabilität könnten größere Höckerdehnungswerte entstehen, woraus wiederum eine Randspaltbildung der Restauration und Ausbildung einer Mikroleakage resultieren könnten. Diese ermöglichen einen Austausch von Substraten unterhalb der Restauration mit dem Milieu der Mundhöhle. Somit wäre ein Fortschreiten der kariösen Läsion möglich (42). Um diese Schwächen der selektiven Kariesentfernung zu minimieren oder zu beseitigen, muss in die Kavität eine möglichst stabile Restauration eingebracht werden, die einen möglichst festen Verbund sowohl zum gesunden als auch zum kariösen Dentin aufweist. Somit wird ein Adhäsivsystem benötigt, welches sowohl zu gesundem Schmelz und Dentin aber auch zu kariösem Dentin einen zuverlässigen Verbund herstellt. Auch ein Restaurationsmaterial, welches die Stabilität des Zahnes wiederherstellt, könnte die Lebensdauer der Restauration und somit auch des Zahnes verlängern.

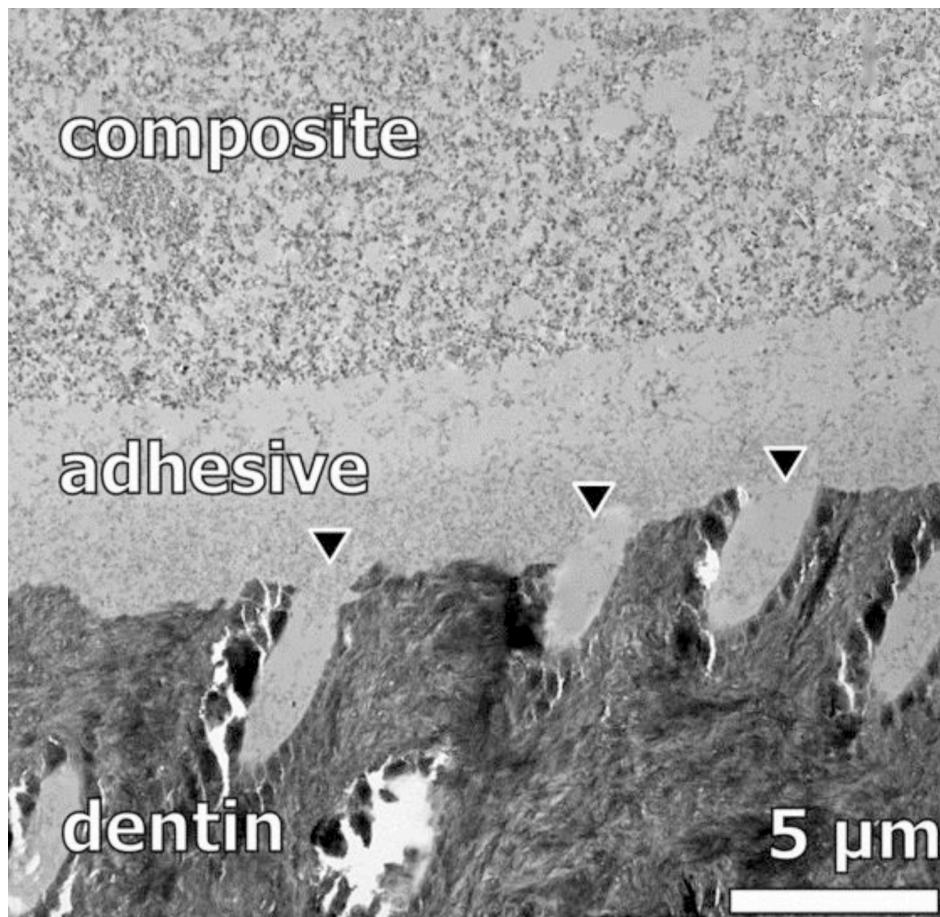


Abbildung 4: Transmissionselektronenmikroskopische Aufnahme einer Verbundzone zwischen Komposit und Dentin nach Mine et al. (43). Die Pfeilspitzen markieren die Zapfen, die durch das Herauslösen von Hydroxylapatitkristallen und die nachfolgende Diffusion des Adhäsivs in die Dentintubuli entstehen. Diese stellen die so genannten „resin tags“ dar.

Wie Hevinga et al. zeigen konnten, frakturieren Molaren, die durch selektive Exkavation behandelt wurden, bei geringeren Belastungen (Mittelwert \pm Standardabweichung $1276\text{N} \pm 626\text{N}$) als vollständig exkavierte Molaren ($2768\text{N} \pm 710\text{N}$). In derselben Studie wurde ebenfalls festgestellt, dass beide Gruppen unterschiedliche Frakturmodi aufwiesen. So frakturierten die vollständig exkavierten Molaren vertikal, während die selektiv exkavierten Molaren im Restaurationsmaterial sogenannte „ice-cracks“ aufwiesen (44). Diese stellen sich als Frakturlinien innerhalb der Restauration dar und werden möglicherweise durch ein Einbrechen der Restauration in das darunter liegende weiche, kariöse Dentin verursacht (44). Diese Ergebnisse deuten auf eine Beeinträchtigung der Stabilität der Zähne nach selektiver Exkavation hin und stellen einen wichtigen Punkt bei der Auswahl der Restaurationsstrategie dar. Wenn ein

stärkerer und verlässlicher Verbund zwischen kariösem Dentin und Komposit hergestellt werden kann, könnte die Stabilität des Zahnes und somit auch die Frakturresistenz des gesamten Zahnes wieder erhöht werden. In verschiedenen Studien konnte gezeigt werden, dass glasfaserverstärkte Komposite eine höhere Biegefestigkeit und eine geringere Schrumpfung besitzen als konventionelle bulk-fill Hybridkomposite (45, 46). Durch die Glasfaserelemente wird eine Querverstrebung innerhalb der Restauration erzeugt.

Die Verwendung glasfaserverstärkter Komposite könnte eine zusätzliche Stabilisierung des Zahnes bewirken. Auch eine Veränderung des Frakturmodus wäre infolge der Querverstrebung mit möglicherweise veränderter Kraftverteilung innerhalb der Restauration denkbar. Es wird diskutiert, ob die Verlaufsrichtung der Glasfaserelemente Einfluss auf die Haftkraft und die Randqualität der Restauration hat (47).

2.4 Ziele der Arbeit

Die selektive Kariesexkavation könnte eine gute Alternative zur bisher durchgeführten vollständigen und schrittweisen Exkavation sein, denn Studien zeigen, dass durch diesen Therapieansatz pulpale Komplikationen und mögliche Folgebehandlungen verringert und die Lebensdauer des Zahnes verlängert werden (27). Außerdem sind geringere Kosten zur Erhaltung der betroffenen Zähne aufzubringen (22). Um diese Vorteile nutzen zu können, müssen die möglichen restaurativen Nachteile ausgeräumt werden. Der Zahn wird durch die kariöse Läsion in Bezug auf seine Frakturresistenz geschwächt.

Das Ziel dieser Arbeit war zu untersuchen, inwiefern diese Zähne durch die Variation des Adhäsivsystems gestärkt werden können. Des Weiteren sollte geprüft werden ob durch Variation des Adhäsivsystems eine Veränderung der Randqualität festgestellt werden kann. Zu diesem Zweck wurden drei unterschiedliche Arten von Adhäsivsystemen getestet, welche sich in der Anzahl ihrer Anwendungsschritte unterscheiden: ein 3-Schritt-Adhäsivsystem (OptiBond FL), welches zur Gruppe der sogenannten Etch-and-Rinse-Adhäsive zählt, ein 2-Schritt-Adhäsivsystem (Clearfil SE Bond), welches zu den Self-Etch Systemen gehört und ein 1-Schritt-System (G-aenial Bond), das der Non-Rinse-Technik angehört (2). Des Weiteren soll untersucht werden ob glasfaserverstärkte Komposite die Stabilität des Zahnes erhöhen können. Durch die Variation des Adhäsivmaterials und des Komposites bei der Restauration der Zähne soll getestet werden, inwiefern die Bruchfestigkeit, die Bruchmodi und die Randspaltbildung beeinflusst werden und ob durch diese Variation ein verbessertes Ergebnis für selektiv exkavierte Zähne erzielt werden kann. Zu diesem Zweck sollen folgende Nullhypothesen überprüft werden:

1. Die Randspaltbildung selektiv exkavierter Zähne ist weder signifikant abhängig vom genutzten Dentinadhäsivsystem noch vom genutzten Restaurationsmaterial.
2. Die Frakturresistenz und der Frakturmodus selektiv exkavierter Zähne ist weder signifikant abhängig vom genutzten Dentinadhäsivsystem noch vom genutzten Restaurationsmaterial.

3. Material und Methoden

3.1 Studiendesign

In der durchgeführten Studie wurden 72 selektiv exkavierte Zähne mithilfe von drei unterschiedlichen Adhäsivsystemen und zwei unterschiedlichen Restaurationsmaterialien adhäsiv versorgt. Verwendet wurden die folgenden Adhäsivsysteme: das 3-Schritt Etch-and-Rinse Adhäsiv OptiBond FL (Kerr, Bioggio, Schweiz), das 2-Schritt selbstätzende Adhäsiv Clearfil SE Bond (Kuraray, Hattersheim, Deutschland) und das 1-Schritt selbstätzende Adhäsiv G-aenial Bond (GC, Bad Homburg, Deutschland). Des Weiteren wurden die Kompositmaterialien variiert: das glasfaserverstärkte Komposit EverX (GC, Bad Homburg, Deutschland) und das Standardhybridkomposit Filtek Z250 (3M ESPE, St. Paul, USA). Die so entstandenen sechs Versuchsgruppen wurden nach künstlicher Alterung bezüglich der Integrität der Restaurationsränder, einer möglichen Mikroleakage, der Höckerdehnung und der Frakturresistenz untersucht. Im folgenden wird der Versuchsablauf mit Hilfe eines Flussdiagrammes verdeutlicht (Abbildung 5).

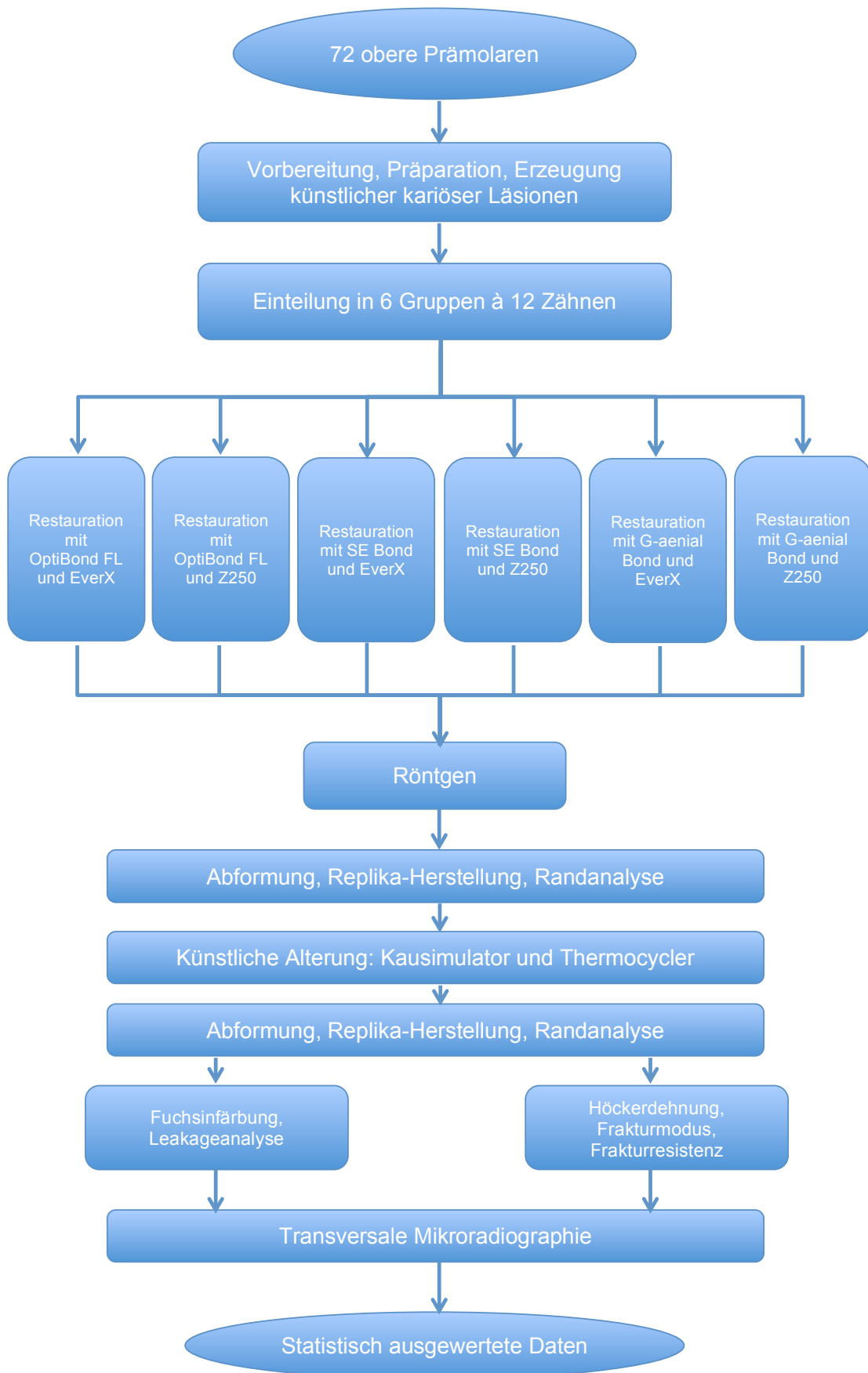


Abbildung 5: Flussdiagramm zum Versuchsablauf

3.2 Extrahierte Zähne und Vorbereitung

Die für die Studie verwendeten extrahierten Prämolaren wurden von Patienten im Rahmen eines durch die Ethik-Kommission der Medizinischen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel genehmigten Verfahrens gespendet (D444/10). Die Proben wurden in 0,5-prozentiger Chloramin-Lösung gelagert. Als Auswahlkriterien galten Größe, Unversehrtheit und das Fehlen von klinisch sichtbarer Demineralisation. Um möglichst geringe Unterschiede zwischen den einzelnen Prämolaren gewährleisten zu können, wurden 250 Prämolaren sowohl in mesio-distaler als auch vestibulo-oraler Richtung vermessen. Dabei wurde eine Abweichung vom Mittelwert um $\pm 0,15$ mm toleriert. Somit wurden Prämolaren mit einer Breite von 9,63 - 9,93 mm in vestibulo-oraler Richtung und 7,25 - 7,55 mm in mesio-distaler Richtung verwendet. Als nächstes wurden die Zähne mit Hilfe eines Scalers (Hu-Friedy SM239, Rotterdam, Niederlande) und einer Polierbürste (hs-Prophylaxebürstchen, Henry Schein, Langen, Deutschland) gereinigt. Für den weiteren Versuchsablauf wurden die Zähne mit Technovit 4071 (Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) in Stahlrohre (Richter, Kiel, Deutschland) mit einem Durchmesser und einer Länge von 15 mm eingebettet. Die Ausrichtung der Zähne erfolgte senkrecht zum Stahlrohr. Dabei reichte das Technovit bis 1 mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze. Anschließend wurde an dem Boden jedes Stahlrohres mit Sekundenkleber (Instand Adhesive, Loctite UK Ltd.) ein „Füßchen“ (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland) befestigt. Dieses wurde benötigt, um die Proben in das Kopierschleifsystem einzuspannen.

3.3 Kavitätenpräparation

Zunächst wurde ein Prämolare mit Hilfe eines Parallelfräasers mit einer „Ideal-Präparation“ versehen. Diese entsprach einer mesial-okklusal-distalen Kavität mit folgenden Ausmaßen: Die Zentralkavität war 2 mm breit und 2,5 mm tief. Die Kästen wurden 3,5 mm breit und 1,5 mm tief präpariert. Der mesiale Kasten endete 1 mm oberhalb und der distale direkt unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze (vgl. hierzu Abbildung 6). Es wurde ein blau-beringter Diamantzylinder (Komet, Lemgo, Deutschland) bei 200.000 Umdrehungen pro Minute unter Wasserkühlung verwendet.

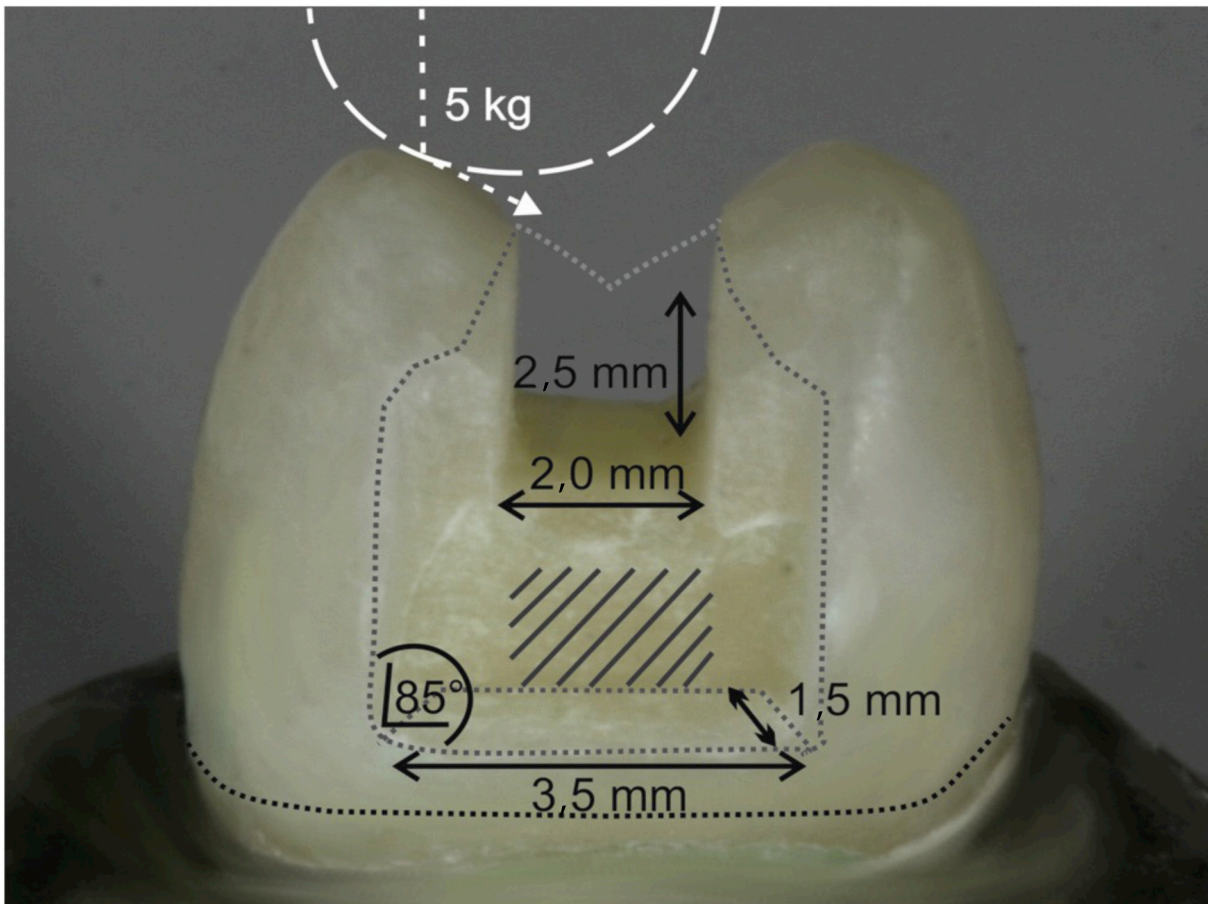


Abbildung 6: Ausdehnung der präparierten Kavitäten nach Schwendicke et al. (48). Der proximale Kasten wurde so präpariert, dass er mesial 1 mm oberhalb und distal unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze (hier durch gepunktete Linie gekennzeichnet) endete. Der schraffierte Bereich kennzeichnet die Lokalisation der später erzeugten künstlichen kariösen Läsion. Der weiße Halbkreis stellt die während der Kausimulation auftreffende Kraft dar.

Diese „Ideal-Präparation“ wurde mit Hilfe eines Celay- Kopierschleifers (Celay, Mikrona, Spreitenbach, Schweiz) auf alle Probezähne übertragen und kleinere Korrekturen mit Hilfe von rotierenden Instrumenten durchgeführt. Die Oberflächen der Kavität wurden unter dem Mikroskop (Stemi Zoom, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) auf Risse und Auffälligkeiten untersucht und betroffene Proben aussortiert.

3.4 Erzeugung künstlicher demineralisierter Läsionen

Vor Erzeugung der künstlichen demineralisierten Läsionen wurden die Zähne mit drei dünnen Schichten Nagellack (High Gloss, Rossmann, Burgwedel, Deutschland) bestrichen, um eine generalisierte Demineralisation der Proben zu verhindern. Anschließend wurden zwei Fenster (2 mm × 3 mm) an den zur Pulpa gerichteten axialen Wänden der Kavität mit einem rot-beringten Diamantzylinder (Komet, Lemgo Deutschland) wieder von Nagellack befreit. Zur Erzeugung der Karies wurden die Zähne für zwölf Wochen bei 37 °C und unter ständiger Zirkulation in einer Azetatlösung gelagert (vgl. hierzu Tabelle 1).

Tabelle 1: Zusammensetzung der Demineralisationslösung nach Buskes et al. (49)

Stoff	Ansatz	Konzentration in mmol	Molare Masse in g/mol	Menge
CaCl ₂ *2H ₂ O	5 l	3	147,02	2,205 g
KH ₂ PO ₄	5 l	3	136,09	2,041 g
MHDP	5 l	0,006	176,00	5,28 g
Eisessig (CH ₃ COOH 100%)	5 l	50	60,05	15,012 g
KOH 10M (28,055g/50ml) H ₂ O	5 l		56,11	Ad pH 5 Ca.: 23 ml
Aqua dest.	5 l		18	Ad 5 l

Anschließend wurde der Nagellack mit einem Scaler (Hu-Friedy, Rotterdam, Niederlande) entfernt und die Oberfläche der Kavitäten erneut auf Auffälligkeiten untersucht.

3.5 Konditionieren und Füllen der Zähne

Vor der weiteren Behandlung wurden die Zähne zunächst in drei gleichgroße Gruppen mit jeweils 24 Zähnen eingeteilt, die mit drei unterschiedlichen Adhäsivsystemen behandelt wurden. Anschließend wurden diese drei Gruppen wiederum in jeweils zwei Gruppen mit zwölf Zähnen aufgeteilt. Aus allen drei vorherigen Gruppen wurden je zwölf Zähne mit dem einen Restaurationsmaterial und die übrigen Zähne mit dem anderen Restaurationsmaterial versorgt (Abbildung 7).

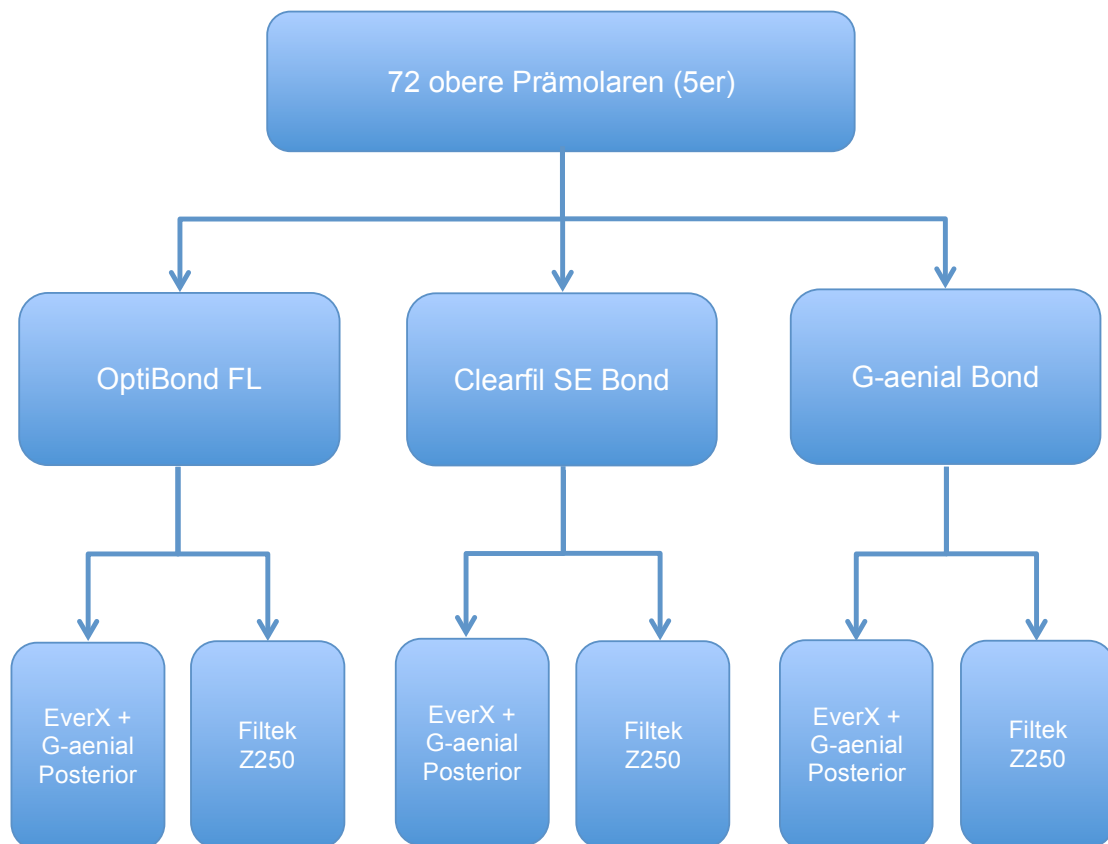


Abbildung 7: Flussdiagramm zur Gruppeneinteilung der Adhäsivsysteme und Restaurationsmaterialien

Die Kavitäten, die mit OptiBond FL versorgt werden sollten, wurden zunächst im Schmelz für 30 Sekunden und im Dentin für 15 Sekunden mit 37-prozentiger Phosphorsäure (3M ESPE, St. Paul, USA) geätzt und abgesprüht. Anschließend wurden sie getrocknet, bis die Oberfläche nicht mehr nass, aber noch feucht war. Dann wurden sie für 15 Sekunden mit dem OptiBond FL Primer benetzt. Das Lösungsmittel wurde erneut verpüstert und das OptiBond FL Adhäsiv aufgetragen und für 20 Sekunden lichtgehärtet.

Für die Versorgung mit Clearfil SE Bond wurde keine weitere Vorbereitung getroffen. Die Kavitäten wurden für 20 Sekunden mit dem Primer benetzt und anschließend das Lösungsmittel verpüstert. Das Adhäsiv wurde aufgetragen und lichtgehärtet.

Vor der Versorgung mit G-aenial Bond wurde der Schmelzanteil der Kavität zunächst für zehn Sekunden mit G-aenial Etch (40-prozentige Phosphorsäure) angeätzt, die Säure gut abgesprüht und die Kavität getrocknet. Anschließend wurde G-aenial Bond aufgetragen und mit starkem Luftdruck verpüstert und lichtgehärtet.

Eine Tofflemire Matrize wurde angelegt und die Kavitäten inkrementweise mit EverX oder Filtek Z250 in der Schalentechnik gefüllt. Nach jedem Inkrement wurde mit einer LED-Lampe (Valo, Ultradent, Salt Lake City, Utah, USA) mit einer Intensität von 1400 mW/cm^2 für zehn Sekunden (EverX) oder für 20 Sekunden (Filtek Z250) gehärtet. Nach Fertigstellung wurden die Restaurationen poliert (Eve Polishing, Vetter, Pforzheim, Deutschland) und unter dem Stereomikroskop (Stemi Zoom, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) auf Unregelmäßigkeiten und Füllungsüberschüsse überprüft.

3.6 Röntgenaufnahmen

Um die Läsionstiefe der Proben zu kontrollieren, wurden von jeder Probe Röntgenaufnahmen in vestibulo-oraler Richtung angefertigt. Hierzu wurde eine Hilfsvorrichtung sowie ein Röntgengerät (Gendex Division, Dentsply Italia, Milano, Italien) verwendet. Die eingestellte Strahlendosis betrug $0,40 \text{ mS}$.

3.7 Abformung, Replikaherstellung und Randspaltanalyse

Zur Beurteilung des Randspaltes wurde von jedem Zahn eine Korrekturabformung genommen. Dafür wurde ein aus transparentem Kunststoff hergestellter Schlauch (Gardena, Ulm, Deutschland) der Stärke 16 mm × 2,5 mm in 2,5 cm lange Stücke geschnitten und mit den Probennummern versehen. Diese wurden als Außenform für die Abdrücke verwendet und mit Puttymasse (Provil novo, Heraeus Kulzer, Wehrheim, Deutschland) ausgefüllt. Die Zähne wurden in die Masse gedrückt und dabei einige Male gedreht, um eine grobe Vorabformung herzustellen. Nach 5,5 Minuten (Verarbeitungszeit und Abbindezeit) wurde ein Polyvinyl-Siloxan Abformmaterial (Honigum light, DMG, Hamburg, Deutschland) auf die gefüllten approximalen Kästen gegeben und zu einem dünnen Film verpüstert. Anschließend wurde der gesamte Zahn mit diesem Material umspritzt und auch die Vorabformung mit dieser Masse aufgefüllt. Der so vorbereitete Zahn wurde in der Vorabformung repositioniert und bis zur vollständigen Aushärtung drucklos dort belassen. Die Abformungen wurden nach 24 Stunden mit hochprozentigem Alkohol und Aceton gereinigt, entfettet, getrocknet und daraufhin mit einem Epoxidharz (Stycast 1266, Emerson Cuming, Canton, USA) ausgegossen. Die Rasterelektronenmikroskop-Träger (agar scientific, Essex UK, Vereinigtes Königreich) wurden auf die noch flüssige Epoxidharzmasse gelegt. Nach wiederum 24 Stunden wurde der zu analysierende Rand durch eine leichte L-förmige Einkerbung am Füllungsrand in der Zahnhartsubstanz mit Hilfe eines Skalpell (Henry Schein, Langen, Deutschland) markiert und die so entstandenen und vorbereiteten Replika in der Sputteranlage (Sputter Coaster SCD 030, Detax, Ettlingen, Deutschland) für 120 Sekunden bei einer Stromstärke von 40 mA mit einer dünnen Goldschicht versehen. So vorbereitet konnten die Replika unter dem Rasterelektronenmikroskop (AMRAY 1810, Amray, Bedford, USA) bei 200-facher Vergrößerung betrachtet und der Randspalt analysiert werden. Die quantitative Analyse der verschiedenen Füllungsrandqualitäten erfolgte nach einer Methode, welche bereits in vorherigen Studien entwickelt und modifiziert wurde (50, 51). Die Füllungsrandstrukturen wurden anhand eines Kriterienkataloges (52) jeweils einer von sieben unterschiedlichen Randqualitäten zugeordnet (vgl. Abbildung 8) und in Proportion von akzeptablem Rand in Prozent der gesamten gingivo-zervikalen Länge analysiert. Als akzeptabel wurden Ränder der Randqualitäten 1 - 3 (einschließlich) angesehen. Um die morphologischen Veränderungen an den Füllungsändern zu erfassen, wurden zu den Zeitpunkten

T1 (direkt nach Legen der Füllung) und T2 (nach 21 Tagen Wasserlagerung, 1,2 Millionen Zyklen Kaudruckbelastung und 10.000 Zyklen Temperaturwechselbelastung) auf die oben beschriebene Weise Repliken von den Proben hergestellt und bei 200-facher Vergrößerung unter dem Rasterelektronenmikroskop analysiert.

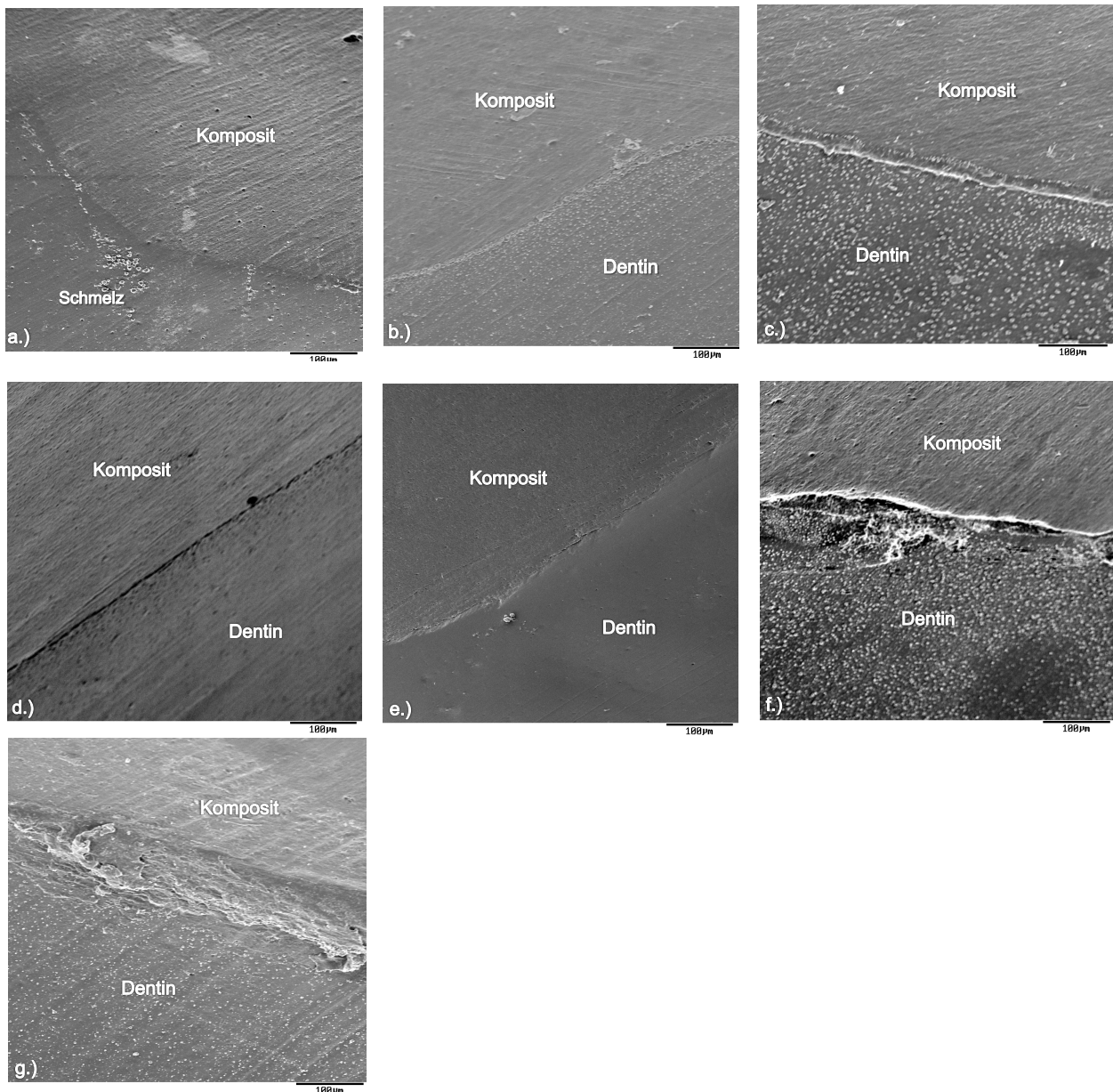


Abbildung 8: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der unterschiedlichen Randqualitäten der Restaurationsränder in Schmelz oder Dentin. Originalvergrößerung 200-fach. a.) Beispiel für die Randqualität RQ 1 „perfekter Rand“: Rand nicht oder kaum erkennbar, keine Randunregelmäßigkeiten, kein Randspalt. b.) Beispiel für die Randqualität RQ 2: kein Randspalt, Rand erkennbar, geringe Randunregelmäßigkeiten. c.) Beispiel für die Randqualität RQ 3: kein Randspalt, massive Randunregelmäßigkeiten. d.) Beispiel für die Randqualität RQ 4 „Haarriss“: Randspalt erkennbar. e.) Beispiel für die Randqualität RQ 5: Randspalt erkennbar ($< 2 \mu\text{m}$) und geringe Randunregelmäßigkeiten oder Randspalt unter $5 \mu\text{m}$, Randspalt deutlich erkennbar, keine Randunregelmäßigkeiten. f.) Beispiel für die Randqualität RQ 6: Randspalt unter $5 \mu\text{m}$ mit massiven Randunregelmäßigkeiten oder Randspalt über $5 \mu\text{m}$ mit und ohne Randunregelmäßigkeiten. g.) Beispiel für die Randqualität RQ 7: Überschuss.(52)

3.8 Künstliche Alterung

Um eine Alterung der restaurierten Prämolaren zu simulieren, wurden sie zunächst mit einer Belastung von 5 kg mit einer schräg verlaufenden Abgleitbewegung von palatinal nach mesio-zentral um 0,3 mm für 1,2 Millionen Zyklen in einem Kausimulator (Willytech, Feldkirchen-Westerham, Deutschland) mit einem Keramikball (Durchmesser 5 mm; Steatite, Hoechst, Wunsiedel, Deutschland) bekaut (1,6 Hz, 135° Lastwinkel) (vgl. hierzu Abbildung 6). Die Last traf auf eine okklusale Fläche von 1,5 mm². Dieser Vorgang fand in destilliertem Wasser statt. Anschließend durchliefen sie im Thermocycler (liquid cycler, Haake, Karlsruhe, Deutschland) 10.000 Zyklen im Temperaturbereich von 5 – 55 °C (12 s/30 s Verweilungsdauer/Wechseldauer, destilliertes Wasser).

3.9 Randspaltanalyse

Nach der künstlichen Alterung wurde erneut eine Randspaltanalyse, wie unter 3.6. beschrieben, durchgeführt, um mögliche Veränderungen durch die Belastung festzustellen.

3.10 Fuchsinfärbung und Leakagebestimmung

Die Proben wurden wiederum mit Nagellack abgedeckt, wobei nur zwei Fenster (4 mm × 2 mm) um den gingivo-zervikalen Rand freigelassen wurden. Anschließend wurden die Zähne für 48 Stunden in eine 2-prozentige Fuchsinlösung gelegt. Nach Ablauf der Zeit wurden die Zähne der Lösung entnommen, unter fließendem Leitungswasser abgespült und mit Hilfe eines Skalpells (Henry Schein, Langen, Deutschland) von dem Nagellack befreit.

Nach Abschluss des Frakturversuches (3.11) wurden die Messingrohre mit einer Säge (Exakt, patho-service, Hamburg, Deutschland) gespalten und die Proben somit ausgebettet. Außerdem wurde die Krone apikal der Schmelz-Zement-Grenze innerhalb des Technovits abgetrennt. Im Anschluss daran wurden die Proben in vorgefertigte Silikonformen gelegt und mit Technovit 4071 umgossen. Die derart hergestellten Technovitblöcke wurden so gesägt, dass die Zähne innerhalb der Restauration in

mesio-distaler Richtung durchtrennt wurden. Anschließend wurden die Schnittflächen mit der Poliermaschine auf Hochglanz poliert und fotografiert (siehe Abbildung 10). Mit Hilfe eines mit der gleichen Vergrößerung fotografierten Maßstabes konnte in dem Programm Photoshop (Adobe Systems, Kalifornien, USA) die Länge von 2 mm bestimmt werden und so die Eindringtiefe (in μm), der in den Zahn diffundierten Farbe, durch zwei unabhängige Betrachter bestimmt werden.

3.11 Frakturmodus, Höckerdehnungsversuch und Bestimmung der Frakturresistenz

Zur Feststellung der Frakturresistenz der restaurierten Prämolaren wurden diese in der Universalprüfmaschine (Z010/TN2S, Zwick, Ulm, Deutschland) mit zunehmender Kraft belastet. Zwischen Maschine und Zahn wurde eine Zinnfolie (0,5 mm, Coltène, Alstätten, Schweiz) platziert. Neben der Höckerdehnung bei 200 N und 400 N wurden die Kraft, die zum Zerschneiden der Zähne führte, und der jeweilige Frakturmodus bestimmt. Die Kraft traf mittig und gleichverteilt auf beide Höcker mit einer Geschwindigkeit von 0,25 mm/s auf. Die Kraft-Verteilungs-Kurven wurden digital analysiert (Zwicktest Xpert Software, Zwick, Deutschland). Die Höckerdehnung wurde mithilfe von zwei Messuhren (Teclock TM-1201, Nagata, Japan), die vestibulär und palatinal befestigt wurden, gemessen. Der gesamte Versuch wurde mit einer Kamera (Digi Microscale, dnt, Dietzenbach, Deutschland) aufgezeichnet. Somit konnten die Dehnungswerte im Anschluss an den Versuch bei einer Kraft von 200 N und 400 N abgelesen werden. Die maximal aufgewendete Kraft konnte auf dem Bildschirm der Universalprüfmaschine abgelesen werden. Um negative Werte im Höckerdehnungsversuch, die durch das leichte Eindrücken der Zähne und das somit bedingte Verschieben der Messuhren entlang der Wölbung des Zahnes entstehen, zu verhindern, wurden sowohl die Vestibulär- als auch die Palatinalfläche der Zähne mit Hilfe eines Parallelschleifers (Intra-L-Motor 181H, KaVo, Biberach, Deutschland) leicht begradigt.

Der Frakturmodus wurde von zwei unabhängigen Betrachtern unter dem Mikroskop (Stemi Zoom, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) bei 10-facher Vergrößerung betrachtet und in folgende Kategorien eingeteilt: Reparabel z.B. Fraktur der approximalen Kästen, Frakturen oberhalb der Schmelz-Zement-Grenze oder katastrophal/ fatal z.B.

Vertikalfrakturen, Frakturen, die unter die Schmelz-Zement-Grenze reichen oder mit Eröffnung der Pulpa einhergingen (Abbildung 9).

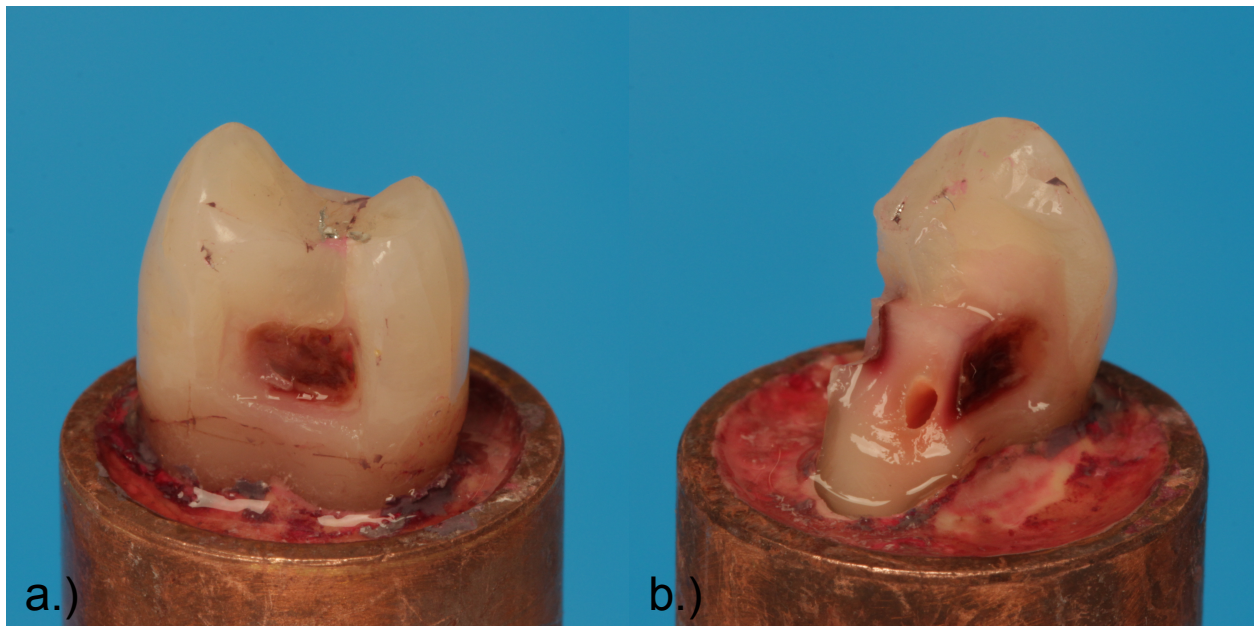


Abbildung 9: Frakturmodi. a.) Beispiel für eine reparabel-einstufende Fraktur mit herausgesprengtem approximalem Kasten. b.) Beispiel für eine fatale Fraktur (nicht reparabel) mit tiefer Frakturlinie unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze und Eröffnung der Pulpa.

3.12 Transversale Mikroradiographie

Die für die Leakageuntersuchung hergestellten Proben wurden mit Hilfe von Sekundenkleber auf mit den Probennummern beschriftete Plexiglas-Objektträger (patho-service, Ostersteinbeck, Deutschland) geklebt. Anschließend wurden diese mit einer Bandsäge und einem Mikroschleifsystem (400 CS, abrasives Papier 1200, 2400 und 400) auf Schnitte mit einer Stärke von 100 μm geschnitten und poliert.

Für die Herstellung der transversalen Mikroradiographien wurde die nickelgefilterte (20 μm) Röntgenquelle auf eine elektrische Spannung von 20 kV und eine Stromstärke von 20 mA eingestellt. Es wurde ein "step wedge" aus 99,9-prozentigem Aluminium benutzt. Der Abstand zwischen Strahlungsquelle und Film wurde auf 280 mm eingestellt und der Film für zehn Sekunden der Strahlung ausgesetzt, was sich in vorherigen Experimenten als optimal erwies (48). Es wurde ein Hochwiderstandsfilm (high-speed holographic film, Kodak Professional, SO-253; Kodak, Stuttgart, Deutschland) benutzt

und nach Herstellerangaben unter standardisierten Bedingungen entwickelt. Die angefertigten Mikroradiographien wurden mit Hilfe eines Digitalen-Bilder-Analysierungs-Programms (CCD Video Camera Modul XC77E; Sony, Tokio, Japan), eines daran angeschlossenen Universalmikroskops (Axioplan; Zeiss, Oberkochen, Deutschland) und eines Computers hinsichtlich des Mineralverlustes und der Läsionstiefe analysiert (TMR für Windows Version 2.0.27.2 InspektorResearch System, Amsterdam, Niederlande).

3.13 Statistische Analyse

Die erhaltenen Daten wurden mit SPSS 20 (IBM, Armonk, USA) ausgewertet. Ob eine Normalverteilung vorlag, wurde mit Hilfe des Shapiro-Wilk-Testes überprüft. Zum Vergleich der Ergebnisse in Schmelz und Dentin wurden der t-Test für normalverteilte Gruppen und der Mann-Whitney-U-Test für nicht normalverteilte Gruppen verwendet. Um nominelle Daten zu vergleichen, wurde der χ^2 -Test verwendet. Zur Analyse der Auswirkungen der verschiedenen Adhäsivsysteme und Restaurationsmaterialien auf die untersuchten Parameter wurden generalisierte lineare Modelle (GLM) eingesetzt. Das Signifikanzniveau wurde bei allen Tests auf $p \leq 0,05$ festgelegt.

4. Ergebnisse

4.1 Vergleich der Versuchsgruppen

Um sicherzustellen, dass Unterschiede in der Zusammensetzung der Versuchsgruppen nicht zu vermeintlich unterschiedlichen Ergebnissen geführt haben, wurden zunächst die Versuchsgruppen bezüglich der Zahngröße, der erzeugten Läsionstiefe und des Mineralverlustes miteinander verglichen. Es wurden keine signifikanten Unterschiede in den gemessenen mesio-distalen und bucco-oralen Zahnbreiten der verschiedenen Gruppen festgestellt ($p > 0,05$, GLM). Es konnten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen in Bezug auf die Läsionstiefe ($244 \pm 63 \mu\text{m}$), den Mineralverlust (ΔZ ; $7100 \pm 2004 \text{ Vol\% } \mu\text{m}$) und die Mineralverlustrate ($29 \pm 4 \text{ Vol\%}$) festgestellt werden. Zur Auswertung der Läsionstiefe waren Fotografien und Mikroradiographien notwendig (vgl. Abbildung 10).

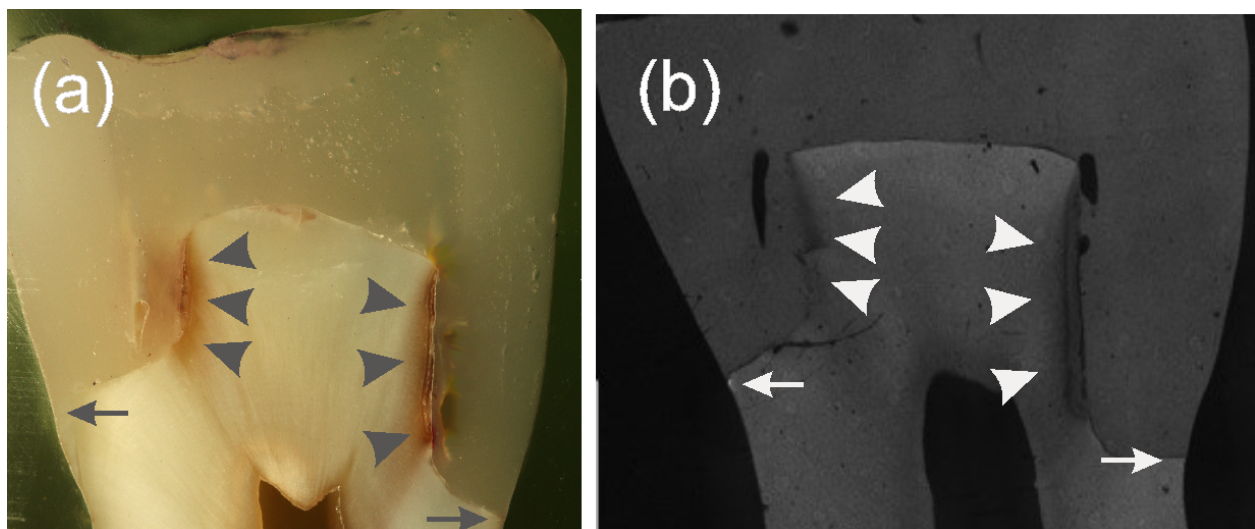


Abbildung 10 nach Schwendicke et al. (1): Schnitte durch die restaurierten Zähne mit demineralisierten Läsionen unterhalb der Restauration gekennzeichnet durch Pfeilspitzen. Die Pfeile markieren den Restaurationsrand: links schmelzbegrenzt, rechts dentinbegrenzt. a.) Fotografie eines in Kunststoff eingebetteten Schnitts. b.) Mikroradiographisches Bild. Blasen innerhalb der Restauration werden als Radioluzenzen sichtbar.

4.2 Auswertung der Qualität der Restaurationsränder

4.2.1 Auswertung der Rasterelektronenmikroskopie

Der Anteil an akzeptablen Restaurationsrändern war nicht signifikant abhängig davon, ob sich die Restaurationsränder im Schmelz oder Dentin befanden ($p > 0,05$, Mann-Whitney). Jedoch wurde der Anteil an akzeptablen Restaurationsrändern sowohl im Schmelz als auch im Dentin signifikant durch das verwendete Adhäsivsystem ($p \leq 0,001$) beeinflusst. Das verwendete Restaurationsmaterial hatte diesbezüglich keinen signifikanten Einfluss ($p = 0,105$). Auch die Kombination der beiden Faktoren beeinflusste die Randqualität nicht signifikant ($p = 0,191$).

Der höchste Anteil an akzeptablen Restaurationsrändern wurde bei Zähnen festgestellt, die mit OptiBond FL restauriert wurden (Median [25./75. Perzentile]:93 [78/100%]). Clearfil SE Bond (82[60/94]%) wies in Bezug auf den Anteil an akzeptablen Restaurationsrändern schlechtere Werte als OptiBond FL auf. Am geringsten war der Anteil an akzeptablen Restaurationsrändern bei Verwendung von G-aenial Bond (43[15/74%]; $p \leq 0,05$) (siehe hierzu Abbildung 11).

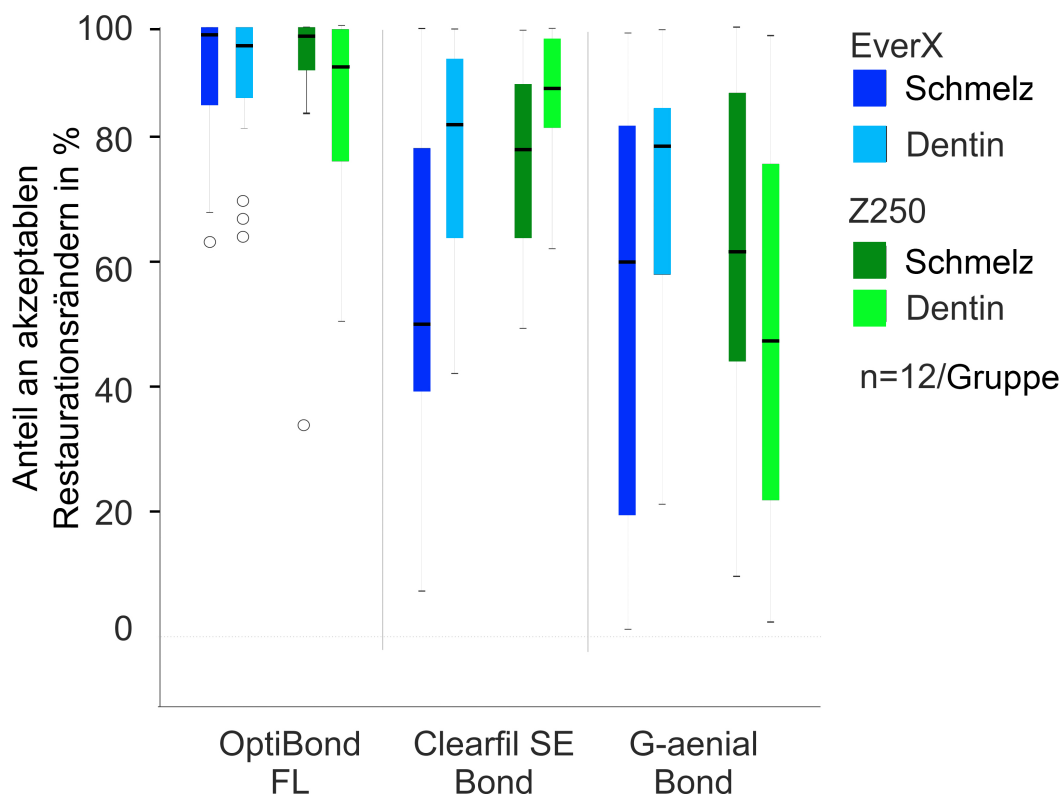


Abbildung 11: Darstellung der Anteile an akzeptablen Restaurationsrändern in Prozent nach Schwendicke et al. (1). Der Anteil an akzeptablen Restaurationsrändern bei Zähnen die mit EverX restauriert wurden, ist in blau dargestellt. Die Ergebnisse der Zähne, die mit Filtek Z250 restauriert wurden, sind in grün dargestellt. Weiterhin wurde unterschieden in Restaurationsränder, welche im Schmelz liegen (dunkelblau bzw. dunkelgrün) und Restaurationsränder, welche im Dentin liegen (hellblau bzw. hellgrün). Der Querstrich stellt den Medianwert dar. Der farbige Kasten repräsentiert die 25. bis 75. Perzentile. Minimal- und Maximalwerte werden durch die Antennen, Ausreißer durch die Kreise verdeutlicht.

4.2.2 Auswertung der Mikroleakage

Die gemessene Mikroleakage war an Restaurationsrändern im Dentin signifikant tiefer als an den Rändern im Schmelz ($p < 0,01$), unabhängig von der Art des verwendeten Adhäsivsystems oder Komposites (Schmelz: $p = 0,749$ und $0,569$; Dentin: $p = 0,112$ und $0,909$).

Die Veränderung der Kombination von Adhäsivsystem und Restaurationsmaterial hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Ausbildung der Leakage in Schmelzrändern ($p = 0,205$), wirkte sich jedoch signifikant auf die Leakage in Dentinrändern aus ($p = 0,010$) (Tabelle 2).

Tabelle 2: Tiefe der gemessenen Mikroleakage in μm (Median, 25./75. Perzentile)

Zahnhartsubstanz	Komposit	OptiBond FL	Clearfil Bond	SE	G-aenial Bond
Schmelz	EverX	0,00 (0,00/19,65)	0,00 (0,00/0,00)		0,00 (0,00/80,30)
	Z250	0,00 (0,00/0,00)	0,00 (0,00/0,00)		177,45 (0,00/440,90)
Dentin	EverX	143,25 (0,00/300,80)	0,00 (0,00/340,30)		163,40 (0,00/319,80)
	Z250	0,00 (0,00/428,90)	0,00 (0,00/230,35)		122,90 (0,00/323,00)

4.3 Auswertung der Höckerdehnung

Die gemessene Höckerdehnung war signifikant erhöht bei einer Belastung von 400 N verglichen zur Höckerdehnung bei einer Belastung von 200 N ($p < 0,05$; t-Test).

Das Adhäsivsystem hatte signifikant Einfluss auf das Ausmaß der Höckerdehnung bei 200 N ($p = 0,008$). Es konnte jedoch weder ein signifikanter Einfluss des Restaurationsmaterials noch der Kombination aus Restaurationsmaterial und Adhäsivsystem auf die Höckerdehnung festgestellt werden ($p = 0,618$ und $p = 0,481$) (vgl. Abbildung 12). Bei Belastung mit 400 N hatte keiner der Faktoren (Adhäsivsystem, Komposit, Kombination von beiden) signifikant Einfluss auf die Höckerdehnung ($p = 0,530$; $0,117$; $0,530$) (vgl. Abbildung 12).

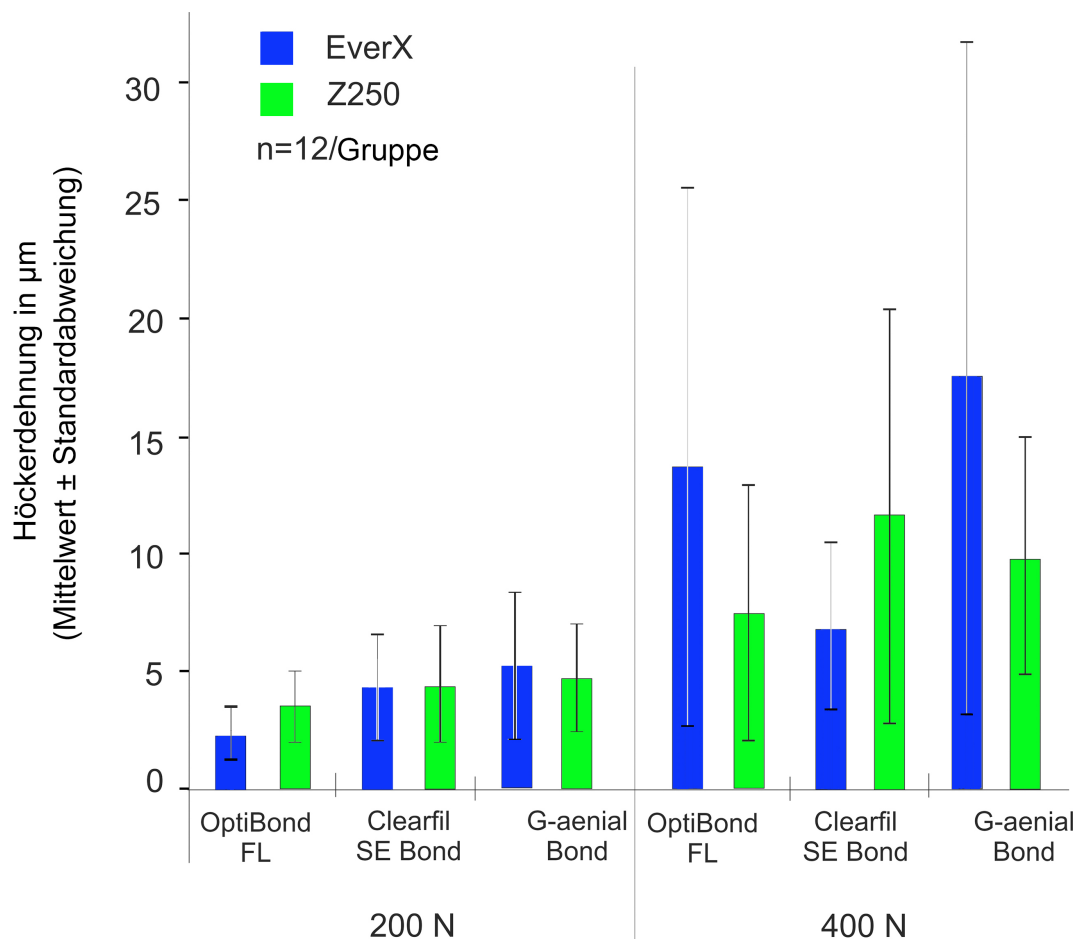


Abbildung 12: Darstellung der Höckerdehnung bei 200 N und 400 N in Abhängigkeit von Restaurationsmaterial (EverX: blau und Filtek Z250: grün) und Adhäsivsystem nach Schwendicke et al. (1). Die obere Begrenzung der farbigen Kästen stellt den Mittelwert, die Antennen das Minimum und Maximum der Standardabweichung dar.

4.4 Auswertung der Frakturresistenz und des Frakturmodus

Die Frakturresistenz war bei den Zähnen, die mit OptiBond FL restauriert wurden, höher (Mittelwert [SD] : 1210[336] N), als bei den mit Clearfil SE Bond (1007[208] N) oder mit G-aenial Bond (1023[281] N; $p < 0,05$) restaurierten Zähnen.

Außerdem war die Frakturresistenz ebenfalls höher bei Zähnen, die mit EverX (1182[314] N) restauriert wurden, als bei welchen, die mit Filtek Z250 (979[228] N; $p < 0,01$) restauriert wurden (Abbildung 13).

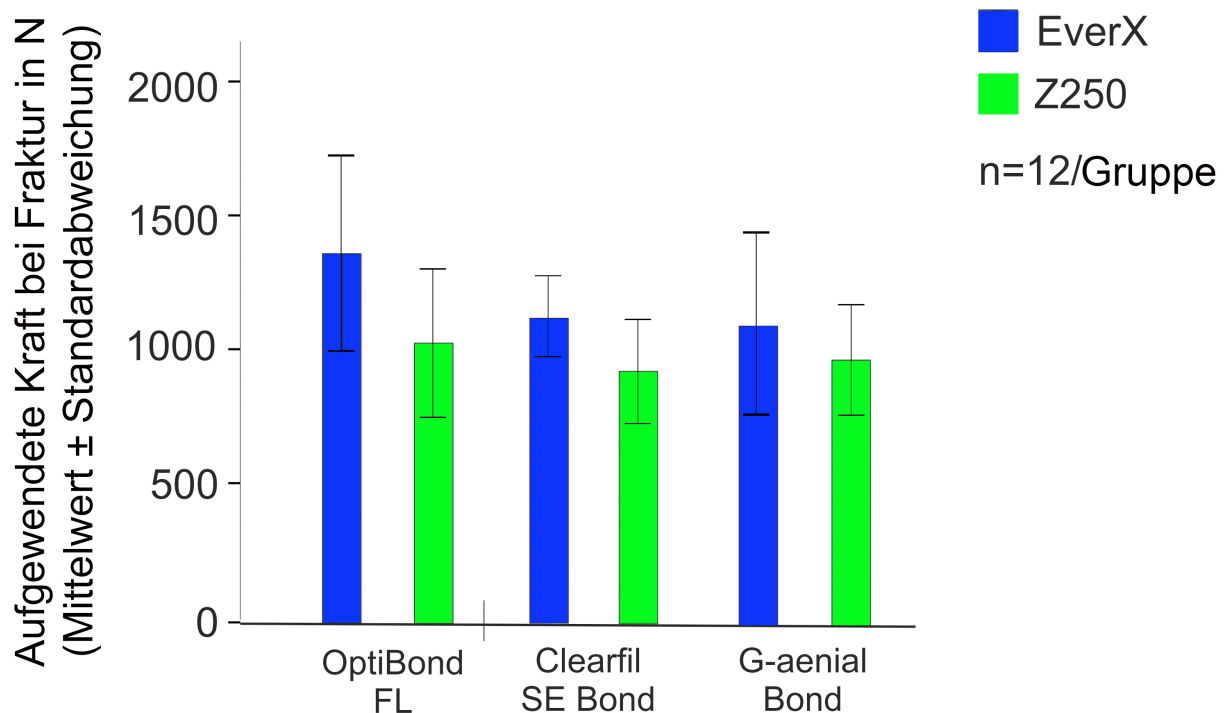


Abbildung 13: Darstellung der Frakturresistenztestung in Abhängigkeit von Restaurationsmaterial (EverX: blau und Filtek Z250: grün) und Adhäsivsystem nach Schwendicke et al. (1). Die obere Begrenzung repräsentiert den Mittelwert und die Antennen das Minimum und Maximum der Standardabweichung.

Auf den Frakturmodus hatte weder das Adhäsivsystem noch das Restaurationsmaterial signifikant Einfluss ($p > 0,05$; χ^2 -Test) (siehe Tabelle 3)

Tabelle 3: Analyse des Frakturmodus, Einteilung in katastrophale und reparable Frakturen in Abhängigkeit von Restaurationsmaterial und Adhäsivsystem

Adhäsivsystem	Komposit	Katastrophal	Reparabel	Total
OptiBond FL	EverX	5	7	12
	Z250	7	5	12
		50%	50%	100%
Clearfil Bond	SE EverX	5	7	12
	Z250	3	9	12
		38%	62%	100%
G-aenial Bond	EverX	8	4	12
	Z250	4	8	12
		50%	50%	100%
Total		36	36	72

5. Diskussion

Bei der selektiven Kariesexkavation wird zentral kariöses Dentin belassen, um pulpale Komplikationen zu vermeiden. Somit können Zähne bei geringerem Kostenaufwand länger erhalten werden (22). Eine auftretende Herausforderung bei der Restauration von selektiv exkavierten Zähnen ist die angestrebte Stärke des Haftverbundes zwischen den nach selektiver Exkavation zurückbleibenden, demineralisierten Zahnhartsubstanzen und der Restauration (53). Sowohl die Härte als auch das Elastizitätsmodul des kariösen Dentins sind geringer als die von gesundem Dentin (13, 54). Besonders nach selektiver Exkavation verbleibt bakteriell kontaminiertes oder zumindest demineralisiertes Dentin, welches sich durch Demineralisation, Porosität und Veränderungen der Kristalle und der Struktur auszeichnet (55). Der geringe Mineralgehalt und die höhere Porosität bedingen eine erhöhte Dicke des durch das Adhäsiv entstehenden Hybridlayers (37-39). Eine vollständige Penetration des Kunststoffmonomers in diesen dicken Hybridlayer erfolgt nur selten. Des Weiteren wird die Monomerpenetration durch die Obliteration der Dentintubuli und die Bildung säureresistenter Kristalle eingeschränkt (40, 41, 56). Das Resultat ist eine unvollständige Penetration der demineralisierten Dentinbereiche. Dies ist die Ursache für geringere Haftkräfte der Etch-and-Rinse- sowie der Self-Etch-Adhäsivsysteme zu kariösem Dentin im Vergleich zu gesundem Dentin (57). Bei Verbleiben von kariösem Dentin unterhalb einer Restauration kann dadurch eine Beeinträchtigung der Stabilität des restaurierten Zahnes und der Integrität der Restauration entstehen (44, 48, 58).

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwiefern die Eigenschaften eines selektiv exkavierten Zahnes und der Restauration *in vitro* durch das verwendete Adhäsivsystem oder Kompositmaterial beeinflusst werden. Des Weiteren sollte untersucht werden, welche Faktoren nach selektiver Exkavation die größte Relevanz auf die Stabilität von Zahn und Restauration besitzen. Es wurde kein direkter Vergleich zwischen selektiv und vollständig exkavierten Zähnen gezogen, da diese Arbeit auf vorherigen Studien mit der genannten Thematik basiert (44, 48, 58). In diesen Studien konnte bereits gezeigt werden, dass weder der Randschluss noch eine mögliche Mikroleakage durch nahe der Pulpa verbleibendes, demineralisiertes Dentin beeinflusst werden (58). Die Frakturresistenz hingegen wird durch belassenes demineralisiertes Dentin zu einem gewissen Anteil beeinflusst. Es konnte gezeigt werden, dass die Menge an

belassenem, demineralisiertem Dentin entscheidend für das Ausmaß der Beeinflussung der Frakturresistenz ist (48). Zähne mit flachen kariösen Läsionen wiesen signifikant höhere Frakturresistenzen auf, als Zähne mit tiefen kariösen Läsionen, unabhängig davon, ob selektiv oder vollständig exkaviert wurde. Zwischen vollständiger und selektiver Exkavation bestand kein signifikanter Unterschied (48). In einer anderen Studie konnte zudem gezeigt werden, dass die Lokalisation der kariösen Läsion möglicherweise die Frakturresistenz nach selektiver Exkavation beeinflusst (44).

5.1 Quantitative Randanalyse

Um die Qualität der Restaurationsränder zu überprüfen, wurde eine indirekte Methode gewählt, bei welcher mit Hilfe der Replikatechnik und anschließender Randanalyse im Rasterelektronenmikroskop die Randqualität untersucht wird. Dieses Verfahren hat sich in der Vergangenheit bewährt (59, 60). Die Herstellung der Replika mit Hilfe eines dünnfließenden Epoxidharzes sichert eine detailgetreue Darstellung der Restauration und die spätere Archivierbarkeit der Proben. Somit werden genau reproduzierbare Untersuchungsergebnisse erzielt und auch bei geringer Probenzahl relevante Aussagen ermöglicht (52). Nachteile dieser Methode sind die entstehenden zweidimensionalen Bilder, welche eine Beurteilung der Tiefenausdehnung von Randspalten ausschließen. Auch durch Verzerrungen infolge nicht ganz senkrecht aufgenommener Bilder kann es zu quantitativen Fehlbeurteilungen des Restaurationsrandes kommen (51).

Unter Berücksichtigung der Einschränkungen, welche sich durch die Methodik ergeben, kann die erste Nullhypothese zum Teil angenommen werden. Eine signifikante Beeinflussung durch das genutzte Restaurationsmaterial sowie eine Kombination von Adhäsivsystem und Restaurationsmaterial konnte nicht festgestellt werden. Auch ohne Überschichtung des glasfaserverstärkten Komposites im approximalen Bereich wurden gute Randqualitäten erreicht und die erwarteten Unregelmäßigkeiten waren nicht festzustellen (47).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Randqualität und somit auch die Randspaltbildung von Restaurationen in selektiv exkavierten Zähnen signifikant durch das verwendete Dentinadhäsivsystem beeinflusst werden. OptiBond FL wird als Goldstandard angesehen (2, 61), was sich durch die vorliegenden Ergebnisse bestätigt hat. Wie auch

vorherige Studien zeigen konnten (62), wiesen die mit G-aenial Bond behandelten Proben signifikant schlechtere Randqualitäten auf, als jene, die mit OptiBond FL oder Clearfil SE Bond behandelt wurden. Durch das selektive Ätzen und das anschließende Entfernen der gelösten Präzipitate bei den Etch-and-Rinse-Systemen werden Verunreinigungen entfernt und somit eine bessere Durchdringung des Hybridlayers erreicht. Im Gegensatz dazu entfernen selbstätzende Systeme den Smearlayer nicht vollständig. Durch das Verbleiben des Smearlayers bedingt, verringert sich möglicherweise die Menge an Pulpaflüssigkeit, die während des Legens der Restauration austritt (63). Somit könnte die Anwendung von weniger hydrophilen Adhäsiven für den pulpanahen Bereich möglich werden (40). Allerdings kommt es unter einer kariösen Läsion in Pulpanähe zu massiver tubulärer Obliteration. Dadurch wird ein signifikanter Übertritt von Pulpaflüssigkeit verhindert. Somit könnte der Einfluss eines Smearlayers beim Verbund zu gesundem Dentin mehr zum Tragen kommen, als bei dem Verbund zu kariösem Dentin.

5.2 Mikroleakage

Beruhend auf der ökologischen Plaquehypothese ist eine dichte Versiegelung der Bakterien in der verbleibenden kariösen Läsion notwendig, um ein Fortschreiten zu verhindern (4). Es wurde getestet, ob dies zutrifft und somit das Belassen von Bakterien möglich ist. Die Eindringtiefe der Fuchsinlösung bei der Leakageanalyse ist in diesem Versuchsaufbau ein Surrogatparameter für das Eindringen von Substraten entlang des Restaurationsrandes. Keine Restauration zeigte eine Leakage in tiefere pulpoaxiale Areale. Damit es zu einem Fortschreiten der kariösen Läsion kommt, ist ein Vordringen der Substrate bis zu den verbleibenden Bakterien notwendig. Die Ergebnisse der Mikroleakageanalyse legen daher nahe, dass dies in keinem der analysierten Fälle eintreffen würde.

5.3 Frakturresistenz und Frakturmodus

Zur Bestimmung der Bruchfestigkeit wurden die Probenzähne in die Universalprüfmaschine eingespannt und von okklusal in axialer Richtung belastet. Dies erwies sich in vorherigen Studien als praktikabel und entspricht der physiologischen Belastung bei der Mastikation (64, 65). Um eine punktuelle Belastung zu vermeiden und eine gleichmäßige Kraftverteilung zu erreichen, wurde eine Zinnfolie zwischen den Druckstempel und die Okklusalfäche des Zahnes gelegt (66). Dieser Versuchsaufbau spiegelt nur eingeschränkt die physiologischen Belastungen wieder, da individuelle Aspekte und Parafunktionen nicht berücksichtigt werden (65). Des Weiteren ahmte das hier verwendete Modell nicht die natürliche Reaktion der Pulpa nach, welche im lebenden Organismus die Bildung von Tertiärdentin induziert. Tertiärdentin scheint nur bedingt Unterschiede zu Sekundärdentin aufzuweisen (67) und hat keinen Einfluss auf die Effekte des Austritts von Pulpafluid während der Restauration (40), weshalb in diesem Punkt keine Veränderungen zu erwarten sind. Jedoch ist durch die fehlende Tertiärdentinbildung möglicherweise weniger Zahnhartsubstanz vorhanden, hieraus resultiert möglicherweise eine geringere Stabilität des Zahnes im Vergleich zur klinischen Situation.

Die getroffene Nullhypothese kann in Bezug auf die Frakturresistenz abgelehnt werden. Die Frakturresistenz zeigte in Abhängigkeit vom Dentinadhäsivsystem und Restaurationsmaterial signifikante Unterschiede. Das verwendete OptiBond FL weist bessere Ergebnisse in experimentellen und klinischen Studien auf (2, 61). Auch unsere Ergebnisse zeigen diese Überlegenheit von OptiBond FL. In Bezug auf die Frakturresistenz war folgende Abstufung zu erkennen. Zähne, die mit OptiBond FL restauriert wurden, wiesen signifikant höhere Frakturresistenzen auf und waren somit belastbarer. Proben, die mit G-aenial Bond restauriert wurden, zeigten die geringsten Frakturresistenzen. Dazwischen lagen die Werte der Frakturresistenz für Proben, die mit Clearfil SE Bond restauriert wurden. Diese Abstufung konnte bereits bei der Randanalyse festgestellt werden und begründet sich, wie dort beschrieben, in der Ausbildung des Hybridlayers. Wenn keine ausreichende Haftung zwischen Zahnhartsubstanz und Komposit hergestellt werden kann, kommt es zu Rissen innerhalb der Adhäsionszone und damit zum Herausbrechen von Restaurationsanteilen. Nach Versagen des Haftverbundes werden die verbleibenden

Zahnhartsubstanzanteile nicht mehr miteinander verbunden und stabilisiert. Dadurch ergibt sich die herabgesetzte Frakturresistenz des gesamten Zahnes.

Neben Adhäsivsystemen können die Eigenschaften von selektiv exkavierten Zähnen durch das Verwenden unterschiedlicher Komposite beeinflusst werden. Das verwendete glasfaserverstärkte Komposit soll eine höhere Frakturresistenz, eine höhere Biegefestigkeit und eine geringere Schrumpfung besitzen als konventionelle Hybridkomposite (45, 46). Die Glasfaserelemente verhindern in Kombination mit der Kompositmatrix die Ausbreitung von Rissen innerhalb der Restauration und verbessern die mechanischen Eigenschaften des Komposites (45). Aus diesen Gründen könnte ein solches Komposit vorteilhafter für die Restauration von Zähnen mit verbleibendem kariösem Dentin sein. Die in unseren Versuchen festgestellten höheren Frakturresistenzen bei Zähnen, welche mit EverX restauriert wurden, bestärken diese Annahme zur Stabilisierung des Zahnes durch die Glasfaserelemente. Es ist zu erwarten, dass die beobachteten Vorteile von glasfaserverstärkten Kompositen im Vergleich mit konventionellen Kompositen bei Molaren noch stärker ausgeprägt sind als bei Prämolaren, da sie sich sowohl die mechanischen Eigenschaften (68) als auch die Lokalisation von kariösen Läsionen unterscheiden. Molaren weisen häufig kariöse Läsionen in den Fissuren auf (69), was bedeutet, dass nach selektiver Exkavation demineralisiertes Dentin senkrecht zu auftretenden Kaukräften zurückbleibt. Ebenso wurde berichtet, dass konventionelle Komposite im Bereich des weicheren kariösen Dentins brechen, wenn die Kraft senkrecht auf die Läsion einwirkt (44). Bei Prämolaren hingegen befinden sich die kariösen Läsionen häufig an den Approximalflächen (70), so wie es in dieser Studie simuliert wurde. Das verbleibende demineralisierte Dentin ist somit nicht verantwortlich für die Unterstützung der Restauration, sondern für die Adhäsion der approximalen Kästen. Daraus folgt, dass unsere Ergebnisse nicht auf andere Zähne mit Läsionen an anderen Flächen übertragen werden können und somit auch nicht mit Studien dieser Art verglichen werden können. Für jede Zahnart sind eigene Untersuchungen durchzuführen.

In Bezug auf den Frakturmodus kann die getroffene Nullhypothese angenommen werden. Der Frakturmodus wurde weder durch das verwendete Dentinadhäsivsystem noch durch das verwendete Restaurationsmaterial signifikant beeinflusst. Somit führte die veränderte Rissausbildung und die höhere Stabilität des Komposites nicht dazu, dass weniger Einbrüche innerhalb der Restauration auftraten, und stattdessen vermehrt fatale Frakturen innerhalb der Zahnhartsubstanz festgestellt werden konnten. Der Anteil

an Längsfrakturen und schräg subgingival verlaufenden Frakturen, welche nicht konservierend versorgt werden können (48), war bei Zähnen, die mit EverX restauriert wurden, nicht signifikant geringer als nach Restauration mit konventionellen Hybridkompositen wie Filtek Z250. Es konnte ebenfalls kein Unterschied zwischen den zur Restauration verwendeten Adhäsivsystemen festgestellt werden. Die Tatsache, dass keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten, könnte jedoch auch durch eine zu geringe Probenanzahl bedingt sein.

5.4 Höckerdehnung

Der Versuchsaufbau für die Frakturresistenztestung wurde zur Untersuchung der Höckerdehnung um vestibulär und palatinal auf Höhe des Äquators positionierte Messuhren erweitert. Ziel dieser Analyse war es herauszufinden, ob eine verbesserte Haftung der unterschiedlichen Dentinadhäsivsysteme oder die Restauration mit einem glasfaserverstärkten Komposit Auswirkungen auf den vestibulo-oralen Durchmesser der Proben unter Belastung hat. Bei einer Belastung von 200 N und 400 N wurde die Höckerdehnung gemessen. Diese Methode hat sich zur Messung der bei der Polymerisation von Kompositen entstehenden Schrumpfung als bewährt erwiesen (71-73). Im hier verwendeten Versuchsaufbau stellte es sich jedoch als sehr techniksensitive Methode dar, da es zum einen zu einer Intrusion des gesamten Zahnes mit Verschiebung der Messuhren entlang der Vestibulär- und Palatinalfläche möglich war und zum anderen die exakte Positionierung der Messuhren nur eingeschränkt reproduzierbar war. Als Folge kam es möglicherweise zu einer Verfälschung der Ergebnisse mit zu geringen Höckerdehnungswerten. Eine Verfälschung der Ergebnisse ist auch durch Risse innerhalb des Zahnes oder der Restauration, bevor es zur vollständigen Fraktur des Zahnes kommt, möglich. Hieraus können zu große Höckerdehnungswerte resultieren.

Die Höckerdehnung wurde bei einer Belastung von 200 N signifikant durch das Adhäsivsystem beeinflusst. Daraus lässt sich ableiten, dass der Verbund zwischen Zahnhartsubstanz und Komposit, welcher durch das Adhäsivsystem hergestellt wird, entscheidenden Einfluss auf die Verformbarkeit des Zahnes hat. In Bezug auf das verwendete Adhäsivsystem lässt sich die gleiche Abstufung feststellen, welche sich bei der Frakturresistenztestung gezeigt hat. Zähne, die mit OptiBond FL restauriert wurden,

wiesen eine signifikant geringere Höckerdehnung auf und waren somit belastbarer. Die Begründung liegt, wie oben beschrieben, in der Ausbildung des Hybridlayers und der so entstehenden Haftung. Im Gegensatz dazu war bei 400 N kein signifikanter Einfluss durch das verwendete Adhäsivsystem festzustellen. In vorherigen Studien konnte ebenfalls kein Unterschied zwischen dem verwendeten selbstätzenden Primer und der Etch-and-Rinse-Technik festgestellt werden (38). In der genannten Studie wurde jedoch ein anderes Verfahren benutzt, um die Stärke des Haftverbundes zu messen (Mikrotensile Bindungsstärke (74)). Es gibt jedoch auch Studien, in welchen die Etch-and-Rinse-Adhäsivsysteme signifikant bessere Werte aufwiesen als die selbstätzenden Systeme (57, 75) und diese wiederum bessere als die Non-Rinse-Systeme (76, 77). Aufgrund unserer Ergebnisse könnte man schließen, dass die zusätzliche Stabilisierung der Zähne durch das genutzte Adhäsivsystem nur bei geringeren Belastungen stattfindet und bei Belastungen von 400 N und mehr nicht mehr festzustellen ist. Durch die methodischen Einschränkungen der Höckerdehnungsanalyse kann dies jedoch auch durch eine Verfälschung der Ergebnisse bedingt sein.

Bei statischer Belastung spiegelten sich Unterschiede in der Höckerdehnung nur zu einem gewissen Grad in den Ergebnissen der Frakturresistenztestung und der Randintegrität wieder. Da dies auch in vorherigen Studien festgestellt wurde (48), scheint die Messung der Höckerdehnung für die vorliegende Fragestellung nicht zielführend zu sein. Um über die gemessene Höckerdehnung eine relevante Aussage treffen zu können, wären genauere Messverfahren notwendig, welche äußere Faktoren wie Verschiebungen durch den auftreffenden Druck, mitberücksichtigen. Um diese Probleme zu vermeiden, sind finite Elemente oder interferometrische Analysen mögliche Methoden.

5.5 Mögliche Einschränkungen durch den allgemeinen Versuchsaufbau

Zur Durchführung des Versuches wurde ein standardisiertes Modell verwendet, welches im Vergleich zu einer klinischen Studie verschiedene Einschränkungen aufweist. Es wurde jedoch bewusst ausgewählt, um vergleichbare standardisierte Kavitäten und kariöse Läsionen an den untersuchten Zähnen zu erzielen und somit für alle Gruppen eine vergleichbare Ausgangsposition zu erreichen. Als Auswahlkriterien für die verwendeten Prämolaren galten Karies- und Füllungsfreiheit. Dieser Zustand der Zähne spricht dafür, dass es sich um Zähne jüngerer Patienten handelt. Durch

mögliche Unterschiede in der Mikro- und Makromorphologie sowie der Gruppengröße kann es zu Varianzen innerhalb der Gruppen gekommen sein.

Die extrahierten Prämolaren wurden bis zu ihrer Verwendung in 0,5-prozentiger Chloramin-Lösung gelagert. Diese zeichnet sich durch eine gute Abspaltbarkeit des Chlors aus und kann als gutes und handhabungssicheres Desinfektions- und Bleichmittel bezeichnet werden. Bei Kontakt mit infiziertem Gewebe bewirkt sie eine Keimreduktion. Die Lagerung in Chloramin-Lösung hat keinen Einfluss auf das Adhäsionsverhalten von Komposit. Sie wird sogar als vergleichbar mit der Verwendung frisch extrahierter Zähne beschrieben. (78)

Zur besseren Handhabung wurden die Zähne mit Hilfe von Akrylharz in ein Stahlrohr eingebettet. Durch dieses Vorgehen verloren die Proben die natürliche Eigenbeweglichkeit, die sie im Patientenmund aufweisen. Zur Kavitätenpräparation wurde zunächst eine Idealpräparation angefertigt und anschließend mit Hilfe eines Kopierschleifsystems auf alle Probenzähne übertragen. Durch die Vermessung der Zahngrößen war dies problemlos möglich. Die angefertigte Idealpräparation wies leicht untersichgehende Kavitätenwände auf, um eine defektorientierte Präparation im klinischen Bereich zu simulieren. Dennoch wäre die klinische Präparation defektorientierter und variabel in ihrer Ausdehnung.

Mit Hilfe der angefertigten transversalen Mikroradiographien konnte gezeigt werden, dass der durchschnittliche Mineralgehalt und die Läsionstiefe sich zwischen den Gruppen nicht signifikant unterschieden. Die erzeugten kariösen Läsionen sind natürlichen kariösen Läsionen in Bezug auf Mineralgehalt und mechanische Eigenschaften nachempfunden (69). Es kann vorausgesetzt werden, dass die Haftkraft nicht signifikant anders ist als die Haftkraft zu natürlichen kariösen Läsionen (79). Der Aufbau des kariös veränderten Dentins in den verschiedenen Zonen der klinischen kariösen Läsion unterscheidet sich, woraus verschiedene Haftkräfte resultieren könnten. Ob infiziertes, demineralisiertes, inkohärentes oder desorganisiertes Dentin unterhalb der Restauration belassen wird, könnte somit Einfluss auf die Stärke des Haftverbundes haben (35). Ein weiterer Vergleich zwischen Zähnen mit Restaurationen, unter denen lediglich demineralisiertes oder auch bakteriell kontaminiertes Dentin belassen wurde, könnte weiteren Aufschluss geben, inwiefern die Menge an kariösem Dentin unterhalb der Restauration die Integrität und Verlässlichkeit der Restauration beeinflusst. Ein Unterschied zwischen dem Versuchsaufbau und dem Vorgehen in der Praxis ist die fehlende Exkavation. Dies kann ebenfalls zu veränderten

Adhäsionseigenschaften und einer eingeschränkten Übertragbarkeit der Ergebnisse auf klinische Situationen führen.

Die perfekte Ausarbeitung der Füllungsänder im Approximalbereich, welche benötigt wurde um die Analyse der Randqualitäten durchzuführen, ist ein weiterer Unterschied zum klinischen Ablauf. Hieraus ergeben sich mögliche Unterschiede in der Mikroleakageentstehung und der Randqualitäten in diesem Bereich.

Nach der Restauration mit den drei unterschiedlichen Adhäsivsystemen (OptiBond FL, Clearfil SE Bond, G-aenial Bond) und den zwei unterschiedlichen Kompositmaterialien (Filtek Z250, EverX) wurden die Zähne im Kausimulator mit einer Belastung von 5 kg und einer Abgleitbewegung von palatinal nach mesio-zentral belastet, um die während der Mastikation auftretenden Kräfte möglichst naturgetreu nachzustellen. Um eine Alterung von ca. fünf Jahren zu simulieren wurden die Proben im Kausimulator mit $1,2 \times 10^6$ Kauzyklen belastet, da in klinischen Studien geschätzt wird, dass pro Jahr ca. 250.000 Kauzyklen stattfinden (80, 81). Im Kausimulator werden Parafunktionen wie z.B. Bruxismus nicht simuliert. Diese stellen jedoch eine hohe Belastung der Zähne im Patientenmund dar. Durch die Aufnahme von heißen und kalten Nahrungsmitteln entstehen im Mund eines Patienten Temperaturschwankungen, die in einem Bereich zwischen 5 °C und 55 °C liegen. Um dies zu simulieren wurden die Proben 10.000 Thermowechselbelastungszyklen unterworfen. Durch den ständigen Wechsel von heiß und kalt und die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Restaurationsmaterial und Zahnhartsubstanz können Spannungen an der Grenze zwischen Zahn und Restauration entstehen. Hieraus könnten Haftverluste im Randbereich resultieren, woraus Randspalten entstehen könnten und somit eine Bildung von Sekundärkaries ermöglicht wird (82). Es konnte gezeigt werden, dass Unterschiede zwischen Adhäsivsystemen nur direkt nach dem Restaurieren vorhanden waren und nach einer Alterung nicht mehr festzustellen waren (40). Aus diesem Grund scheint die künstliche Alterung notwendig, um klinisch relevante Daten zu gewinnen.

6. Schlussfolgerungen

Die erste Nullhypothese kann in Bezug auf das verwendete Adhäsivsystem widerlegt werden. Der Anteil an akzeptablen Restaurationsrändern wurde signifikant durch das verwendete Dentinadhäsivsystem beeinflusst unabhängig davon, ob sich die Restaurationsränder im Schmelz oder Dentin befanden. Weder das verwendete Restaurationsmaterial noch die Kombination von Restaurationsmaterial und Adhäsivsystem wirkte sich signifikant auf die Randqualität aus. Somit kann die erste Nullhypothese in Bezug auf das Restaurationsmaterial angenommen werden. Unabhängig vom verwendeten Dentinadhäsivsystem und dem verwendeten Restaurationsmaterial wiesen Restaurationsränder im Dentin eine signifikant höhere Mikroleakage auf als im Schmelz befindliche Restaurationsränder. Daraus folgt, dass Adhäsivsysteme, die einen guten Verbund zu vollständig exkavierten Zähnen herstellen, auch für den Einsatz nach selektiver Exkavation geeignet sind.

In Bezug auf die Frakturresistenz kann die zweite Nullhypothese widerlegt, in Bezug auf den Frakturmodus hingegen angenommen werden. Es konnte eine erhöhte Frakturresistenz in Abhängigkeit vom Dentinadhäsivsystem und vom Restaurationsmaterial festgestellt werden. Mehr-Schritt-Adhäsivsysteme und glasfaserverstärkte Komposite erhöhen die Frakturresistenz selektiv exkavierter Zähne.

Weder das Adhäsivsystem noch das Restaurationsmaterial hatten signifikanten Einfluss auf den Frakturmodus. Daraus folgt, dass Zähne, die selektiv exkaviert wurden, nicht notwendigerweise einer besonderen restaurativen Strategie bedürfen. Die Höckerdehnung wurde nur bei geringer Belastung durch das verwendete Adhäsivsystem beeinflusst. Das Restaurationsmaterial hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Höckerdehnung. Die Analyse der Höckerdehnung stellte sich jedoch als sehr techniksensitives Verfahren heraus.

Auch wenn die Ergebnisse nicht uneingeschränkt auf die klinische Situation übertragbar sind, liefern sie Hinweise für die Restauration selektiv exkavierter Zähne. Klinische Studien zur Überprüfung unserer Ergebnisse wären wünschenswert.

7. Literaturverzeichnis

1. Schwendicke F, Kern M, Doerfer C, Kleemann-Luepkes J, Paris S, Blunck U. Influence of using different bonding systems and composites on the margin integrity and the mechanical properties of selectively excavated teeth in vitro. *J Dent.* 2015;43(3):327-34.
2. Van Meerbeek B, Peumans M, Poitevin A, Mine A, Van Ende A, Neves A, De Munck J. Relationship between bond-strength tests and clinical outcomes. *Dent Mater.* 2010;26(2):100-21.
3. Keyes PH. The infectious and transmissible nature of experimental dental caries. Findings and implications. *Arch Oral Biol.* 1960;1:304-20.
4. Marsh PD. Dental plaque as a biofilm and a microbial community - implications for health and disease. *BMC Oral health.* 2006;6 Suppl 1:14.
5. Paris S, Meyer-Lueckel H. Paradigmenwechsel. In: Meyer-Lückel H, Paris S, Ekstrand KR, Alkilzy M, Effenberger S, Lackner C, editors. *Karies Wissenschaft und klinische Praxis Stuttgart [u.a.]: Thieme; 2012.* p. 71-5.
6. Schwendicke F, Paris S. Kariesexkavation: Ein systematischer Überblick. *Dtsch Zahnärztl Z.* 2014;69(8):456-66.
7. Buonocore M. Adhesive sealing of pits and fissures for caries prevention, with use of ultraviolet light. *J Am Dent Assoc.* 1970;80(2):324-30.
8. Handleman SL, Buonocore MG, Schoute PC. Progress report on the effect of a fissure sealant on bacteria in dental caries. *J Am Dent Assoc.* 1973;87(6):1189-91.
9. Paris S, Meyer-Lueckel H. Inhibition of caries progression by resin infiltration in situ. *Caries Res.* 2010;44(1):47-54.
10. Paris S, Meyer-Lueckel H, Kielbassa AM. Resin infiltration of natural caries lesions. *J Dent Res.* 2007;86(7):662-6.
11. Meyer-Lueckel H, Paris S. Progression of artificial enamel caries lesions after infiltration with experimental light curing resins. *Caries Res.* 2008;42(2):117-24.
12. Schwendicke F. Exkavation-Wie viel Kariesfreiheit muss sein? *Dtsch Zahnärztl Z.* 2015;70(2):89-97.
13. Ogawa K, Yamashita Y, Ichijo T, Fusayama T. The ultrastructure and hardness of the transparent layer of human carious dentin. *J Dent Res.* 1983;62(1):7-10.

14. Schwendicke F. Selektive Kariesentfernung: Evidenz und Praxis - Chancen und Hürden [Habilitationsschrift]. Berlin: Medizinische Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin; 2015.
15. Schwendicke F, Paris S, Tu YK. Effects of using different criteria for caries removal: a systematic review and network meta-analysis. *J Dent*. 2015;43(1):1-15.
16. Lager A, Thornqvist E, Ericson D. Cultivable bacteria in dentine after caries excavation using rose-bur or carisolv. *Caries Res*. 2003;37(3):206-11.
17. Ricketts D, Lamont T, Innes NP, Kidd E, Clarkson JE. Operative caries management in adults and children. *Cochrane Db Syst Rev*. 2013;3:Cd003808.
18. Leksell E, Ridell K, Cvek M, Mejare I. Pulp exposure after stepwise versus direct complete excavation of deep carious lesions in young posterior permanent teeth. *Endod Dent Traumatol*. 1996;12(4):192-6.
19. Schwendicke F, Meyer-Lueckel H, Doerfer C, Paris S. Attitudes and behaviour regarding deep dentin caries removal: a survey among German dentists. *Caries Res*. 2013;47(6):566-73.
20. Aguilar P, Linsuwanont P. Vital pulp therapy in vital permanent teeth with cariously exposed pulp: a systematic review. *J Endod*. 2011;37(5):581-7.
21. Schwendicke F, Stolpe M. Direct pulp capping after a carious exposure versus root canal treatment: a cost-effectiveness analysis. *J Endod*. 2014;40(11):1764-70.
22. Schwendicke F, Stolpe M, Meyer-Lueckel H, Paris S, Doerfer CE. Cost-effectiveness of one- and two-step incomplete and complete excavations. *J Dent Res*. 2013;92(10):880-7.
23. Bjorndal L, Larsen T. Changes in the cultivable flora in deep carious lesions following a stepwise excavation procedure. *Caries Res*. 2000;34(6):502-8.
24. Alves LS, Fontanella V, Damo AC, Ferreira de Oliveira E, Maltz M. Qualitative and quantitative radiographic assessment of sealed carious dentin: a 10-year prospective study. *Oral Surg, Oral Med, Oral Pathol, Oral Radiol, Endod*. 2010;109(1):135-41.
25. Bjorndal L, Larsen T, Thylstrup A. A clinical and microbiological study of deep carious lesions during stepwise excavation using long treatment intervals. *Caries Res*. 1997;31(6):411-7.
26. Maltz M, Henz SL, de Oliveira EF, Jardim JJ. Conventional caries removal and sealed caries in permanent teeth: a microbiological evaluation. *J Dent*. 2012;40(9):776-82.

27. Maltz M, Garcia R, Jardim JJ, de Paula LM, Yamaguti PM, Moura MS, Garcia F, Nascimento C, Oliveira A, Mestrinho HD. Randomized trial of partial vs. stepwise caries removal: 3-year follow-up. *J Dent Res.* 2012;91(11):1026-31.
28. Schwendicke F, Doerfer CE, Paris S. Incomplete caries removal: a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res.* 2013;92(4):306-14.
29. Thompson V, Craig RG, Curro FA, Green WS, Ship JA. Treatment of deep carious lesions by complete excavation or partial removal: a critical review. *J Am Dent Assoc.* 2008;139(6):705-12.
30. Kidd EA. How 'clean' must a cavity be before restoration? *Caries Res.* 2004;38(3):305-13.
31. Ricketts D. Management of the deep carious lesion and the vital pulp dentine complex. *Br Dent J.* 2001;191(11):606-10.
32. Langeland K, Langeland LK. Indirect capping and the treatment of deep carious lesions. *Int Dent J.* 1968;18(2):326-80.
33. Maltz M, Alves LS, Jardim JJ, Moura Mdos S, de Oliveira EF. Incomplete caries removal in deep lesions: a 10-year prospective study. *Am J Dent.* 2011;24(4):211-4.
34. Van Meerbeek B, Yoshida Y. Karies. Wissenschaft und klinische Praxis. In: Meyer-Lückel H, Paris S, Ekstrand KR, Alkilzy M, Effenberger S, Lackner C, editors. *ZMK Praxis.* Stuttgart [u.a.]: Thieme; 2012. p. 231-48.
35. Mertz-Fairhurst EJ, Curtis JW, Jr., Ergle JW, Rueggeberg FA, Adair SM. Ultraconservative and cariostatic sealed restorations: results at year 10. *J Am Dent Assoc.* 1998;129(1):55-66.
36. Van Meerbeek B, De Munck J, Yoshida Y, Inoue S, Vargas M, Vijay P, Van Landuyt K, Lambrechts P, Vanherle G. Buonocore memorial lecture. Adhesion to enamel and dentin: current status and future challenges. *Oper Dent.* 2003;28(3):215-35.
37. Yoshiyama M, Tay FR, Torii Y, Nishitani Y, Doi J, Itou K, Ciucchi B, Pashley DH. Resin adhesion to carious dentin. *Am J Dent.* 2003;16(1):47-52.
38. Yoshiyama M, Tay FR, Doi J, Nishitani Y, Yamada T, Itou K, Carvalho RM, Nakajima M, Pashley DH. Bonding of self-etch and total-etch adhesives to carious dentin. *J dent Res.* 2002;81(8):556-60.
39. Nakajima M, Sano H, Burrow MF, Tagami J, Yoshiyama M, Ebisu S, Ciucchi B, Russell CM, Pashley DH. Tensile bond strength and SEM evaluation of caries-affected dentin using dentin adhesives. *J Dent Res.* 1995;74(10):1679-88.

40. Perdigao J. Dentin bonding-variables related to the clinical situation and the substrate treatment. *Dent Mater.* 2010;26(2):24-37.
41. Daculsi G, LeGeros RZ, Jean A, Kerebel B. Possible physico-chemical processes in human dentin caries. *J Dent Res.* 1987;66(8):1356-9.
42. Hevinga MA, Opdam NJ, Frencken JE, Bronkhorst EM, Truin GJ. Microleakage and sealant penetration in contaminated carious fissures. *J Dent.* 2007;35(12):909-14.
43. Mine A, De Munck J, Cardoso MV, Van Landuyt KL, Poitevin A, Van Ende A, Matsumoto M, Yoshida Y, Kuboki T, Yatani H, Van Meerbeek B. Dentin-smear remains at self-etch adhesive interface. *Dent Mater.* 2014;30(10):1147-53.
44. Hevinga MA, Opdam NJ, Frencken JE, Truin GJ, Huysmans MC. Does incomplete caries removal reduce strength of restored teeth? *J Dent Res.* 2010;89(11):1270-5.
45. Garoushi S, Sailyoja E, Vallittu PK, Lassila L. Physical properties and depth of cure of a new short fiber reinforced composite. *Dent Mater.* 2013;29(8):835-41.
46. Goracci C, Cadenaro M, Fontanive L, Giangrosso G, Juloski J, Vichi A, Ferrari M. Polymerization efficiency and flexural strength of low-stress restorative composites. *Dent Mater.* 2014;30(6):688-94.
47. Tezvergil A, Lassila LV, Vallittu PK. The shear bond strength of bidirectional and random-oriented fibre-reinforced composite to tooth structure. *J Dent.* 2005;33(6):509-16.
48. Schwendicke F, Kern M, Meyer-Lueckel H, Boels A, Doerfer C, Paris S. Fracture resistance and cuspal deflection of incompletely excavated teeth. *J Dent.* 2014;42(2):107-13.
49. Buskes JA, Christoffersen J, Arends J. Lesion formation and lesion remineralization in enamel under constant composition conditions. A new technique with applications. *Caries Res.* 1985;19(6):490-6.
50. Roulet JF, Reich T, Blunck U, Noack M. Quantitative margin analysis in the scanning electron microscope. *Scanning microscopy.* 1989;3(1):147-59.
51. Henisch G. Ein computergestütztes System zur Erfassung und Verwaltung von Messdaten im Rahmen der quantitativen Randanalyse am Rasterelektronenmikroskop [Dissertation]. Berlin: Medizinische Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin; 1989.
52. Blunck U. [SEM evaluation of the margins of composite fillings in dentin in vitro]. *Dtsch Zahnärztl Z.* 1988;43(8):939-43.

53. de Almeida Neves A, Coutinho E, Cardoso MV, Lambrechts P, Van Meerbeek B. Current concepts and techniques for caries excavation and adhesion to residual dentin. *J Adhes Dent*. 2011;13(1):7-22.
54. Marshall GW, Habelitz S, Gallagher R, Balooch M, Balooch G, Marshall SJ. Nanomechanical properties of hydrated carious human dentin. *J Dent Res*. 2001;80(8):1768-71.
55. Wang Y, Spencer P, Walker MP. Chemical profile of adhesive/caries-affected dentin interfaces using Raman microspectroscopy. *J Biomed Mater Res*. 2007;81(2):279-86.
56. Nakajima M, Sano H, Zheng L, Tagami J, Pashley DH. Effect of moist vs. dry bonding to normal vs. caries-affected dentin with Scotchbond Multi-Purpose Plus. *J Dent Res*. 1999;78(7):1298-303.
57. Wei S, Sadr A, Shimada Y, Tagami J. Effect of caries-affected dentin hardness on the shear bond strength of current adhesives. *J Adhes Dent*. 2008;10(6):431-40.
58. Schwendicke F, Kern M, Blunck U, Doerfer C, Drenck J, Paris S. Marginal integrity and secondary caries of selectively excavated teeth in vitro. *J Dent*. 2014;42(10):1261-8.
59. Garcia-Godoy F, Kraemer N, Feilzer AJ, Frankenberger R. Long-term degradation of enamel and dentin bonds: 6-year results in vitro vs. in vivo. *Dent Mater*. 2010;26(11):1113-8.
60. Grundy JR. An intra-oral replica technique for use with the scanning electron microscope. *Br Dent J*. 1971;130(3):113-7.
61. Peumans M, Kanumilli P, De Munck J, Van Landuyt K, Lambrechts P, Van Meerbeek B. Clinical effectiveness of contemporary adhesives: a systematic review of current clinical trials. *Dent Mater*. 2005;21(9):864-81.
62. Blunck U, Zaslansky P. Enamel margin integrity of Class I one-bottle all-in-one adhesives-based restorations. *J Adhes Dent*. 2011;13(1):23-9.
63. Nakajima M, Hosaka K, Yamauti M, Foxton RM, Tagami J. Bonding durability of a self-etching primer system to normal and caries-affected dentin under hydrostatic pulpal pressure in vitro. *Am J Dent*. 2006;19(3):147-50.
64. Brunton PA, Cattell P, Burke FJ, Wilson NH. Fracture resistance of teeth restored with onlays of three contemporary tooth-colored resin-bonded restorative materials. *J Prosthet Dent*. 1999;82(2):167-71.

65. Esquivel-Upshaw JF, Anusavice KJ, Yang MC, Lee RB. Fracture resistance of all-ceramic and metal-ceramic inlays. *Int J Prosthodont*. 2001;14(2):109-14.
66. Heydecke G, Butz F, Strub JR. Fracture strength and survival rate of endodontically treated maxillary incisors with approximal cavities after restoration with different post and core systems: an in-vitro study. *J Dent*. 2001;29(6):427-33.
67. Murray PE, Windsor LJ, Smyth TW, Hafez AA, Cox CF. Analysis of pulpal reactions to restorative procedures, materials, pulp capping, and future therapies. *Crit Rev Oral Biol Med*. 2002;13(6):509-20.
68. Takahashi N, Kitagami T, Komori T. Behaviour of teeth under various loading conditions with finite element method. *J Oral Rehabil*. 1980;7(6):453-61.
69. Schwendicke F, Eggers K, Meyer-Lueckel H, Doerfer C, Kovalev A, Gorb S, Paris S. In vitro Induction of residual caries lesions in dentin: comparative mineral loss and nano-hardness analysis. *Caries Res*. 2015;49(3):259-65.
70. Mejare I, Kallest I C, Stenlund H. Incidence and progression of approximal caries from 11 to 22 years of age in Sweden: A prospective radiographic study. *Caries Res*. 1999;33(2):93-100.
71. Kim ME, Park SH. Comparison of premolar cuspal deflection in bulk or in incremental composite restoration methods. *Oper Dent*. 2011;36(3):326-34.
72. Fleming GJ, Hall DP, Shortall AC, Burke FJ. Cuspal movement and microleakage in premolar teeth restored with posterior filling materials of varying reported volumetric shrinkage values. *J Dent*. 2005;33(2):139-46.
73. Kwon Y, Ferracane J, Lee IB. Effect of layering methods, composite type, and flowable liner on the polymerization shrinkage stress of light cured composites. *Dent Mater*. 2012;28(7):801-9.
74. Sano H, Shono T, Sonoda H, Takatsu T, Ciucchi B, Carvalho R, Pashley DH. Relationship between surface area for adhesion and tensile bond strength-evaluation of a micro-tensile bond test. *Dent Mater*. 1994;10(4):236-40.
75. De Munck J, Van Landuyt K, Peumans M, Poitevin A, Lambrechts P, Braem M, Van Meerbeek B. A critical review of the durability of adhesion to tooth tissue: methods and results. *J Dent Res*. 2005;84(2):118-32.
76. Sadr A, Ghasemi A, Shimada Y, Tagami J. Effects of storage time and temperature on the properties of two self-etching systems. *J Dent*. 2007;35(3):218-25.

77. Inoue S, Koshiro K, Yoshida Y, De Munck J, Nagakane K, Suzuki K, Sano H, Van Meerbeek B. Hydrolytic stability of self-etch adhesives bonded to dentin. *J Dent Res*. 2005;84(12):1160-4.
78. Haller B, Hofmann N, Klaiber B, Bloching U. Effect of storage media on microleakage of five dentin bonding agents. *Dent Mater*. 1993;9(3):191-7.
79. Joves GJ, Inoue G, Nakashima S, Sadr A, Nikaido T, Tagami J. Mineral density, morphology and bond strength of natural versus artificial caries-affected dentin. *Dent Mater J*. 2013;32(1):138-43.
80. DeLong R, Pintado M, Douglas WH. Measurement of change in surface contour by computer graphics. *Dent Mater*. 1985;1(1):27-30.
81. Sakaguchi RL, Douglas WH, DeLong R, Pintado MR. The wear of a posterior composite in an artificial mouth: a clinical correlation. *Dent Mater*. 1986;2(6):235-40.
82. Bullard RH, Leinfelder KF, Russell CM. Effect of coefficient of thermal expansion on microleakage. *J Am Dent Assoc*. 1988;116(7):871-4.

8. Eidesstattliche Versicherung

Ich, Julia Kleemann-Lüpkes, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Einfluss von Adhäsivsystem und Restaurationsmaterial auf die mechanischen Eigenschaften selektiv exkavierter Zähne“, selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung (siehe „Uniform Requirements for Manuscripts (URM)“ des ICMJE -www.icmje.org) kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem/der Betreuer/in, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

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

Datum

Unterschrift

Anteilerklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Julia Kleemann-Lüpkes hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1: F. Schwendicke, M. Kern, C. Dörfer, J. Kleemann-Lüpkes, S. Paris, U. Blunck, Influence of using different bonding systems and composites on the margin integrity and mechanical properties of selectively excavated teeth in vitro, Journal of Dentistry, 2015.

Beitrag im Einzelnen:

Mitentwicklung und Durchführung des Versuchsablaufes

Auswertung der Ergebnisse

Mitarbeit an der Erstellung des Papers

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift der Doktorandin

9. Lebenslauf

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

10. Publikationsliste

Publikation 1: F. Schwendicke, M. Kern, C. Dörfer, J. Kleemann-Lüpkes, S. Paris, U. Blunck, Influence of using different bonding systems and composites on the margin integrity and mechanical properties of selectively excavated teeth in vitro, Journal of Dentistry, 2015.

11. Danksagung

Mein besonderer Dank gilt PD Dr. Falk Schwendicke und Prof. Dr. Sebastian Paris für die Überlassung des interessanten Themas. Außerdem möchte ich Herrn Falk Schwendicke für die kompetente und freundliche Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung dieser Arbeit danken. Des Weiteren bedanke ich mich bei der gesamten Abteilung für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin der Charité (Universitätsmedizin Berlin) und insbesondere bei Herrn Dr. Uwe Blunck für die fachkundige Unterstützung bei der Rasterelektronenmikroskopie.

Herrn Prof. Dr. Christof Dörfer als Leiter der Abteilung für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie des UKSH Kiel danke ich für die Bereitstellung der Gerätschaften und des Umfeldes zur Durchführung der Versuche. Frau Regina Marquardt danke ich ganz herzlich für die kompetente und freundliche Unterstützung bei der Vorbereitung und Anfertigung der transversalen Mikroradiographien.

Für die Bereitstellung der Geräte der Abteilung für zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffkunde des UKSH Kiel, möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Prof. Dr. Matthias Kern bedanken. Ebenso danke ich Herrn Sebastian Wille, Herrn Frank Lehmann und Herrn Rüdiger Möller für die Unterstützung bei der technischen Durchführung der Versuche.

Ein großer Dank geht an meine Kollegen und Freunde für ihre Unterstützung und Motivation. Vielen Dank: Kimberley, Bente, Annika und Gunnar.

Zu guter Letzt bedanke ich mich von ganzem Herzen bei meiner Familie und meinem Freund, Jann-Marten, dafür dass sie immer für mich da waren und mich auch in schwierigen Situationen motiviert haben.