

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

DISSERTATION

In-vitro-Analyse der Randqualität von Kompositrestaurationen
nach non-selektiver und selektiver Kariesexkavation

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Josephine Katharina Bodi, geb. Drenck
aus Hamburg

Datum der Promotion: 01.03.2019

Vorwort

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden veröffentlicht in:
Schwendicke F, Kern M, Blunck U, Dorfer C, Drenck J, Paris S. Marginal integrity and secondary caries of selectively excavated teeth in vitro. J Dent. 2014;42(10):1261-8.

Inhaltsverzeichnis

1	ABSTRACT	5
1.1	ABSTRACT (ENGLISH)	5
1.2	ABSTRACT (DEUTSCH)	6
2	EINLEITUNG	8
2.1	AUFBAU GESUNDER ZAHNHARTSUBSTANZ	8
2.1.1	DER ZAHNSCHMELZ	8
2.1.2	DAS DENTIN	8
2.1.3	DIE PULPA	8
2.2	KARIES	9
2.2.1	ÄTIOLOGIE	9
2.2.2	DEMINERALISATION DER ZAHNHARTSUBSTANZ	9
2.2.3	HISTOLOGIE DER DENTINKARIES	10
2.3	THERAPIE DER KARIES	11
2.3.1	PRÄVENTION, NON-INVASIVE UND MIKRO-INVASIVE THERAPIE	11
2.3.2	INVASIVE KARIESTHERAPIE	12
2.4	KARIESENTFERNUNG	12
2.4.1	NON-SELEKTIVE KARIESENTFERNUNG	12
2.4.2	SCHRITTWEISE KARIESENTFERNUNG	13
2.4.3	SELEKTIVE KARIESENTFERNUNG	13
2.5	KOMPOSITRESTAURATION	14
2.5.1	ALLGEMEINES	14
2.5.2	ZUSAMMENSETZUNG VON KOMPOSIT	14
2.5.3	ADHÄSIVTECHNIK	14
2.5.4	AUSWIRKUNGEN VON RESIDUALKARIES AUF DIE RESTAURATION	15
2.6	TECHNIKEN DER RESTAURATIONSANALYSE	16
2.6.1	ALLGEMEINES	16
2.6.2	FARBSTOFFPENETRATION	17
2.6.3	RASTERELEKTRONENMIKROSKOPIE	17
2.6.4	TRANSVERSALE MIKRORADIOGRAPHIE	17
3	ZIELE DER ARBEIT	19
4	MATERIAL UND METHODEN	20
4.1	AUSWAHL DER ZÄHNE UND VORBEREITUNG	21

4.2	PRÄPARATION	22
4.3	ERZEUGUNG KÜNSTLICHER KARIESLÄSIONEN	23
4.4	EXKAVATION UND RESTAURATION DER ZÄHNE	24
4.5	KÜNSTLICHE ALTERUNG	25
4.6	RANDSPALTENANALYSE	26
4.7	FARBSTOFFPENETRATIONS-VERSUCH	27
4.8	ERZEUGUNG VON KÜNSTLICHER SEKUNDÄRKARIES	28
4.9	AUSWERTUNG DES FARBSTOFFPENETRATIONS-VERSUCHS	29
4.10	TRANSVERSALE MIKORADIOGRAPHISCHE AUFNAHMEN DER SEKUNDÄRKARIES	30
4.11	STATISTISCHE AUSWERTUNG	31
5	ERGEBNISSE	32
5.1	RANDSPALTENANALYSE	32
5.2	FARBSTOFFPENETRATIONS-VERSUCH AUSWERTUNG	33
5.3	MIKORADIOGRAPHISCHE AUSWERTUNG DER SEKUNDÄRKARIES	34
6	DISKUSSION	35
6.1	DISKUSSION DER METHODEN	35
6.1.1	AUSWAHL DER ZÄHNE UND VORBEREITUNG	35
6.1.2	PRÄPARATION	35
6.1.3	ERZEUGUNG KÜNSTLICHER KARIESLÄSIONEN	36
6.1.4	EXKAVATION UND RESTAURATION DER ZÄHNE	36
6.1.5	KÜNSTLICHE ALTERUNG	38
6.1.6	RASTERELEKTRONENMIKROSKOPISCHE AUSWERTUNG UND FARBSTOFFPENETRATION	39
6.1.7	ERZEUGUNG KÜNSTLICHER SEKUNDÄRKARIES UND TRANSVERSALE MIKORADIOGRAPHIE	41
6.2	DISKUSSION DER ERGEBNISSE	42
6.2.1	RANDSPALTENANALYSE	42
6.2.2	FARBSTOFFPENETRATIONSVERSUCH	43
6.2.3	MIKORADIOGRAPHISCHE AUSWERTUNG	43
7	SCHLUSSFOLGERUNG	44
8	LITERATURVERZEICHNIS	44
9	LEBENS LAUF	51
10	DANKSAGUNG	52

1 Abstract

1.1 Abstract (english)

Objectives: Selective caries excavation has been shown to reduce the pulpal risk of teeth especially in cases of deep caries lesions. So far, it is still unknown whether the method of removal of caries (selective or non-selective) impacts on the margin integrity of restorations and increase the susceptibility to secondary caries. This study aimed to compare the integrity of margins after selective versus non-selective removal of caries.

Methods: Thirty-two sound human premolars received mesial-occlusal-distal cavities and were submitted to chemical demineralization to create deep and shallow artificial residual lesions on pulpo-proximal surfaces. Mesial cavity margins were located in enamel, distal ones in dentine. To simulate a non-selective excavation, artificial lesions were fully removed in one group by hand excavation. For simulation of selective excavation the other group was not excavated, but remained prior restoration. All cavities in both groups were restored with the same adhesive restoration, followed by thermo-mechanical cycling to simulate aging. Integrity of margins were assessed using scanning electron microscopy. Afterwards, half of each margin and adjacent tissue was exposed to Fuchsin dye microleakage, while the other part was challenged using a continuous-culture biofilm for secondary caries induction. Light microscopy and transversal microradiography were used to evaluate microleakage and induced secondary caries lesions.

Results: In both enamel and dentine, margin integrity and microleakage did not significantly differ between non-selectively and selectively excavated teeth ($p > 0.05$). In enamel, no secondary caries lesions were induced, while in dentine, mineral loss of secondary caries lesions did not significantly differ between non-selectively and selectively excavated teeth. The residual lesion depth had a significant impact on margin integrity and microleakage ($p \leq 0.05$; Mann-Whitney/ χ^2 -test).

Conclusion: In this study, the integrity of margins was not affected by selective or non-selective excavation. Margin location and lesion depth were relevant, though.

1.2 Abstract (deutsch)

Einleitung: Eine selektive statt non-selektive Exkavation kann insbesondere bei fortgeschrittenen kariösen Läsionen das pulpale Risiko des Zahnes vermindern. Allerdings könnte sich die selektive Exkavation der Karies negativ auf die Randqualität der anschließenden Restauration auswirken und damit das Risiko von Sekundärkaries und Mikroleakage erhöhen. Die vorliegende Studie untersuchte und verglich die Randqualität von Kompositrestaurationen nach selektiver Exkavation und non-selektiver Exkavation, die Mikroleakage dieser Restauration und die Neigung zur Sekundärkariesbildung.

Methoden: In 32 Prämolaren wurden künstlich flache und tiefe kariöse Residualläsionen auf der pulpa-axialen Wand von mesial-distal-okklusalen Kavitäten erzeugt. Mesial endete die Kavität im Schmelz, distal im Dentin. Die kariösen Läsionen wurden zur Simulation der selektiven Exkavation belassen und zur Simulation der non-selektiven Exkavation entfernt. Anschließend wurden die Kavitäten mit Komposit restauriert und durch thermo-mechanische Zyklen künstlich gealtert. Die Integrität der Restaurationsränder wurde rasterelektronenmikroskopisch untersucht. Bei der Hälfte aller Restaurationsränder wurde in einem künstlichen Mundmodell ein Biofilm erzeugt und Sekundärkaries induziert. Diese Läsionen wurden durch mikroradiographische Aufnahmen analysiert und ausgewertet. Die andere Hälfte der Restaurationsränder wurde mit Hilfe eines Farbstoffpenetrations-Versuches auf Ihre Dichtigkeit (Mikroleakage) hin untersucht.

Ergebnisse: Die Integrität von Restaurationsrändern im Schmelz unterschied sich nicht signifikant zwischen den Gruppen, die selektiv oder non-selektiv exkaviert wurden. Der bakterielle Biofilm des künstlichen Mundmodells induzierte keine kariösen Läsionen im Schmelz. Restaurationsränder, die im Dentin endeten, zeigten in Zähnen mit tiefen kariösen Residualläsionen signifikant mehr Randmängel und -spalten sowie tiefere Farbstoffpenetration als bei den flachen kariösen Läsionen ($p \leq 0,05$, Mann-Whitney / χ^2 -test). Auch im Dentin gab es jedoch keinen signifikanten Unterschied der Randintegrität oder Farbstoffpenetration zwischen non-selektiv und selektiv exkavierten Zähnen ($p > 0,05$). Auch Mineralverlust der Sekundärläsionen unterschied sich nicht signifikant zwischen den Gruppen ($p > 0,08$).

Schlussfolgerung: Die durchgeführte Studie zeigte, dass die Restaurationsrandintegrität von der Lokalisation des Restaurationsrandes und der Tiefe der Residualläsionen beeinflusst wird, nicht jedoch von der Methode der Kariesexkavation.

2 Einleitung

2.1 Aufbau gesunder Zahnhartsubstanz

2.1.1 Der Zahnschmelz

Der Zahnschmelz überzieht das Dentin im koronalen Anteil des Zahnes. Er ist die härteste Substanz des menschlichen Körpers und besteht zu 95 Gewichtsprozent aus anorganischen Substanzen, zu 4 % aus Wasser und 1 % aus organischer Matrix (4, 5). Die organische Matrix besteht überwiegend aus Lipiden (40 %), Proteinen (58 %), Spuren von Kohlenhydraten und organischen Säuren (1, 4). Der anorganische Anteil besteht hauptsächlich aus Kalziumphosphat in Form von Hydroxylapatit $[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2]$, welches prismenförmig eng aneinander gelagert ist. Das im Zahnschmelz vorkommende Wasser ist zu 75 % an das Hydroxylapatit gebunden und zu 25 % frei verfügbar (1, 5).

2.1.2 Das Dentin

Das Dentin kommt sowohl im koronalen als auch im apikalen Teil des Zahnes vor. Es wird im koronalen Anteil von Schmelz, im apikalen Anteil von Zement überzogen (6). Dentin setzt sich zu 70 % aus anorganischem Material, welches hauptsächlich aus Hydroxylapatit besteht, zusammen (4). Die kristalline Struktur ist verglichen mit der des Schmelzes viel kleiner und nicht prismenförmig angeordnet. Die organische Matrix besteht überwiegend aus Kollagenfibrillen, denen das Hydroxylapatit nadelartig anhaftet (7, 8). Die Odontoblasten liegen der Pulpenwand an. Ihre Fortsätze durchziehen die Dentintubuli, die senkrecht von der Pulpa bis zum Schmelz verlaufen. Sie sind von peritubulärem Dentin umgeben. Die Fortsätze dienen dem Stoffwechsel des Dentins und können externe Reize übertragen. Das Dentin ist somit ein vitales Gewebe (1).

2.1.3 Die Pulpa

Das Grundgewebe der Pulpa besteht aus gallertartigem Bindegewebe, in das Blutgefäße und sensible Nerven eingebettet sind (9). Die Pulpa wird durch einen einreihigen Zellsaum von Odontoblasten ausgekleidet. Diese sind nach der Geburt

teilungsunfähig, bleiben aber das ganze Leben aktiv und sind in der Lage, bei externen Reizen (z.B. Karies, Kronenpräparation) Tertiärdentin zu bilden (9, 10).

2.2 Karies

2.2.1 Ätiologie

Erste wissenschaftlich fundierte Untersuchungen zur Kariesätiologie gehen auf die **chemoparasitäre Theorie** von Miller (1892) zurück. Azidogene Mikroorganismen (Bakterien) bilden bei einem Überangebot von niedermolekularen Kohlenhydraten (Substrat) organische Säuren. Diese Säuren führen bei längerer und häufiger Einwirkzeit (Zeit) auf die Zahnhartsubstanz (Wirt) zu einer Demineralisation (11, 12).

In den darauffolgenden Jahren wurden weitere Hypothesen zur Kariesätiologie entwickelt. Bei der **spezifischen Plaquehypothese** führt das Vorhandensein spezifischer Erreger zu Karies. Im Gegensatz dazu ist bei der **unspezifischen Plaquehypothese** nicht die Bakterienqualität, sondern -menge entscheidend für die Entstehung von Karies (13). Später hat sich unter den verschiedenen Theorien zur Entstehung von Karies die **ökologische Plaquehypothese** durchgesetzt. Dabei sind in der Plaque ständig kariogene Bakterien in geringer Konzentration anzutreffen. Bei neutralem pH-Wert und wenig kariogener Substratzufuhr spielen die kariogenen Bakterien klinisch keine Rolle und es überwiegen andere Mikroorganismen wie z.B. Non-mutans-Streptokokken oder Aktinomyzeten. De- und Remineralisierung befinden sich in einem Gleichgewicht. Durch einen Anstieg der Verfügbarkeit von kariogenen Substanzen wird über die bakterielle Glykolyse mehr Säure produziert. Der pH-Wert in der Plaque fällt ab und es kommt zu einer ökologischen Verschiebung in der Plaquemikroflora. Säureproduzierende und säuretolerante Bakterien wie *Streptococcus mutans* und Laktobazillen vermehren sich. Der pH-Wert in der Plaque sinkt weiter. Das Gleichgewicht zwischen De- und Remineralisation wird in Richtung der Demineralisation verschoben (14).

2.2.2 Demineralisation der Zahnhartsubstanz

Bei einem Überangebot an Substraten (niedermolekulare Kohlenhydrate) kommt es durch die Verstoffwechslung der Substrate durch die Mikroorganismen zur Produktion organischer Säuren. Der pH-Wert sinkt in einen kritischen Bereich (<5,2-5,7), in dem sich das Hydroxylapatit aus der Zahnhartsubstanz löst

$[Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2] \rightleftharpoons 10Ca^{2+} + 6PO_4^{3-} + 2OH^-$. Die Zahnhartsubstanz demineralisiert. Wenn kein Substrat zugeführt wird, steigt der pH-Wert über den kritischen Bereich an. Hydroxylapatit entsteht erneut und kann sich wieder in die Zahnhartsubstanz einlagern. Die Zahnhartsubstanz remineralisiert. Dieser Prozess der De- und Remineralisation findet laufend statt. Verschiebt sich das Gleichgewicht über einen längeren Zeitraum zu Seiten der Demineralisation, entsteht Karies. Zudem beeinflussen weitere sekundäre Faktoren das Voranschreiten der Demineralisation wie Speichelzusammensetzung, Immunabwehr, genetische und sozioökonomische Faktoren. (15)

Durch das Voranschreiten der Demineralisation und somit der Karies kommt es zu einem Verlust an Zahnhartsubstanz. Karies ist somit keine Infektionskrankheit, sondern die Folge eines ökologischen Ungleichgewichtes.

2.2.3 Histologie der Dentinkaries

Durch den kariösen Reiz verändert sich das Dentin bereits vor einer Kavitätenbildung. Es diffundieren bakterielle Toxine und Enzyme durch die Schmelzläsionen in das Dentin. Die Odontoblasten beginnen an der Pulpa-Dentin-Grenze Tertiärdentin zu bilden, um so den Abstand zum kariösen Geschehen zu vergrößern. Im Dentin lassen sich histologisch mehrere Zonen unterscheiden (Abb. 1). Von zentral nach peripher sind dies: die Zone des **normalen Dentins**, die **Zone der Sklerose**, die „**dead tracts**“, die **Zone der Demineralisation**, die **Zone der Penetration** und die **Zone der Nekrose** (1).

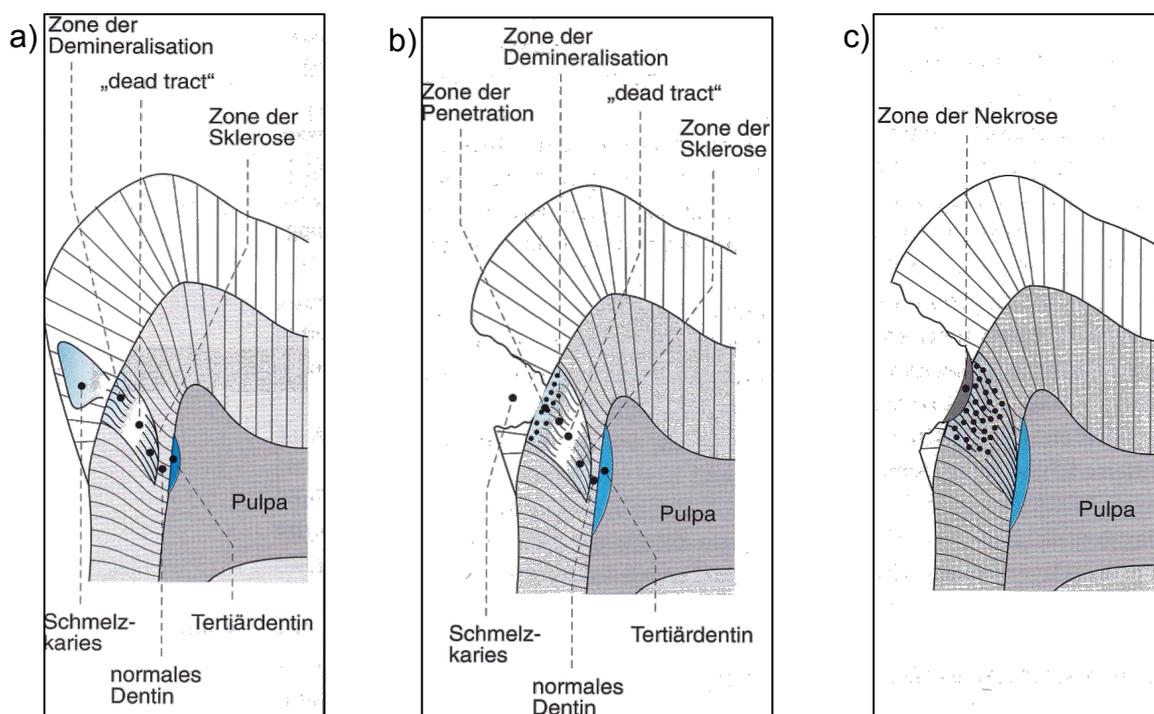


Abbildung 1: Darstellung der verschiedenen Stadien der Dentinkaries. A) Vor der Schmelzkavitation. b) nach Schmelzkavitation breitet sich die Karies unterminierend aus c) nach Schmelzkavitation im fortgeschrittenen Stadium (modifiziert nach Schröder 1991),(2)

In der Zone der Sklerose obliterieren die Dentinkanäle durch Ausfällung von Kalzium-Phosphat-Salzen vollständig. Das sklerotische Dentin ist somit stärker mineralisiert. Dadurch soll die Invasion von Mikroorganismen aufgehalten werden (16). Die „dead tracts“ zeichnen sich dadurch aus, dass keine Odontoblastenfortsätze mehr vorhanden sind. Diese Zone ist sehr durchlässig und bietet den angreifenden Mikroorganismen keinen Widerstand (1, 10). In Richtung der Schmelz-Dentin-Grenze folgt die Zone der Demineralisation. Durch organische Säuren der Mikroorganismen kommt es zur Entmineralisierung. In dieser Zone kann es nach Beseitigung der kariogenen Noxen zum Stillstand der Entmineralisierung kommen. Partiiell findet anschließend eine Remineralisierung des demineralisierten Dentins statt (1). In der darüber liegenden Zone der Penetration sind die Mikroorganismen in die Dentinkanäle eingedrungen. Ihre proteolytischen Enzyme zerstören die organischen Bestandteile des Dentins. Durch die Auflösung der Dentinstruktur werden dentineigene Proteasen (MMPs), die während der Dentinenstehung in die Matrix eingebettet wurden, freigesetzt und aktiviert. Dies führt zur weiteren Zersetzung der organischen Matrix des Dentins (17). Dieser proteolytische Vorgang ist irreversibel. Die Struktur des Dentins erscheint in der Zone der Penetration noch relativ intakt. Nach peripher schließt sich die Zone der Nekrose an. Hier ist das Dentin erweicht und destrukturiert (1, 16).

2.3 Therapie der Karies

2.3.1 Prävention, non-invasive und mikro-invasive Therapie

Ist es durch Demineralisierungsprozesse zu initialen Läsionen der Schmelzoberfläche gekommen, kann durch non-invasive Maßnahmen wie intensive Fluoridierung, Mundhygieneinstruktion und Ernährungslenkung der Fortschritt der Karies aufgehalten werden. Durch Remineralisierung der Oberfläche kann die Struktur des Schmelzes weitestgehend wiederhergestellt werden (18). Nicht kavitierte kariöse Läsionen im Approximalbereich können mit einem niedrig viskösen Komposit infiltriert werden (19). Dabei penetriert das Komposit in die oberen Schichten der demineralisierten Zahnoberfläche. Das Eindringen von Mikroorganismen sowie Säuren wird dadurch verhindert, die kariöse Läsion arretiert (20, 21). Diese mikro-invasive Behandlung stellt besonders bei kariesaktiven Patienten mit geringer Compliance eine Behandlungsalternative

zur non-invasiven Vorgehensweise da (20). Eine weitere mikro-invasive Möglichkeit ist die Kariesversiegelung. Dabei wird das kariöse Dentin komplett belassen und anschließend adhäsiv mittels Kompositmaterialien oder konfektionierten Stahlkronen („Hall“-Technik) versiegelt. Bei der Kariesversiegelung von Milchmolaren mittels Stahlkronen konnten nach vier bis fünf Jahren gute Erfolgsraten nachgewiesen werden (22, 23). Das Verbleiben von großen Mengen infiziertem Dentin unterhalb des adhäsiven Kompositmaterials scheint klinisch jedoch problematisch. Im Vergleich zu Restaurationen, bei denen vorher Karies entfernt wurde, kommt es zu erhöhten non-pulpalen Komplikationsraten wie Restauraionsfrakturen, Bildung von Sekundärkaries oder Kariesprogression unterhalb der Versiegelung (24).

2.3.2 Invasive Kariestherapie

Kommt es bei einer fortgeschrittenen kariösen Läsion zu einer Kavitation, die eine Reinigung unmöglich macht, so ist eine invasive Therapie oftmals unumgänglich. Durch die Zerstörung der Integrität der Zahnoberfläche können sich Substrat und Bakterien in der Kavität sammeln. Zudem kann es durch die Kavitation zu einer Beeinträchtigung der Funktion und Ästhetik kommen, die nur durch eine Restauration des Zahnes wiederhergestellt werden kann (25). Die Restauration stellt die Zahnoberfläche wieder her und macht diese für die Mundhygiene zugänglich. Vor der Versorgung mit einer Restauration sollte eine Kariesentfernung vorgenommen werden. Somit wird eine suffiziente und große Oberfläche geschaffen, die eine zuverlässige Adhäsion der Restauration am Zahn ermöglicht. Non-pulpale Komplikationen werden verringert und es kann zuverlässiger und langlebiger restauriert werden (24).

2.4 Kariesentfernung

2.4.1 Non-selektive Kariesentfernung

Lange Zeit wurde mit der non-selektiven („vollständigen“) Kariesentfernung das Ziel verfolgt, erweichtes, demineralisiertes, kariöses Dentin einzeitig und vollständig zu entfernen. Dabei wird angenommen, dass anschließend nur noch gesundes, nicht infiziertes Dentin in der Kavität verbleibt. Die vollständige Beseitigung der Bakterien galt als ausschlaggebend für den Erfolg der Behandlung. Es konnte jedoch gezeigt werden, dass trotz non-selektiver

Kariesentfernung keine vollständige Beseitigung der Mikroorganismen möglich ist (26). Bei der non-selektiven Kariesentfernung kommt es zudem zu einem starken Substanzabtrag. Vor allem bei tiefen kariösen Läsionen, die röntgenologisch bis ins innere Drittel oder Viertel des Dentins reichen, besteht demnach eine erhöhte Gefahr, die Zahnpulpa iatrogen zu eröffnen (27). Geschieht dies, sind weitere Therapien notwendig, um den Zahn erhalten zu können. Bei symptomfreien Pulpen dient die direkte Überkappung mit Kalziumhydroxyd dem Bewahren der Vitalität des Zahnes. Bei Zähnen, die bereits vor der Kariesentfernung pulpitisches Symptome zeigten, muss eine Wurzelkanalbehandlung durchgeführt werden, um den Zahn zu erhalten (28). Die iatrogene Eröffnung der Pulpa verringert die Langzeit-Prognose des Zahnes. Außerdem steigen durch die notwendigen Folgetherapien die Langzeit-Erhaltungskosten (28-30).

2.4.2 Schrittweise Kariesentfernung

Bei tiefen kariösen Läsionen wird bei der schrittweisen Kariesentfernung in der ersten Sitzung nur der stark erweichte Teil des kariösen Dentins entfernt. Die Kavität wird anschließend provisorisch restauriert. In einer zweiten Sitzung wird das verbliebene kariöse Dentin nach den Kriterien der non-selektiven Kariesentfernung komplett entfernt. In der Zeit zwischen den beiden Sitzungen wird von den Odontoblasten Tertiärdentin gebildet. Durch das Versiegeln der Karies und dem Abschneiden der Mikroorganismen von ihrer Substratzufuhr findet eine Remineralisation des Dentins und eine Inaktivierung der Karies statt. Das Dentin ist in der zweiten Sitzung härter als zuvor, wodurch weniger Substanz bei der Kariesentfernung abgetragen wird. Diese Art der Kariesentfernung führt zu einem verringertem Risiko der iatrogenen Eröffnung der Pulpa (29, 31).

2.4.3 Selektive Kariesentfernung

Bei der selektiven Kariesentfernung wird peripher vollständig exkaviert. In der Nähe der Zahnpulpa verbleibt leicht erweichtes Dentin dauerhaft unter der Restauration. Es hat sich bei der schrittweisen Kariesexkavation gezeigt, dass der metabolische Prozess der Kariesprogression bereits zwischen der ersten und zweiten Sitzung zum Erliegen kommt. Es findet eine partielle Remineralisation des belassenen kariösen Dentins statt. Zum Aufhalten des metabolischen Prozesses der Karies ist eine zweite Sitzung somit nicht notwendig (32). Vielmehr birgt der erneute invasive Eingriff ein Risiko für die Vitalität des Zahnes (33). Die selektive

Kariesentfernung ist für das Aufhalten der Karies ausreichend und verringert gleichzeitig die Gefahr der iatrogenen Pulpeneröffnung (28, 29). Bei tiefen kariösen Läsionen ist die selektive Kariesentfernung die zu präferierende Kariesentfernungsmethode (34).

2.5 Kompositrestauration

2.5.1 Allgemeines

Nach dem Verlust von Zahnhartsubstanz durch Karies und Kariesentfernung ist in vielen Fällen eine Restauration des Zahnes notwendig. Die Restauration soll die Zahnoberfläche für die Mundhygiene zugänglich machen sowie Funktion und Ästhetik des Zahnes wiederherstellen (34). Es gibt zahlreiche Restaurationsmaterialien. Im Folgenden soll allerdings lediglich die Kompositrestauration näher besprochen werden. Ziel ist ein langlebiger Verschluss der Kavität. Dafür sind gute physikalische Eigenschaften und ein sicherer Verbund zur Zahnhartsubstanz notwendig.

2.5.2 Zusammensetzung von Komposit

Komposit ist ein zusammengesetzter Werkstoff der aus drei Phasen besteht: der organischen Phase (Matrix), der Verbundphase und der anorganischen Phase (Füller). Die organische Matrix besteht im Wesentlichen aus Monomeren (mehrfunktionellen Methakrylaten), Initiatoren, Stabilisatoren und Farbstoffen. Dieser Matrix werden anorganische Füller wie Quarz, Keramik und Siliziumdioxid zugesetzt, um die physikalischen und mechanischen Eigenschaften der Kunststoffmatrix zu verbessern. Die organische und die anorganische Phase gehen durch die Verbundphase über Silanisierung eine Bindung miteinander ein (1).

2.5.3 Adhäsivtechnik

Um einen Verbund von Komposit zur Zahnhartsubstanz herzustellen, ist die Anwendung von Adhäsiven notwendig, da die meisten Komposite selbst nicht dazu in der Lage sind, an der hydrophileren Zahnhartsubstanz zu haften. Durch die Polymerisationsschrumpfung würde es, ohne die Anwendung von Adhäsiven, zur Ausbildung von Randspalten kommen. Vor dem Einbringen des Komposites in die Kavität wird die Oberfläche konditioniert und mit einem Adhäsiv-System behandelt. Dadurch kommt es zu einer mikromechanischen Verankerung des

Komposites mit der Kavitätenoberfläche und somit zur randspaltfreien Restauration. Aufgrund ihres unterschiedlichen histologischen Aufbaues müssen Schmelz und Dentin verschieden konditioniert werden. Im Schmelz entsteht im ersten Schritt bei der Konditionierung mit 37% Phosphorsäure ein mikroretentives Relief. Die Schmelzprismen werden selektiv herausgelöst. Ein hydrophobes Adhäsiv wird auf dieses Relief aufgetragen und lichtgehärtet. Es stellt den Verbund vom Schmelz zur Restauration sicher. Im Dentin kommt es durch die Phosphorsäure ebenfalls zu einer Demineralisation. Das Kollagenetzwerk wird ca. 30 µm freigelegt. Danach wird ein hydrophiler Primer aufgebracht. Seine Hydrophilie ermöglicht es dem Primer, in das freigelegte Kollagenetzwerk des Dentins einzudringen. Abschließend wird das Adhäsiv aufgetragen und lichtgehärtet. Diese Hybridschicht aus Kollagen, Primer und Adhäsiv ermöglicht den Verbund zwischen dem hydrophilen Dentin und dem hydrophoben Restaurationsmaterial (Abb. 2). Auf die Hybridschicht wird das Kompositmaterial nach Herstellerangaben aufgetragen und lichtgehärtet (1).

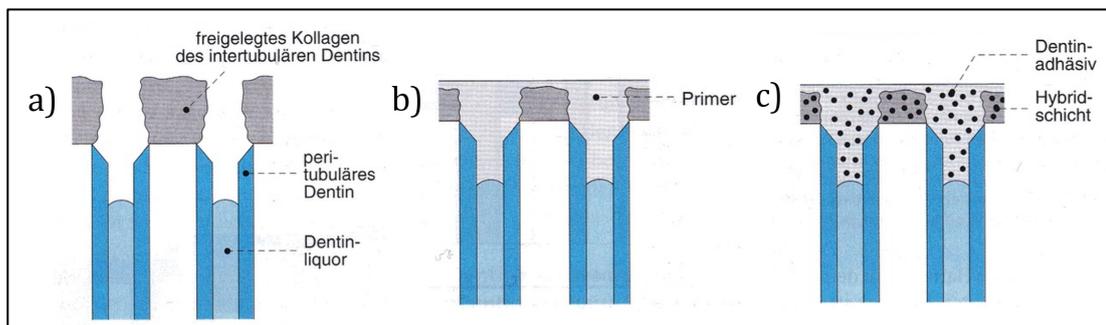


Abbildung 2: Darstellung der Dentinhaftvermittlung nach Anwendung von dentinkonditionierender Adhäsivsysteme: **a)** Nach Auftragen einer Säure kommt es zur Demineralisierung des oberflächlichen Dentins und Freilegung von Kollagen. **b)** Nach Auftragen eines hydrophilen Primers, der in das Kollagen und das „feuchte“ Dentin eindringt. **c)** Nach Auftragen des Dentinadhäsivs und anschließender Lichthärtung entsteht eine Hybridschicht aus Kollagen, Primer und Adhäsiv.(1)

2.5.4 Auswirkungen von Residualkaries auf die Restauration

Nach der selektiven Kariesentfernung ist das verbliebene kariöse Dentin erweicht und in seiner histologischen Struktur verändert. Dies führt zu reduzierten Haftkräften konventioneller Adhäsivsysteme an dem belassenen kariösen Dentin (35, 36). Befürchtungen, dass sich dieser Faktor negativ auf die Frakturbeständigkeit der Restauration auswirkt, konnten bei Prämolaren nicht bestätigt werden. In einer Studie von Schwendicke et al. 2014 wurden Prämolaren nach selektiver und non-selektiver Exkavation an der pulpa-axialen Wand mit

mesial-okklusalen-distalen Restaurationen versorgt und anschließend von okklusal bis zur Fraktur belastet. Dabei konnte gezeigt werden, dass vielmehr die Läsionstiefe – ein nicht beeinflussbarer Faktor – deutlich relevanter für die Frakturbeständigkeit von Zähnen ist, als die Exkavationsmethode (37). In einer anderen Studie gab es zwischen den Zähnen mit und ohne belassenem demineralisiertem Dentin jedoch Unterschiede hinsichtlich der Frakturbeständigkeit. Bei dieser Studie wurden Molaren nach non-selektiver und selektiver Exkavation einer okklusalen Läsion mit okklusalen Restaurationen versorgt und ebenfalls von okklusal bis zur Fraktur belastet (38). Bisher ist unzureichend geklärt, ob die selektive Kariesentfernung zu einer verringerten Randintegrität der Restauration führt. Zudem ist unklar, ob die Restaurationen nach selektiver Kariesentfernung anfälliger für Sekundärkaries sind als nach der non-selektiven Entfernung der Karies.

2.6 Techniken der Restaurationsanalyse

2.6.1 Allgemeines

Für die Beurteilung von Restaurationen gibt es verschiedene Möglichkeiten. Klinisch können Restaurationen vom Zahnarzt visuell sowie mit einer zahnärztlichen Sonde untersucht werden. Durch Einflussfaktoren wie anatomische Verhältnisse, Muskeldruck oder Speichel sind nicht alle Bereiche klinisch taktil oder visuell sicher zu bewerten. Auch röntgenologisch ist eine Einschätzung der Randintegrität und der Bildung von Sekundärkaries möglich. Dies ist besonders für Bereiche wichtig, die für den Zahnarzt nicht einsehbar oder detektierbar sind. Aufgrund der technischen Einschränkungen der Röntgentechnik ist eine sichere Aussage der Restaurationsintegrität nicht immer zuverlässig. Bei der zweidimensionalen Aufnahme können durch Überlagerungen von anatomischen Strukturen oder Restaurationsanteilen Randspalten und Sekundärkaries unentdeckt bleiben. Eine sichere Aussage über den Zustand der Restauration ist aufgrund der methodischen Einschränkungen klinisch somit nicht immer erreichbar.

Aus diesem Grund werden für eine bessere Restaurationsanalyse alternativ In-vitro-Verfahren eingesetzt. Dazu gehören Randintegritätsuntersuchungen mittels

Rasterelektronenmikroskopie oder Methoden der Farbstoffpenetrationsmessung. Zur Beurteilung des Sekundärkariesrisikos können künstliche Kariesmodelle angewandt werden. Dabei kann der entstandene Mineralverlust beispielsweise mittels Mikroradiographie evaluiert werden.

2.6.2 Farbstoffpenetration

Die Farbstoffpenetration ist eine Methode zur Untersuchung von Spaltbildungen zwischen Zahn und Restauration *in vitro*. Es werden viele unterschiedliche Farbstoffe genutzt, die sich in Molekülgröße und Affinität zum Substrat unterscheiden. In der Regel werden die Restaurationsränder für eine bestimmte Zeit in dem Farbstoff gelagert, anschließend gesäubert und unter einem Lichtmikroskop beurteilt. Der verwendete Farbstoff penetriert dabei in Randspalten zwischen Restauration und Zahn. Er simuliert *in vitro* das Eindringen von Speichel, Zucker und Mikroorganismen im Mund. Die Penetrationstiefe wird hierbei als Maß für die Randdichte der Restauration verwendet. Das Aufkommen von Spalten zwischen Zahn und Restauration wird in vielen Studien als wichtiger Einflussfaktor für die Langlebigkeit einer Restauration angesehen (39).

2.6.3 Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie ist ein gängiges Verfahren, um mit Hilfe der starken Vergrößerung Restaurationen auf ihre Randqualität zu überprüfen. Die Restaurationsränder werden mit einer zweihundertfachen Vergrößerung betrachtet. Dabei ist es möglich, die Restaurationsoberfläche genauestens auf Randspalten, Materialüberschüsse oder zum Beispiel Frakturen zu untersuchen. Eine Aussage, wie weit diese Randspalten oder Frakturen ins Restaurationsinnere reichen, ist jedoch nicht möglich (40).

2.6.4 Transversale Mikroradiographie

Die transversale Mikroradiographie ist eine Methode zur quantitativen Bestimmung des Mineralgehaltes von Zahnhartsubstanz. Dabei werden die Mikroradiographien von Dünnschliffen auf einen Röntgenfilm durch Röntgenbestrahlung hergestellt. Mit Hilfe speziell zur Analyse der Mikroradiographie entwickelter Software wird der Mineralgehalt über die Erfassung der Graustufen des mikroradiographischen Bildes gemessen. Mit der transversalen Mikroradiographie lassen sich zwei Hauptparameter messen: die Läsionstiefe in μm und der Mineralverlust in

Vol%.µm. Dabei ist die quantitative Aussage so exakt, dass die transversale Mikroradiographie als ein Goldstandard für die Messung des Mineralgehalts von Schmelz und Dentin gilt. Es können Demineralisierungen der Zahnschmelz, wie sie bei Karies entstehen, quantitativ erfasst werden. Eine Aussage über die Zersetzung der organischen Bestandteile der Zahnschmelz oder den Härtegrad der Zahnschmelz ist mit dieser Methode nicht möglich (41).

3 Ziele der Arbeit

Bei der non-selektiven Kariesentfernung kommt es, trotz des Versuches die Bakterien komplett zu entfernen, nicht zu einer vollständigen Entfernung der Bakterien in der Kavität (26). Zudem birgt diese Art der Kariesentfernung bei tiefen kariösen Läsionen im Vergleich mit der schrittweisen und selektiven Kariesentfernung ein hohes pulpaes Risiko. Die selektive Kariesentfernung ist für das Aufhalten der Karies ausreichend und verringert gleichzeitig die Gefahr der iatrogenen Pulpeneröffnung. Bei tiefen kariösen Läsionen ist die selektive Kariesentfernung die zu präferierende Kariesentfernungsmethode (34).

Bisher ist nicht geklärt, ob das bei der selektiven Kariesentfernung belassene, demineralisierte und erweichte Dentin einen negativen Einfluss auf den klinischen Langzeiterfolg der Kompositrestauration hat. Eine gute Randqualität kann als Surrogatparameter eines erfolgreichen adhäsiven Verbundes zwischen Komposit, Schmelz und Dentin genutzt werden. Letzterer ist relevant für den klinischen Langzeiterfolg der Füllungstherapie. Ziel dieser Dissertation ist es, die Qualität des zervikalen Füllungsrandes der Kompositrestaurationen nach selektiver und non-selektiver Kariesexkavation miteinander zu vergleichen.

Um diese Frage zu klären, sollten folgende Hypothesen überprüft werden:

1. Die Randspaltenbildung bei Kompositrestaurationen ist nicht abhängig von der genutzten Exkavationsmethode.
2. Die Sekundärkariesbildung am Kompositrestaurationsrand ist nicht abhängig von der genutzten Exkavationsmethode.

Zur Überprüfung dieser Hypothesen wurden die nachfolgenden Untersuchungen durchgeführt:

1. Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung der zervikalen Füllungsrande vor und nach der künstlichen Alterung im Kausimulator.
2. Farbstoffpenetration nach künstlicher Alterung an den zervikalen Füllungsrandern.
3. Transversale Mikroradiographie nach der Erzeugung von künstlicher Sekundärkaries.

4 Material und Methoden

Das Ziel dieser Versuchsreihe war es zu untersuchen, ob die beiden unterschiedlichen Exkavationsmethoden, non-selektive und selektive Exkavation, Auswirkungen auf die Qualität der sich anschließenden Restauration haben. Zunächst wurden die Versuchszähne mit einer standardisierten Kavität versehen. An den pulpanahen Kavitätenwänden wurden künstlich kariöseähnliche Läsionen erzeugt. Dabei wurden an der einen Hälfte der Versuchszähne tiefe kariöse Läsionen und an der anderen Hälfte flache kariöse Läsionen erzeugt. Anschließend wurden beide Gruppen nochmal unterteilt. Je bei der Hälfte wurde die non-selektive Exkavation durchgeführt. Bei der anderen Hälfte wurde zur simulierten selektiven Exkavation die kariöse Läsion belassen. Danach wurden alle Versuchszähne mit adhäsiven Kompositrestaurationen versorgt. Nach einer künstlichen Alterung durch thermo-mechanische Belastung wurden die zervikalen Ränder der Restaurationen mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskopes auf Randspalten untersucht. Die Randspaltenanalyse dient der Einschätzung der Qualität der Restaurationen nach Belastung. Des Weiteren durchliefen die Zähne einen Farbstoffpenetrationsversuch. Durch Spalten im Rand kann der Farbstoff zwischen Zahn und Restauration penetrieren und färbt diesen Bereich ein. Die Penetrationstiefe wird vermessen und dient als zusätzlicher Parameter der Restorationsqualität. Darüber hinaus wurde in einem Bakterienmodell Sekundärkaries an den zervikalen Rändern der Restaurationen erzeugt. Der Demineralisierungsgrad wurde mit Hilfe von mikroradiographischen Analysen ermittelt und diente als dritter Parameter zur Feststellung der Randdichtigkeit (Abb. 3).

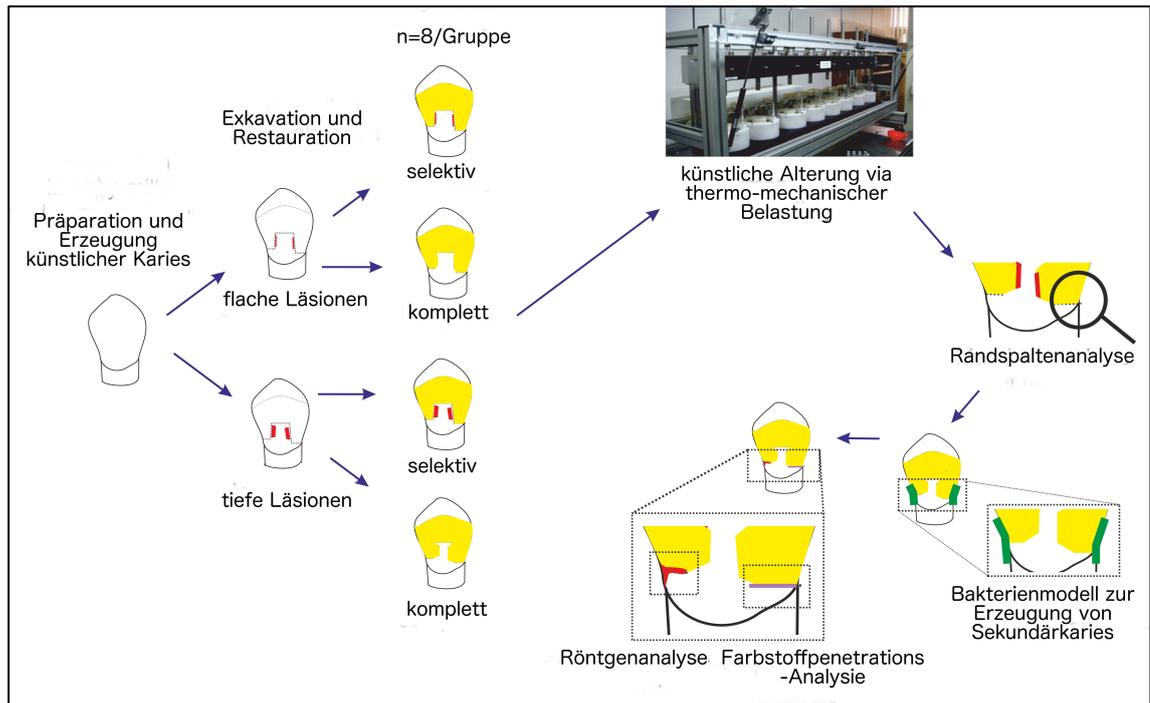


Abbildung 3: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Versuchsaufbauten nach Schwendicke et al. 2014 (3)

4.1 Auswahl der Zähne und Vorbereitung

Für die Untersuchungen wurden 32 menschliche, extrahierte, zweite Oberkieferprämolaren aus einem Pool von 100 Prämolaren ausgewählt. Die Zustimmung der Ethikkommission des UKSH, Kiel (D444/10), lag vor. Die Zähne lagerten seit ihrer Extraktion in Thymolwasser (0,08 %). Es wurden zunächst insgesamt 100 Prämolaren mit Hilfe einer Schiebelehre vermessen, um anschließend die Prämolaren auszuwählen, die ähnliche anatomische Voraussetzungen erfüllten (mesial-distal 6,4 -7,4 mm und buccal-oral 8,3 – 9,3 mm). Mit einem Scaler (SN 1379, Hu-Friedy, Tuttlingen, Deutschland), einer Polierbürste (Gebr. Brasseler, Lemgo Deutschland) und Bimssteinpulver (Henry Schein Dental, Langen, Deutschland) wurden sie für das weitere Vorgehen gereinigt. Die Prämolaren zeigten keinerlei Demineralisationen, Schmelzrisse oder andere Auffälligkeiten. Für die weiterführenden Versuche wurden die Zähne 1,0 mm unterhalb der Schmelz-Dentin Grenze mit Technovit 4071 (Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) in eine Metallhülse (Durchmesser 15,0 mm; Richter, Kiel, Deutschland) eingebettet. Die Okklusalfächen der Prämolaren wurden dabei waagrecht und zentriert in den Hülsten ausgerichtet. Für die spätere Zuordnung

wurden die zugehörigen Nummern in die Metallrohre eingraviert sowie die mesialen und distalen Seiten der Prämolaren in den Metallhülsen mit je einer Gravur gekennzeichnet. Anschließend wurden mit Hilfe von Sekundenkleber (Locite 493, Henkel, Düsseldorf, Deutschland) am unteren Ende der Hülse Sockel (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland) angebracht, um später die Proben im Kopierfräsgerät (Celay, Mikrona, Spreitenbach, Schweiz) positionieren zu können.

4.2 Präparation

Um bei jedem Prämolaren die gleiche Präparation zu erzielen, wurde zunächst ein weiterer Prämolare in eine Metallhülse eingebettet und mit einer Präparation versehen. Diese „Master-Präparation“ wurde entsprechend einer mesial-okklusaldistalen Kavität präpariert (Abb. 4). Sie wurde mit einem Diamanten in Zylinderform (Korngröße 64-126 μm ; Gebr. Brasseler) und 200.000 Umdrehungen pro Minute unter ständiger Wasserkühlung von mindestens 50 ml pro Minute vorgenommen. Die okklusale Kavität war 2,0 mm breit und 2,5 mm tief. Der Präparationswinkel entsprach der Zahnachse. An den distalen Flächen befanden sich die Präparationsgrenzen auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze und endeten im Schmelz. Bei den mesialen Flächen befanden sich die Präparationsgrenzen unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze und endeten im Zement. Die approximalen Kästen waren jeweils 1,5 mm tief und 3,5 mm breit. Mit Hilfe des Kopierfräsgerätes wurde diese Präparation auf die 32 Versuchszähne übertragen. Es wurde dabei unter ständiger Wasserkühlung gearbeitet. Zunächst wurde die Grundform der Kavität mit einem blauen Diamant-Aufsatz hergestellt (Korngröße 64-126 μm) und anschließend mit einem roten Diamant-Aufsatz (Korngröße 27-76 μm) finiert. Die Kastenhöhe wurde mit einem rot beringten Diamanten (Gebr. Brasseler) in Zylinderform individuell auf die vorgesehene Höhe gelegt, sodass die Präparationsgrenzen distal auf Höhe der Schmelz-Zement-Grenze und mesial unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze zu liegen kam. Dies geschah ebenfalls unter ständiger Wasserkühlung von mindestens 50 ml pro Minute und 200.000 Umdrehungen pro Minute.

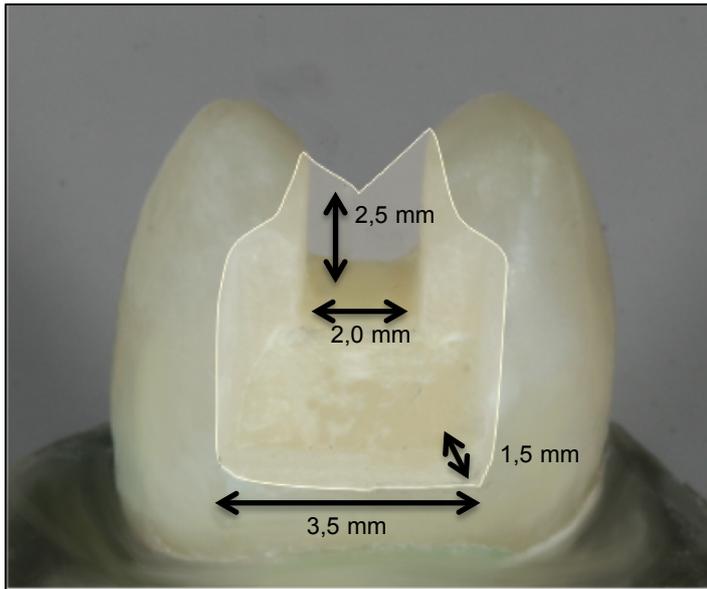


Abbildung 4: Darstellung der Präparation nach Schwendicke et al. 2014 (3)

4.3 Erzeugung künstlicher Kariesläsionen

Zur Vorbereitung der Erzeugung künstlicher kariesähnlicher Läsionen wurden die 32 Prämolaren komplett mit Nagellack (High Gloss, Rossmann, Burgwedel, Germany) abgedeckt. Anschließend wurden an den mesialen und distalen, pulpanahen Wänden der Kastenwand Fenster (2,0 × 3,0 mm) mit einem knospenförmigen Diamanten wieder freigelegt, sodass die Demineralisationslösungen an diesen Wänden wirken konnten (Abb. 5). Die restliche Zahnoberfläche war durch den Nagellack vor den Demineralisationslösungen geschützt. Um unterschiedlich tiefe Läsionen zu erzeugen, wurden die Zähne verschiedenen Demineralisationsprotokollen unterworfen. Sechzehn Zähne wurden für 96 Stunden bei 37°C und ständiger Bewegung im Incubation Shaker (Eppendorf, Enfield, USA) in der Demineralisationslösung 1 gelagert (Tabelle 1). Hierbei wurden tiefe Läsionen (mittlere Läsionstiefe ± Standardabweichung: 771±176µm, Mineralverlust: 27674±8006 Vol.%×µm) erzeugt (37). Die andere Hälfte der Zähne wurde für 21 Tage bei 37°C und ständiger Bewegung im Incubation Shaker in der Demineralisationslösung 2 (Tabelle 2) gelagert. Hierbei wurden flache Läsionen (mittlere Läsionstiefen ± Standardabweichung: 64±18µm, Mineralverlust: 1279±797 Vol.%×µm) erzeugt (37).

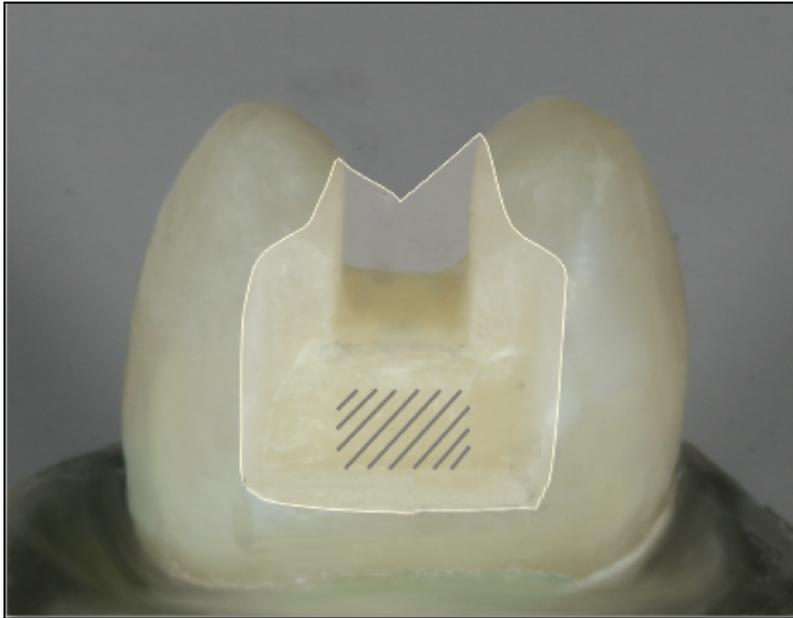


Abbildung 5: Darstellung der pulpanahen Wand. Der markierte Bereich blieb von Nagellack unbedeckt. Abbildung nach Schwendicke et al 2014 (3)

Tabelle 1: Zusammensetzung der Demineralisationslösung 1

Stoff	Ansatz	Menge
Ethylendiamintetraessigsäure ($C_{10}H_{16}N_2O_8$)	Zusammen 1L	186,12 g
Aqua demin.		Ad 1L
Zitronensäure ($C_6H_8O_7$)		In Spuren

Tabelle 2: Zusammensetzung der Demineralisationslösung 2 (Buskes et al. 1985)

Stoff	Ansatz	Menge
Kalziumchlorid -2-hydrat ($CaCl_2 - H_2O$)	Zusammen 5 l	2,205 g
Kaliumdihydrogenphosphat (KH_2PO_4)		2,041 g
Methyldiphosphonsäure ($CH_2[P(O)(OH)_2]_2$)		5,300 mg
Essigsäure (CH_3COOH)		15,012 g
Kalilauge (KOH)		ca. 23 ml
Thymol		in Spuren
Aqua demin.		ad 5 l

4.4 Exkavation und Restauration der Zähne

Nach der Demineralisation an den pulpanahen Wänden der Kasten hinterwände wurde der Nagellack mit einem Scaler (Hu-Friedy) vollständig entfernt. Die beiden Gruppen wurden nun nochmals zufällig in zwei Gruppen aufgeteilt. In der einen Gruppe wurden die Läsionen von einem erfahrenen Zahnarzt mit Hilfe eines

Handexkavators (HF CD89/92, Hu-Friedy) exkaviert. Die Exkavation erfolgte bis nur noch hartes Dentin verblieben war. Zur Überprüfung wurde eine zahnärztliche Sonde (HF EXS3A6, Hu-Friedy) eingesetzt. Bei der anderen Gruppe wurden die künstlich erzeugten kariösen Läsionen belassen (Simulation einer selektiven Exkavation). Anschließend wurden die mesial-okklusal-distalen Kavitäten aller Gruppen mit einer Kompositrestauration versorgt. Hierfür wurden die Kavitäten zunächst für 15 Sekunden mit Phosphorsäuregel (37 %; 3M Espe, St. Paul, USA) geätzt und anschließend für mindestens 30 Sekunden mit Wasserspray von allen Säurerückständen gesäubert. Mittels Druckluft wurden die Zähne vorsichtig getrocknet, wobei darauf geachtet wurde, das Dentin nicht zu übertrocknen. Für die Restauration wurde das Adhäsivsystem OptiBond FL (Kerr Hawe SA, Bioggio, Schweiz) nach Herstellerangaben verwendet. Zum Primern des Dentins in der Kavität wurde der Primer 30 Sekunden mit einem Pinsel aufgetragen und 5 Sekunden lang mit Druckluft verblasen. Danach wurde das Adhäsiv dünn auf die Kavitätenoberfläche aufgetragen, leicht verblasen und für 20 Sekunden lichtgehärtet (Lichthärtelampe Smartlite, 950 mW/ cm²; Densply De Trey, Konstanz, Deutschland). Die Kavitäten wurden mit Komposit (Tetric EvoCeram, Ivoclar Vivadent, Schaan, Lichtenstein) in der Inkrementtechnik gefüllt. Jedes Inkrement wurde dabei für 40 Sekunden lichtgehärtet. Die Restaurationen wurden poliert (Sof-Lex discs, 3M ESPE, St. Paul, USA) und die Restaurationsränder unter einem Stereomikroskop (Stemi Zoom, Carl Zeiss AG, Oberkochen, Deutschland) auf einen spaltlosen Übergang von Restauration und Zahn kontrolliert.

4.5 Künstliche Alterung

Für eine simulierte Alterung der Kompositrestaurationen erfolgte eine thermo-mechanische Belastung der Prämolaren. Zunächst wurden diese für $1,2 \times 10^6$ Zyklen mit einem Gewicht von 5 kg auf den tragenden Höckern in einem Kausimulator (Willytech, Feldkirchen-Westerham, Deutschland) belastet. Die Belastung wurde über eine Keramikkugel (Durchmesser: 5mm; Steatite, Hoechst, Wunsiedel, Germany) übertragen. Während der Belastungsphase fand eine Abgleitbewegung auf dem tragenden Höcker in Richtung Zentralfissur von 0,5 mm statt. Anschließend durchliefen die Prämolaren 10.000 Thermozyklen im Wechselbad zwischen 5 ° Celsius und 55 ° Celsius. Dabei verweilten diese bei

jedem Zyklus für 30 Sekunden im Wasserbad und für 12 Sekunden an der Luft bei Raumtemperatur. Dies entspricht etwa einer klinischen Alterung der Restaurationen von fünf Jahren in situ (42).

4.6 Randspaltenanalyse

Jeweils vor und nach der künstlichen Alterung wurden Abformungen mit Polyvinyl-Siloxan Abformmaterial (Honigum light; DMG, Hamburg, Deutschland) der mesialen und distalen Flächen der Prämolaren genommen. Diese wurden mit Epoxidharz (Stycast 1266; Emerson Cuming, Canton, USA) ausgegossen und somit Replika der approximalen Flächen hergestellt. Anhand der Replika wurden die zervikalen Füllungsänder vor und nach der künstlichen Alterung auf Randspalten untersucht. Dafür wurden die Replika zunächst auf einen Sockel befestigt, sodass die approximale Fläche waagrecht zu liegen kam. Anschließend wurden die Replika mit Hilfe eines Rasterelektronenmikroskopes (SEM XL-30, Phillips, Eindhoven, Niederlande) untersucht (40). Die Rasterelektronenmikroskopie eignet sich zur detaillierten Darstellung von Oberflächen. Um gut leitende Proben zu gewährleisten und ein schnelles Aufladen der Proben während der Rasterelektronenmikroskopie zu vermeiden, wurden mit Hilfe einer Sputteranlage (Baltec SCD 500, BalTec AG, Pfäffikon, Schweiz) die Oberflächen der Proben mit einer nanometerdicken Schicht Gold besputtert. Im Rasterelektronenmikroskop wurden die Proben mit einem fein gebündelten Elektronenstrahl unter einem Hochvakuum abgerastert. Untersucht wurde von jeder Probe der zervikale Füllungsrand mit einer 200-fachen Vergrößerung. Dabei wurde der Füllungsrand hinsichtlich Randspalten und Unregelmäßigkeiten überprüft und in fünf Kategorien A - E eingeteilt (Abb. 6): A) perfekter Rand, B) Rand mit kleinen Unregelmäßigkeiten, C) Rand mit kleinem Randspalt $< 2 \mu\text{m}$, D) Rand mit großen Randspalten $> 2 \mu\text{m}$, E) Rand mit Materialüberschuss. Imperfekte, aber randdichte Restaurationsränder wurden definiert als Ränder mit kleinen Unregelmäßigkeiten, Materialüberschuss und Randspalten $< 2 \mu\text{m}$ (Kategorie A, B, C, E) (40). Für die statistische Auswertung wurden die Kategorien in zwei Gruppen zusammengefasst und miteinander in Proportion gestellt. Die perfekten Restaurationsränder (Kategorie A) wurden zusammengefasst mit den imperfekten Restaurationsrändern (Kategorie B, C, E) und bildeten eine Gruppe. Der Randspalt $> 2 \mu\text{m}$ (Kategorie D) bildete die zweite Gruppe (40).

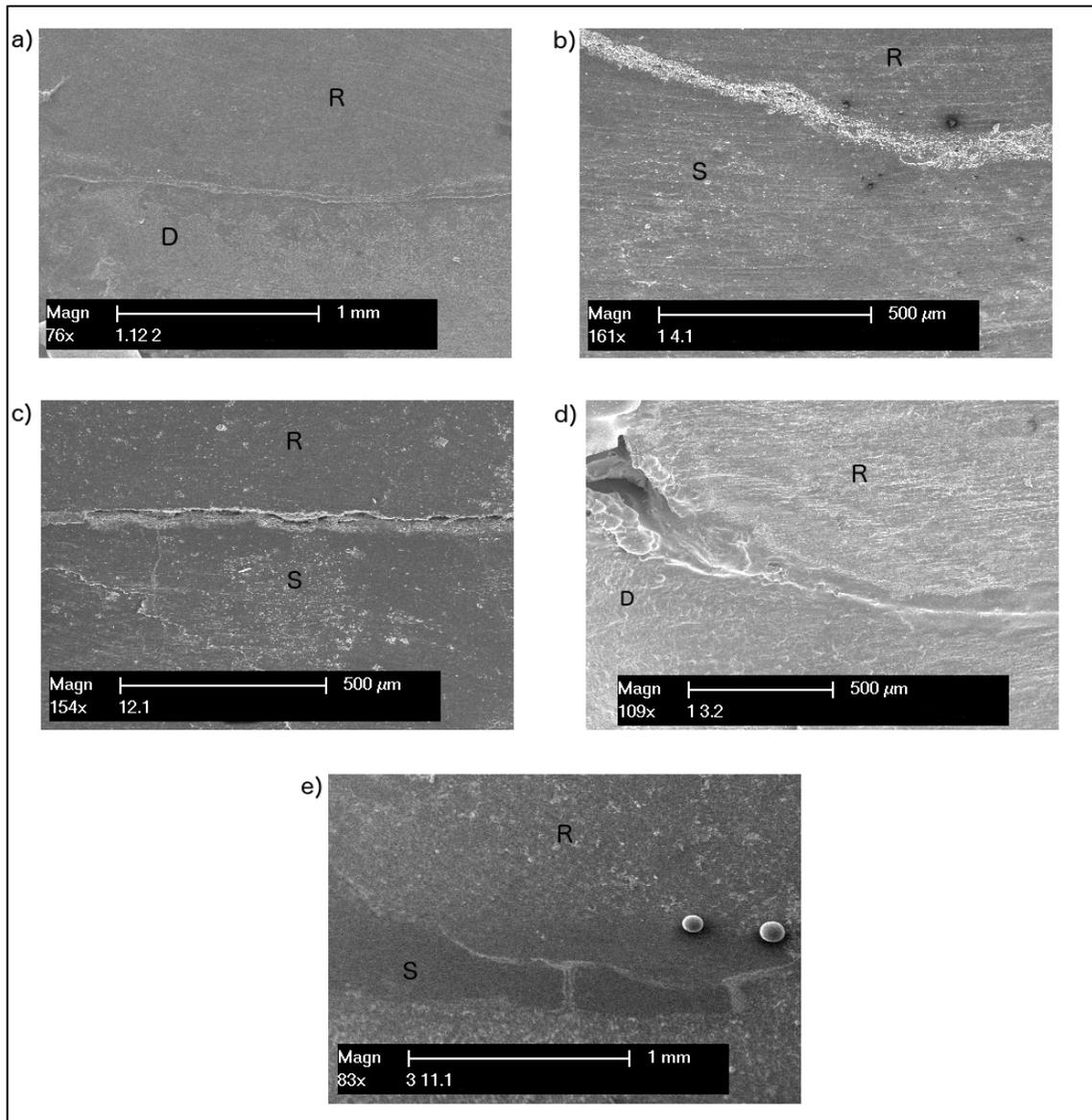


Abbildung 6: Beispielhafte Aufnahmen der verschiedenen Kategorien bei der rasterelektronenmikroskopischen Untersuchung. R Restauration, S Schmelz, D Dentin , a) perfekter Rand, b) Rand mit kleinen Unregelmäßigkeiten, c) Rand mit kleinem Spalt, d) Rand mit großem Spalt, e) Rand mit Materialüberschuss

4.7 Farbstoffpenetrations-Versuch

Für den Farbstoffpenetrations-Versuch wurden alle Prämolaren mit Nagellack versiegelt. Ein Fenster ($2,0 \times 3,0$ mm) im Bereich der zervikalen Füllungsänder wurde ausgespart. Somit erfolgte die Farbstoffpenetration lediglich vom Füllungsrand her. Die Prämolaren wurden für 24 Stunden in einer Säure-Fuchsin-Lösung (0,2 %) bei Raumtemperatur gelagert (39). Nach diesem Zeitraum wurden die Zähne mehrmals mit Aqua demin. gespült. Bevor die Farbstoffpenetration ausgewertet werden konnte, durchliefen die Prämolaren ein künstliches Mundmodell. In diesem wurde über 14 Tage Sekundärkaries erzeugt.

4.8 Erzeugung von künstlicher Sekundärkaries

Vor der Erzeugung von künstlicher Sekundärkaries wurden jeweils die Hälfte der zervikalen Ränder mit Nagellack (Rival de Loop) bedeckt. Auf diese Weise wurde dieser Bereich geschützt, um die Farbstoffpenetrationstiefe nicht zu verändern. An dem anderen, weiterhin freiliegenden Teil des zervikalen Randes wurde künstlich Sekundärkaries erzeugt. Die Erzeugung künstlicher Sekundärkaries erfolgte in einem künstlichen Mundmodell für 14 Tage (43). Das Mundmodell wurde unter einer biologischen Sicherheitswerkbank (Herasafe KS 12, Thermo Scientific, Waltham, USA) installiert, um Kontaminationen aus der Umgebungsluft so gering wie möglich zu halten. Die Versuchszähne standen in ihren Metallhülsen nebeneinander aufgestellt in einer Kunststoffwanne, die mit einem Deckel verschlossen war. Im Deckel befanden sich zwei Löcher. Diese dienten der Zu- und Ableitung eines Schlauchsystems einer Hydraulikpumpe (PR4, Seko Spa, Rieti, Italien). Die Kunststoffwanne und das Schlauchsystem wurden zuvor in einem Dampf-Sterilisator (Webeco, Selmsdorf, Deutschland) sterilisiert. Als Nährmedium wurde eine Herz-Hirn-Bouillon (HHB) (Roth, Karlsruhe, Deutschland) verwendet, die im Dampf-Sterilisator (Webeco) sterilisiert wurde. Die sterile HHB war das Ausgangsmedium für die weiteren Schritte. 130 ml der HHB wurden über Nacht mit *Streptococcus mutans* (SM) (SM, ATCC 25175) beimpft (44). Am ersten Tag wurde die mit SM beimpfte HHB bei 37 ° Celsius für 24 Stunden und 100 % Luftfeuchtigkeit den Proben zugeführt. So wurde eine Besiedlung der Proben durch den SM sichergestellt. An den folgenden Tagen wurden die Proben einmal täglich über das Schlauchsystem mit 130 ml einer SM beimpften Herz-Hirn-Bouillon betropft. Diese Lösung wies eine optische Dichte des SM von 1,0 auf. In dreistündigen Abständen wurden anschließend je 130 ml sterile HHB mit einer Saccharosekonzentration von 2 % über das Schlauchsystem der Hydraulikpumpe den Proben hinzugeführt (45). Die in Aqua demin. gelöste Glukose wurde der HHB nach der Sterilisation über einen Sterilfilter (Whatman FP 30/02, Ca-S, Whatman, Maidstone, England) beigemischt. Die zugeführte Glukose wurde durch den SM metabolisiert. Dadurch entstanden organische Säuren, die zur Demineralisierung an den zervikalen, freiliegenden Restaurationsrändern führen sollten. Die nächtliche Ruhephase betrug zehn Stunden. Um sicherzustellen, dass der SM nicht durch Fremdbeimung verdrängt worden war, erfolgte an jedem

Versuchstag eine Gramfärbung. Dabei konnten immer grampositive Kettenkokken unter einem Lichtmikroskop (Axioplan 60318, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) nachgewiesen werden. Nach 14 Tagen wurden die Biofilme an den Proben gründlich mit Aqua demin. abgespült und anschließend für zwei Stunden mit Aldehyd-Fixierlösung fixiert (Tab. 3).

Tabelle 3: Zusammensetzung der Aldehyd-Fixierlösung

Stoff	Ansatz	Menge
Glutaraldehyd 25 %	Zusammen 100 ml	10 ml
Formaldehyd 37 %		4 ml
Phosphatpuffer		Ad 100 ml

4.9 Auswertung des Farbstoffpenetrations-Versuchs

Für die weitere Bearbeitung wurden die Prämolaren komplett in Technovit 4071 (Heraeus Kulzer) eingebettet und mit einer Bandsäge (EXAKT, Norderstedt, Hamburg) unter ständiger Wasserkühlung von der Metallhülse abgetrennt. Anschließend wurden sie mit einer Bandsäge (EXAKT) unter ständiger Wasserkühlung an der Grenze des Nagellacks, der die Grenze zwischen Sekundärkaries und der Farbstoffpenetration markierte, entlang der Zentralfissur in Hälften geteilt. Die Hälften, an denen die reine Farbstoffpenetration stattfand, wurden an der Schnittfläche mit aufsteigender Körnung (1200, 2400, 4000) an einem Poliergerät (Saphir 360 E, ATM GmbH, Mammelzen, Deutschland) aufpoliert. Es wurden mit einer Spiegelreflexkamera (Canon EOS 60D, Canon, Tokyo, Japan) Makroaufnahmen angefertigt. Am Computer konnte anhand der Aufnahmen mit dem Bildbearbeitungsprogramm CS6 (Adobe Systems, San José, USA) die jeweilige Eindringtiefe des Fuchsins in Millimetern vermessen werden. Dabei wurde außerdem unterschieden, ob der Kavitätenboden und die pulpanahe Wand gar nicht, teilweise oder komplett eingefärbt wurden.

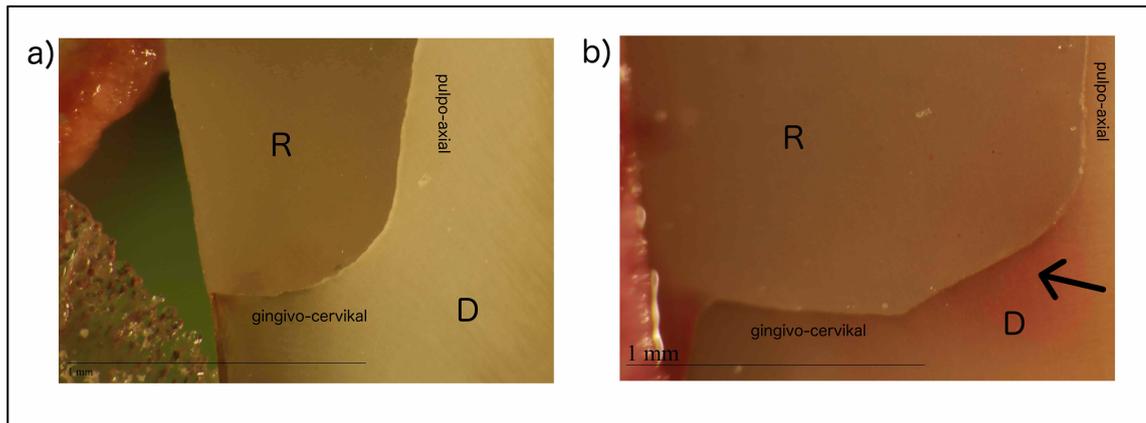


Abbildung 7: Makroaufnahmen der Fuchsin-Farbpenetration. R Restauration, D Dentin, a) Kein Farbstoffpenetration, b) Farbstoffpenetration entlang der pulpo-axialen Wand der Restauration

4.10 Transversale mikroradiographische Aufnahmen der Sekundärkaries

Die anderen Hälften, deren zervikale Füllungsänder 14 Tage der *Streptococcus-mutans*-Lösung ausgesetzt waren, wurden zunächst an den Schnittflächen mit aufsteigender Körnung (1200, 2400, 4000) an einem Poliergerät poliert und mit Sekundenkleber (Locite 493) auf einem Plexiglasobjektträger fixiert. Der Objektträger wurde zuvor mit einer abziehbaren Folie vorbereitet. Von den Proben wurden unter ständiger Wasserkühlung mit Hilfe einer Bandsäge (EXAKT) planparallele Schnitte von 300 µm Dicke hergestellt. Danach wurden diese Schnitte in einer Mikroschleifapparatur (EXAKT) mittels gewässertem Schleifpapier aufsteigender Körnung (1200, 2400, 4000) parallelisiert und auf einen Durchmesser von 100 µm gebracht. Gemessen wurde die endgültige Schichtstärke mit einem digitalen Mikrometer (Mitutoyo Deutschland, Neuss, Deutschland). Die Dünnschliffe wurden von den Objektträgern mit Abziehen der Folie gelöst und auf Haltern für die transversale Mikroradiographische (TMR) Aufnahme befestigt. Mit einem Röntgenstrahlgenerator (PW3830, Pananalytical, Kassel, Deutschland) wurden TMR-Aufnahmen der Proben angefertigt (20 KV, 20 mA, 10 Sekunden Belichtungszeit). Entwickelt und fixiert wurde der Film mit Kodak d-19 und Tetenal Superfix. Bei der Betrachtung der TMR Aufnahmen mit einem Durchlichtmikroskop (Axioplan 603 18, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) wurden mit einer Kamera (CFW 1312M, Scion, Frederick, USA) Bilder der zervikalen Füllungsänder angefertigt (Abb. 8). Die Aufnahmen wurden mit dem Transversal Micro Radiography Programm (TMR für Windows 525; UMCD, Groningen, Niederlande) auf einem Personalcomputer analysiert. Bei der Analyse wurde der

Mineralverlust (ΔZ) ermittelt. Beim Herstellungsprozess gingen drei der 32 Proben (9 %) verloren und konnten nicht erfasst werden.

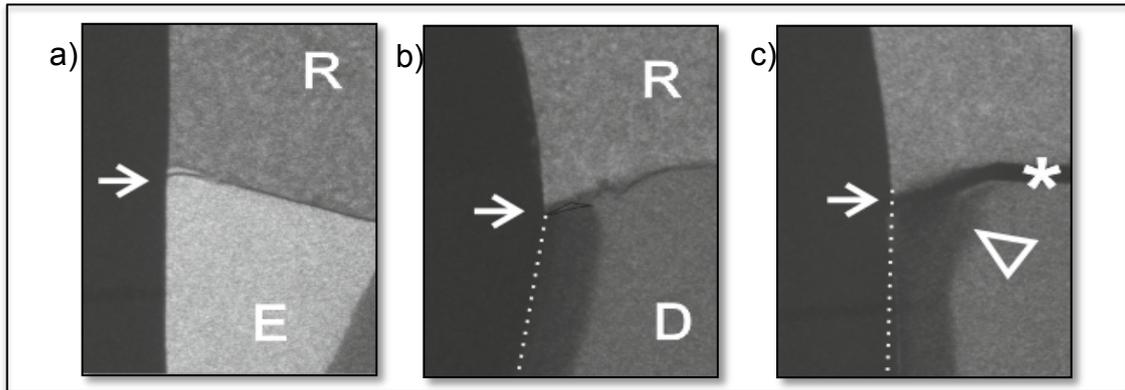


Abbildung 8: Mikroradiographische Aufnahmen der Restaurationsränder nach Erzeugung künstlicher Karies im Bakterienmodell. a) Restaurationsrand im Schmelz (E), b) Restaurationsrand im Dentin (D) bei homogener Demineralisierung, c) Restaurationsrand mit Wandläsionen im Dentin bei Versagen des Verbundes zwischen Restauration und Zahn (*). Schwendicke et al 2014 (3)

4.11 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung fand mit SPSS 22 (IBM, Armonk, USA) statt. Mit dem Shapiro-Wilk-Test wurden die Daten zunächst auf Normalverteilungen kontrolliert. Bei Normalverteilung wurde zum Vergleich von Gruppen der unabhängige t-Test genutzt. Bei nicht normal verteilten Daten wurde der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Für die Auswertungen mehrerer gepaarter Stichproben, bei denen teilweise keine Normalverteilung vorlag, wurde mit dem Friedman-Test verfahren, um diese auf Signifikanzen zu untersuchen. Zur Erfassung der ordinalskalierten Variablen wurde der χ^2 -Test benutzt. Das Signifikanzniveau wurde mit $p < 0,05$ festgelegt, wobei eine Bonferroni-Korrektur für multiples Testen durchgeführt wurde. Im Falle von nicht-signifikanten Unterschieden wurde die für eine statistische Signifikanz erforderliche Probenanzahl kalkuliert (required sample size, RSS). Dazu wurde G*Power 3.13 (Universität Kiel, Deutschland) eingesetzt.

5 Ergebnisse

5.1 Randspaltenanalyse

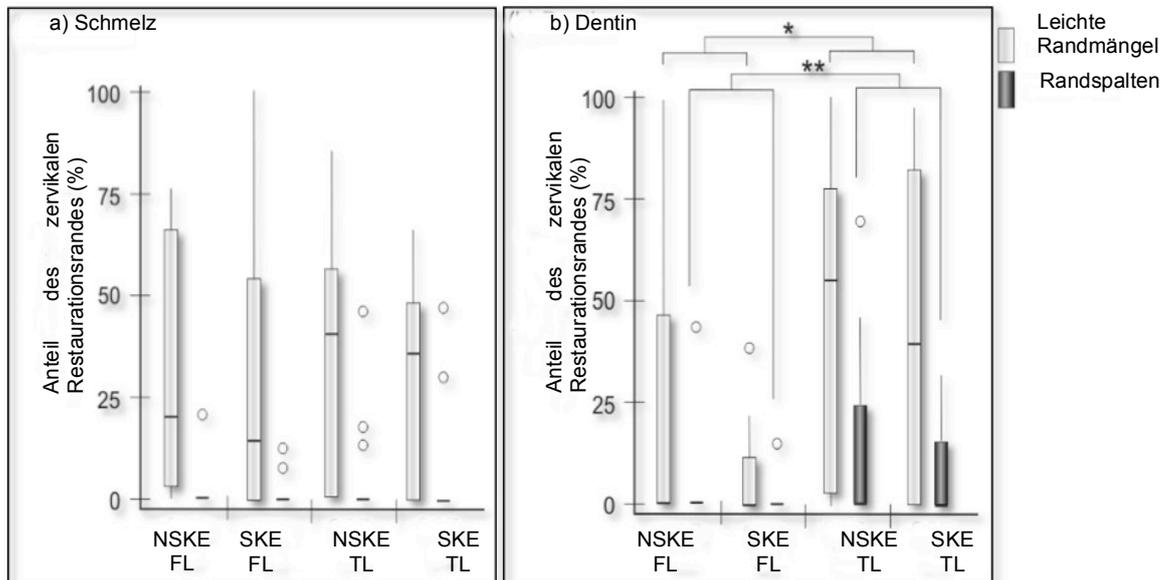


Abbildung 9: Anteil des Restaurationsrand in % mit leichten Randmängeln (hell grau) und Randspalten (>2 µm) (dunkel grau) in Schmelz (a) und Dentin (b) bei tiefen (TL) und flachen (FL) Läsionen sowie bei non-selektiver (NSKE) und selektiver (SKE) Exkavation. Die Boxen entsprechen dem Bereich in dem die mittleren 50 % der Daten liegen. Der Querstrich in der Box stellt den Median dar. Mit den Antennen („Whiskers“) ist das Minimum und Maximum angegeben. Signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind durch Sterne gekennzeichnet (*/** p = 0,05 / 0,01, Mann-Whitney). Ausreißer sind durch Kreise gekennzeichnet.

Es zeigte sich bei allen Gruppen, dass der Anteil der Restaurationsränder mit leichten Randmängeln signifikant höher war als der Anteil der Restaurationsränder mit Randspalten ($p < 0,001$, Friedman-test).

Bei den schmelzbegrenzten Restaurationen gab es zwischen den vier Gruppen mit unterschiedlichen Läsionstiefen und Exkavationsmethoden keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Anteil der Restaurationsränder mit leichten Randmängeln zu den Restaurationsrändern mit Randspalten ($p > 0,05$, Mann-Whitney, RIS = 42).

Bei den dentinbegrenzten Restaurationsrändern mit tiefen Läsionen war der Anteil an Randspalten signifikant höher als bei den dentinbegrenzten Restaurationsrändern mit flachen Läsionen ($p < 0,01$). Der Anteil der Randspalten unterschied sich aber innerhalb der Gruppe mit flachen und der Gruppe mit tiefen kariösen Läsionen nicht signifikant zwischen selektiver und non-selektiver Exkavation ($p = 0,350$, RIS = 35; Abbildung 9).

5.2 Farbstoffpenetrations-Versuch Auswertung

Die Vermessung der Penetrationstiefe des Farbstoffes zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Restaurationsrändern im Schmelz und den Restaurationsrändern im Dentin. Die Restaurationsränder im Schmelz zeigten signifikant weniger Farbstoffpenetration entlang des gingivo-zervikalen Restaurationsrandes als die Restaurationsränder im Dentin ($p < 0,05$). Es gab signifikant mehr Farbstoffpenetration bei dentinbegrenzten tiefen Läsionen als bei den dentinbegrenzten flachen Läsionen ($p > 0,05$, χ^2 -Test). Proben mit non-selektiver und selektiver Exkavation unterschieden sich nicht signifikant in der Farbstoffpenetration der gingivo-zervikalen oder pulpo-axialen Wänden ($p > 0,05$, RIS = 1209) (Tabelle 4, 5).

Tabelle 4: Aufstellung der Farbstoffpenetration der jeweiligen Kavitätenflächen gingivo-zervikal und pulpoaxial in % bei flachen und tiefen Läsionen sowie non-selektiver (NSKE) und selektiver (SKE) Exkavation bei den schmelzbegrenzten Restaurationen

Schmelz	Flache Läsionen		Tiefe Läsionen	
	NSKE	SKE	NSKE	SKE
N	8	8	7	8
Farbpenetration gingivo-zervikal (%)	25%	50%	73%	75%
Keine Farbstoffpenetration (%)	75%	50%	27%	25%
Farbpenetration pulpo-axial (%)	25%	0%	25%	13%
Keine Farbstoffpenetration (%)	75%	100%	75%	87%

Tabelle 5: Aufstellung der Farbstoffpenetration der jeweiligen Kavitätenflächen gingivo-zervikal und pulpoaxial in % bei flachen und tiefen Läsionen sowie non-selektiver (NSKE) und selektiver (SKE) Exkavation bei den dentinbegrenzten Restaurationen

Dentin	Flache Läsionen		Tiefe Läsionen	
	NSKE	SKE	NSKE	SKE
N	8	8	7	8
Farbpenetration gingivo-zervikal (%)	25%	63%	85%	75%
Keine Farbstoffpenetration (%)	75%	37%	15%	25%
Farbpenetration pulpo-axial (%)	25%	15%	50%	13%
Keine Farbstoffpenetration (%)	75%	85%	50%	87%

5.3 Mikroradiographische Auswertung der Sekundärkaries

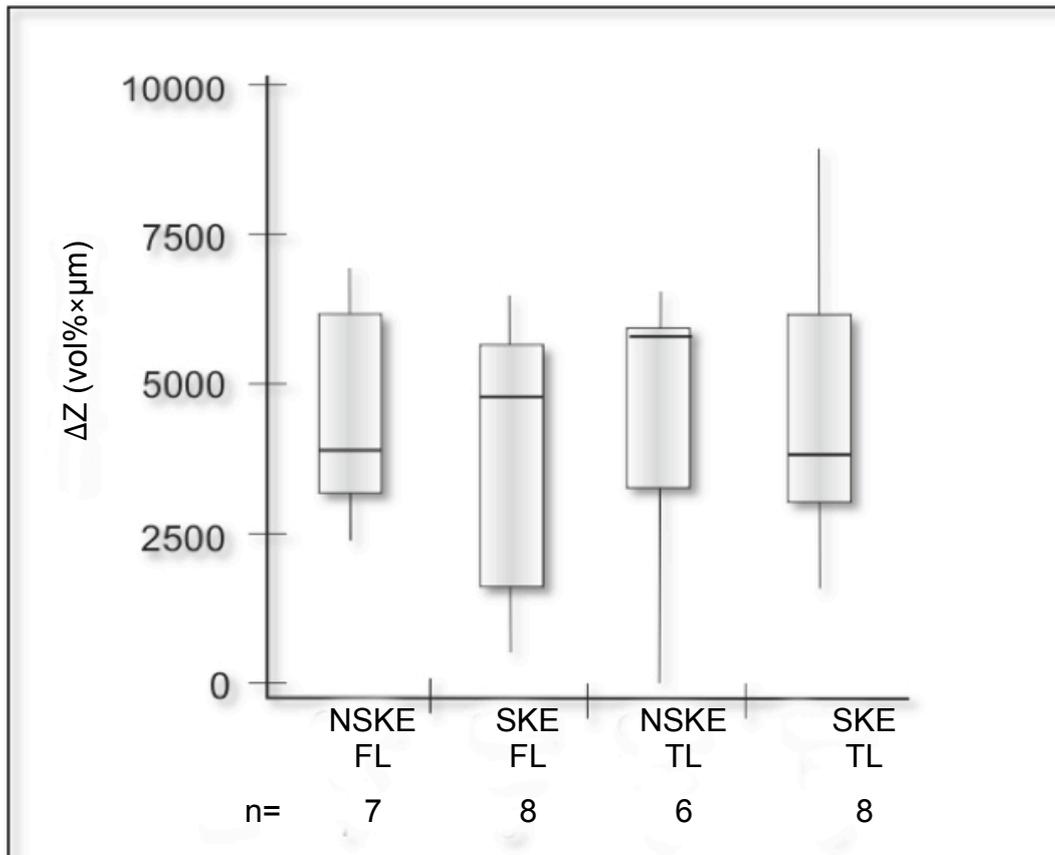


Abbildung 10: Mineralverlust (ΔZ) der an den Restaurationsrand angrenzenden kariösen Läsionen im Dentin bei tiefen (TL) und flachen (FL) kariösen Läsionen und non-selektiver (NSKE) sowie selektiver (SKE) Exkavation. Die Boxen entsprechen dem Bereich in dem die mittleren 50 % der Daten liegen. Der Querstrich in der Box stellt den Median dar. Mit den Antennen („Whiskers“) ist das Minimum und Maximum angegeben.

Der Mineralverlust (ΔZ) der im Schmelz liegenden Restaurationsränder war zu gering, um erfasst zu werden. Der Mineralverlust (ΔZ) der im Dentin liegenden Restaurationsränder war eindeutig und messbar. Wandläsionen waren hingegen kaum vorhanden (Abbildung 8). Es zeigt sich kein signifikanter Unterschied des Mineralverlustes (ΔZ) zwischen den Gruppen mit flachen und tiefen Läsionen ($p = 0,953$). Es konnte auch kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen mit kompletter Exkavation und selektiver Exkavation festgestellt werden ($p = 0,837$, $RSS = 53150$; Abbildung 10).

6 Diskussion

6.1 Diskussion der Methoden

6.1.1 Auswahl der Zähne und Vorbereitung

Bei den Versuchen wurden extrahierte menschliche Prämolaren verwendet. Diese wiesen keinerlei kariöse Läsionen, Restaurationen oder andere Defekte auf. Somit wurden für die Proben möglichst gleiche Voraussetzungen geschaffen. Es gibt keine Informationen darüber, welchen Belastungen diese Prämolaren im Laufe der Zeit vor der Extraktion oder bei der Extraktion ausgesetzt waren. Auch über das Alter der Patienten, denen die Prämolaren entnommen wurden, gibt es keine Informationen. Mögliche nicht sichtbare Veränderungen können demnach dennoch zu unterschiedlichen Voraussetzungen der Proben geführt haben. Die Versuchszähne wurden nach der Extraktion in 0,08 % Thymol gelagert. Es zeigt sich, dass Thymol keine negative Auswirkungen auf den Verbund von Komposit zum Zahn hat (46). Des Weiteren weist das Phenolderivat bakterizide und bakteriostatische Eigenschaften auf. Die Lagerung in 0,08 % Thymol ist somit eine gute Möglichkeit, um die Prämolaren vor dem Austrocknen zu schützen. Die Prämolaren wurden zur weiteren Vorbereitung mit Technovit, einem Akrylharz, senkrecht in Stahlhülsen eingebettet. Die Zähne waren starr eingebettet und hatten, im Unterschied zu Zähnen im Patientenmund, keine natürliche Eigenbeweglichkeit. Dies könnte durch eine künstliche Parodontalmembran, die diese Beweglichkeit simuliert, in zukünftigen Versuchen verbessert werden (47, 48).

6.1.2 Präparation

Die mesial-okklusal-distale Master-Präparation konnte durch ein Kopierfräßgerät exakt auf alle Prämolaren übertragen werden. Lediglich die zervikalen Restaurationsränder wurden individuell auf die vorgesehene Höhe gebracht, da die Höhe der Schmelz-Zement-Grenze sehr variabel ist. Die Präparationen zeigten auf diese Weise nur sehr geringe Abweichungen voneinander, sodass die Vergleichbarkeit der Versuchsobjekte gewährleistet war. Um die klinischen Bedingungen möglichst exakt zu simulieren, wurde die Präparation mit mittel- und feinkörnigen Diamanten durchgeführt. Dabei wurde ständig mit ausreichend

Wasser gekühlt, um Veränderungen in der Zahnhartsubstanz, die bei der Präparation durch Überhitzung entstehen können, zu vermeiden. *In vitro* lies sich eine Verbesserung der Schmelz-Komposit-Haftung feststellen, wenn Schmelzprimen durch eine Schmelzanschrägung quer angeschnitten werden (49). Klinisch gibt es dafür jedoch keinen Beweis, da Schmelzprismen bereits bei der Präparation schräg angeschnitten werden (50-53). Das Anschrägen zervikaler Schmelzränder führt teilweise, gerade bei geringen Restschmelzdimensionen, zum Verlust der Schmelzsubstanz. Aus diesem Grund wurde in diesem Versuch auf eine Schmelzanschrägung verzichtet.

6.1.3 Erzeugung künstlicher Kariesläsionen

Die Erzeugung künstlicher Kariesläsionen erfolgte bei den tiefen kariösen Läsionen mit Hilfe einer 0,5 molaren EDTA Lösung. EDTA ist ein Komplexbildner. EDTA bildet mit Kationen, wie zum Beispiel Calcium, stabile Komplexe. So entzieht die EDTA-Lösung der Zahnschmelz das Calcium. Die tiefen kariösen Läsionen, die durch die EDTA-Lösung entstanden, zeigten einen ausgedehnteren Mineralverlust im Vergleich zu natürlichen kariösen Läsionen. Die flachen kariösen Läsionen wurden mit einer Azetat-Lösung erzeugt und wiesen im Vergleich zu den tiefen künstlichen Läsionen einen sehr begrenzten Mineralverlust auf (54). Der strukturelle Aufbau der künstlich erzeugten kariösen Läsionen unterschied sich sowohl untereinander als auch zu der Struktur von natürlichen kariösen Läsionen. Klinisch bildet die Pulpa bei vitalen Zähnen Tertiärdentin an der Pulpa-Dentin-Grenze und schafft so eine weitere Schicht Zahnhartsubstanz. Diese natürliche Reaktion der Pulpa wurde in diesem *In-vitro*-Versuch nicht simuliert. Da das gebildete Tertiärdentin härter als das kariöse Dentin ist, werden dadurch die mechanischen Eigenschaften des Zahnes verbessert (55). Wegen der guten Reproduzierbarkeit wurden die kariösen Läsionen in diesem Versuch, trotz der Unterschiede zu natürlichen kariösen Läsionen, künstlich erzeugt (56, 57).

6.1.4 Exkavation und Restauration der Zähne

Die Exkavation der entsprechenden Versuchsgruppen wurde von einem erfahrenen Behandler mit Hilfe eines Handexkavators durchgeführt. Zur Überprüfung diente eine zahnärztliche Sonde. Es sollte exkaviert werden, bis nur noch hartes Dentin verblieben ist. Dies ist ein sehr subjektives Kriterium, dessen

Ergebnis zwischen unterschiedlichen Behandlern stark variieren kann. Dennoch wird es in klinischen Studien häufig angewandt (58). Um möglichst gleiche Exkavationsergebnisse zu erlangen, fand die Exkavation immer durch den selben Behandler statt.

Anschließend an die Exkavation erfolgte die Restauration. Als Haftvermittler wurde das OptibondFL System verwendet. Bei korrekter Anwendung erzielt es hohe und zuverlässige Haftkräfte und wird daher oft in Studien verwendet (59). Das OptibondFL System ist jedoch sehr techniksensitiv. Die Anwendung wurde aus diesem Grund streng nach Herstellerangaben durchgeführt. Kavitäten mit Schmelz- und Dentin-Beteiligung werden dabei für 15 Sekunden mit 37 % Phosphorsäure behandelt. Anschließend wird die Phosphorsäure 30 Sekunden lang sorgfältig abgesprüht. Längere Einwirkzeiten führen zu einer Überätzung im Dentin. Diese kann den Haftverbund zwischen Dentin und Komposit negativ beeinflussen. Durch die Überätzung würde das Kollagenetzwerk tief demineralisieren. Der Primer kann nicht vollständig in das tief freiliegende Kollagenetzwerk eindringen. Es kommt zur Hydrolyse der nicht durchdrungenen Kollagenfasern (60). Die ideale Einwirkzeit der 37% Phosphorsäure bei präpariertem Schmelz beträgt 30 Sekunden (61). Eine reduzierte Einwirkzeit von 15 Sekunden im Schmelz führt dennoch zu einem ausreichenden Retentionsmuster und Verbund zwischen Schmelz und Komposit. Um Überätzungen im Dentin zu vermeiden werden aus diesem Grund im Rahmen der Etch&Rinse-Technik Schmelz und Dentin für 15 Sekunden mit 37 % Phosphorsäure behandelt (62).

Bei der folgenden Restauration wurde in der Inkrementtechnik die Kavität gefüllt. Einzelne Inkremente sollten dabei nicht dicker als 2 mm sein und eine möglichst große freie Oberfläche aufweisen. So kann das Licht das gesamte Inkrement durchdringen und Spannungen, die durch die Schrumpfung des Komposites bei der Polymerisation entstehen, werden so gering wie möglich gehalten (63). Auf die Anwendung der Matrizentechnik wurde wegen der guten Erreichbarkeit der Kavität verzichtet. Ein einwandfreier Randschluss wurde vor Versuchsbeginn mit Hilfe von Replika im Rasterelektronenmikroskop sichergestellt.

6.1.5 Künstliche Alterung

Mit der Belastung im Kausimulator wurde eine Alterung der Restaurationen von fünf Jahren simuliert. Um eine möglichst natürliche Belastung, wie sie beim Kauen entsteht, zu simulieren, wurde zusätzlich eine Abgleitbewegung durchgeführt. Studien schätzen, dass Zähne im Jahr durch die natürlichen Funktionen wie Schlucken, Sprechen und die Nahrungsaufnahme ca. 250.000 Kauzyklen ausgesetzt sind (64, 65). Aus diesem Grund wurden die Proben $1,2 \times 10^6$ Kauzyklen ausgesetzt, um eine Alterung von fünf Jahren zu simulieren. Viele Studien verwenden zur künstlichen Alterung diese Zyklenzahl, auch wenn Parafunktionen wie zum Beispiel Bruxismus hierbei nicht berücksichtigt werden (48, 66). Für eine möglichst natürliche Alterung ist die Simulation von Temperaturschwankungen im Patientenmund durch die Aufnahme von kalten und heißen Speisen notwendig. Die Proben wurden 10.000 Thermobelastungszyklen ausgesetzt, um eine einjährige thermische Alterung zu simulieren (67). Durch den Wechsel von kalt und warm kommt es durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Restauration und Zahnhartsubstanz zu Spannungen, die zu einem Haftverlust am Restaurationsrand führen können. Es kann zur Randspaltenbildung kommen (68). Die Arbeitsgruppen um Wendt et al. 1992 und Pazinato et al. 2004 konnten jedoch keinen Unterschied bei der Farbstoffpenetration mit und ohne Thermobelastungszyklen feststellen. Sie bezweifeln aus diesem Grund die Bedeutung der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten und der daraus resultierenden Spannungen am Restaurationsrand, die wiederum zu Randspalten führen können (69, 70). Diese Studien verwendeten jedoch lediglich thermische Belastungszyklen und verzichteten auf mechanische Belastung. Eine Kombination von thermischer und mechanischer Belastung, wie sie in dieser Versuchsreihe verwendet wurde, scheint der natürlichen Situation und der damit einhergehenden Alterung somit am nächsten zu kommen. Trotz der fehlenden Parafunktionen bei der mechanischen Belastung und der unklaren Rolle der thermischen Wechselbäder ist diese Form der künstlichen Alterung eine Möglichkeit, alle Proben gleichermaßen mechanischer und thermischer Belastung auszusetzen und so eine gute Vergleichbarkeit aller Proben zu gewährleisten.

6.1.6 Rasterelektronenmikroskopische Auswertung und Farbstoffpenetration

Für die Herstellung der Replika zur Randspaltenanalyse wurden vor und nach der künstlicher Alterung Abformungen von den approximalen Zahnflächen mit einem Polyvinyl-Siloxan Abformmaterial genommen. Es handelt sich dabei um ein bewährtes Abformmaterial, welches in der Klinik Anwendung bei Präzisionsabformungen findet. Die Gefahren bei jeder Abformung sind Ungenauigkeiten, die bei der Abformung entstehen. Deshalb wurden die Flächen zunächst mit einer dünnen Schicht des Abformmaterials versehen. Diese wurde vorsichtig mit Druckluft auf der Oberfläche verblasen. Danach wurde eine zweite Phase des Abformmaterials aufgetragen. Auf diese Weise wurde eine hochpräzise Darstellung der Oberfläche sichergestellt. Die Abformungen wurden mit einem Epoxidharz ausgegossen. Die Verwendung von Replikamodellen ist eine etablierte Technik bei der rasterelektronenmikroskopischen Randanalyse, da hierdurch die Möglichkeit gegeben ist, verschiedene Zustandsänderungen der Probenkörper (vor und nach der künstlichen Alterung) zu untersuchen. Eine direkte Untersuchung der natürlichen Proben würde zu ihrer Austrocknung und somit zu artifiziell gebildeten Spalten führen. In anderen Studien hatte sich die Betrachtung mit 200-facher Vergrößerung und eine Einteilung der Restaurationsränder in fünf Kategorien, je nach Randqualität, bereits bewährt (40). Später wurden für jeden Rand dabei die prozentualen Anteile jeder festgestellten Randqualität zur Gesamtlänge ermittelt und statistisch weiterverarbeitet. Die rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen liefern detaillierte Information über die Probenoberfläche. Eine Aussage, inwiefern sich die Randspalten, die an der Oberfläche zu messen waren, in die Tiefe der Restauration fortsetzen, ist nicht möglich. Zudem zeigt sich, dass es beim gleichen Betrachter Unterschiede in der Kategorisierung der Proben gibt, wenn dieser bereits vermessene Proben nach einigen Wochen nochmals untersucht (40).

Für die Vermessung einer Stoffpenetration entlang der Kavitätenwand steht eine weite Bandbreite von Testmöglichkeiten zur Verfügung, z.B. bakterielle, chemische und radioaktive Testsubstanzen, die man in die Spalten penetrieren lässt. Anschließend wird die Eindringtiefe vermessen und so Rückschlüsse auf die Integrität des Restaurationsrandes gezogen. Die geläufigste Möglichkeit ist die Verwendung von Farbstofflösungen, wie sie auch im Rahmen dieser Arbeit benutzt wurde (71, 72). Bei der Farbstoffpenetration wurde die gesamte

Zahnoberfläche, mit Ausnahme des Restaurationsrandes, mit Nagellack abgedeckt. Andere Studien nutzten ebenfalls erfolgreich Nagellack als Penetrationsschutz bei der Farbstoffpenetration. Auf diese Weise war es dem Farbstoff lediglich möglich, über den Restaurationsrand einzudringen. So konnte die Integrität des Restaurationsrandes beurteilt werden. Für die Farbstoffpenetration eignen sich viele Farbstoffe, die sich in ihrer Affinität zum Substrat und Molekülgröße unterscheiden. In dieser Studie wurde Säurefuchsin mit einer Einwirkzeit von 24 Stunden als Farblösung genutzt. Dieser Farbstoff und die entsprechende Penetrationszeit haben sich bereits in anderen Studien zur Randspaltenanalyse bewährt (39). Mixson et al. 1991 konnte keine signifikanten Unterschiede der Farbstoffpenetration an verschiedenen Schnittflächen der Proben feststellen. Ein einmaliger Schnitt durch die Restauration scheint demnach ausreichende Informationen über die Farbstoffpenetrationstiefen geben zu können und minimiert das Risiko der Beschädigung der Proben, welches durch das Schneiden entsteht (73). Auch in dieser Studie wurden die Proben aus diesem Grund einmalig zentral geschnitten und beurteilt. Unklar ist, ob die *in vitro* gemessene Farbstoffpenetration mit der Randintegrität *in vivo* korreliert. Faktoren wie der hydrostatische Druck der Pulpa werden bei der In-vitro-Untersuchung nicht berücksichtigt (74). Die molekulare Größe der Farbstoffpartikel unterscheidet sich zudem von der Größe von Bakterien. Unklar ist demnach, ob Bakterien *in vivo* in die *in vitro* durch die Farbstoffpenetration festgestellten Randundichtigkeiten penetrieren und zu der Bildung von Sekundärkaries führen. Zur Beurteilung der Qualität des Restaurationsrandes werden dennoch in vielen Studien sowohl die Farbstoffpenetration als auch die rasterelektronenmikroskopische Auswertung herangezogen. Die Ergebnisse der quantitativen Randspaltvermessung mit dem Rasterelektronenmikroskop und die Auswertung der Farbstoffpenetration führen zu detaillierten Informationen zur Integrität des Restaurationsrandes (75-77). Allerdings korrelieren die Ergebnisse der Randspaltenvermessung und der Farbstoffpenetration nicht in jedem Fall miteinander. Dies kann möglicherweise durch Eindringen von Farbe über sehr kleine Eintrittsspalten in die Tiefe und nachfolgender flächiger Ausdehnung erklärt werden. Möglicherweise sind auch bei der rasterelektronenmikroskopischen Randspaltenanalyse oberflächlich verlaufende Risse, die sich nicht in die Tiefe ausdehnen und sich deshalb im

Farbstoffpenetrationsversuch kaum auswirken, verantwortlich für diese Beobachtung.

6.1.7 Erzeugung künstlicher Sekundärkaries und transversale Mikroradiographie

Zusätzlich zu den oben genannten Verfahren der Untersuchung der Restaurationsrandqualität durchliefen die Proben ein Modell zur Erzeugung von künstlicher Sekundärkaries. Dabei wurden die Proben 14 Tage lang einem künstlichen Mundmodell ausgesetzt. Die Proben wurden mit *Streptococcus mutans* (SM) beimpft. In regelmäßigen Abständen wurde eine Zuckerlösung zugeführt (43-45). Auf diese Weise sollten die Bedingungen nachgestellt werden, unter denen *in vivo* kariöse Läsionen entstehen. *In vivo* besteht allerdings keine Monokultur aus SM. Ebenso wurden Faktoren, wie Mundhygiene-Maßnahmen und Fluoridzufuhr, nicht simuliert. Auf diese Weise konnten in einem kurzen Zeitraum kariöse Läsionen induziert werden. Es ist anzunehmen, dass der Zeitraum, in dem *in vivo* vergleichbare kariöse Läsionen entstehen können, wesentlich länger ist. Dennoch scheint es wahrscheinlich, dass diese durch SM entstandenen Läsionen weiteren Aufschluss über die Restaurationsqualität *in vivo* geben können (43). Auch in anderen Studien wurde diese Methode zur Beurteilung der Randintegrität von Restaurationen erfolgreich angewandt (78). Im Rahmen dieser Arbeit wurden sowohl etablierte Methoden, wie die Farbstoffpenetration und die Rasterelektronenmikroskopie, als auch neuere Methoden wie das künstliche Mundmodell angewandt. Auf diese Weise sollten möglichst aussagekräftige Informationen gesammelt werden, um Rückschlüsse auf die Langlebigkeit der Restaurationen ziehen zu können.

Zur quantitativen Auswertung der Veränderung der Mineraldichte durch die Sekundärkaries wurde die transversale Mikroradiographie durchgeführt. Die Proben wurden in Kunststoff eingebettet. Anschließend wurden Dünnschliffe hergestellt von denen Radiographien angefertigt wurden. Demineralisierte Bereiche einer Probe von Zahnhartgewebe besitzen eine geringere Röntgenopazität als gesunde Bereiche und absorbieren deshalb weniger stark. Dies führt zu einer dunkleren Färbung des Röntgenfilms. Durch die mikroskopische Auswertung der verschiedenen Schwärzungen mit den unterschiedlichen Graustufen sind exakte quantitative Aussagen über Veränderungen der Mineraldichte der Zahnhartsubstanz möglich. Die

Mikroradiographien lassen sich über eine Kamera digitalisieren. Mithilfe der TMR-Software sind Veränderungen der Mineraldichte graphisch darstellbar. Die transversale Mikroradiographie ist eine sehr praktikable und sehr messgenaue Methode zur direkten und quantitativen Bestimmung des Mineralgehaltes sowie Veränderungen und Verteilung des Mineralgehaltes (79, 80). Von Nachteil ist der hohe Zeitaufwand der Auswertung, die sehr techniksensitive Herstellung der Dünnschliffe und die damit verbundene mögliche Zerstörung von Proben.

6.2 Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Randspaltenanalyse

Die rasterelektronenmikroskopische Randspaltenanalyse zeigte zunächst, dass der Anteil der Restaurationsränder mit leichten Randmängeln insgesamt signifikant höher war als der Anteil mit Randspalten. Es ist davon auszugehen, dass leichte Randmängel klinisch für die Restaurationsbeständigkeit nur bedingt relevant sind.

Die Integrität schmelzbegrenzter Restaurationen unterschied sich weder zwischen Zähnen mit tiefen versus flachen Residualläsionen noch zwischen selektiver und non-selektiver Exkavationsmethode signifikant. Bei einer größeren Fallzahl von schätzungsweise 42 könnten jedoch Unterschiede mit statistischer Signifikanz zwischen Zähnen mit tiefen und Zähnen mit flachen Residualläsionen festgestellt werden. Im Gegensatz dazu war bei den dentinbegrenzten Restaurationsrändern der Anteil der Randspalten signifikant höher bei Zähnen mit tiefen Läsionen im Vergleich zu den flachen Läsionen. Innerhalb dieser Gruppen konnten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen selektiver und non-selektiver Exkavation festgestellt werden. Auch hier würden Unterschiede wahrscheinlich bei einer größeren Fallzahl von circa 35 statistisch signifikant werden.

Die Häufigkeit, mit der Randspalten am Restaurationsrand vorkommen, scheint demnach mit der Lokalisation des Randes und der Tiefe der Residualläsion assoziiert zu sein. Einen Zusammenhang mit der Exkavationsstrategie fanden wir nicht. Ebenso scheint die non-selektive Exkavation keinen Vorteil beim Verhindern der Bildung von Randspalten zu haben.

6.2.2 Farbstoffpenetrationsversuch

Die Vermessung der Penetrationstiefe des Farbstoffes zeigte signifikant mehr Farbstoffpenetration bei Restaurationsrändern im Dentin als bei Restaurationsrändern im Schmelz. Innerhalb der dentinbegrenzten Restaurationsränder gab es signifikant mehr Farbstoffpenetration bei Zähnen mit tiefen Residualläsionen als bei den flachen Läsionen. Proben mit non-selektiver und selektiver Exkavation unterschieden sich nicht signifikant in der Farbstoffpenetration. Nur bei sehr hohen Fallzahlen (schätzungsweise 1209) könnten Unterschiede mit statistischer Signifikanz zwischen Proben mit selektiver und non-selektiver Exkavation feststellbar sein. Die Relevanz dieser Unterschiede ist vermutlich begrenzt.

Die Farbstoffpenetrationstiefe scheint demnach mit der Lokalisation des Randes und der Tiefe der Residualläsion assoziiert zu sein. Einen Zusammenhang mit der Exkavationsstrategie fanden wir nicht.

6.2.3 Mikroradiographische Auswertung

Bei der mikroradiographischen Auswertung konnte bei den schmelzbegrenzten Restaurationen kein messbarer Mineralverlust gemessen werden. Hingegen war bei dentinbegrenzten Restaurationsrändern der Mineralverlust eindeutig messbar. Ein Grund hierfür kann die geringere Säurelöslichkeit von Schmelz und der damit verbundene langsamere Fortschritt kariöser Läsionen im Schmelz im Vergleich zu kariösen Läsionen im Dentin sein. Dadurch könnte der Zeitraum von 14 Tagen für die Entstehung messbarer kariöser Läsionen im Schmelz nicht ausreichend gewesen sein.

Bei den dentinbegrenzten Restaurationsrändern zeigte sich weder ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen mit tiefen und flachen Läsionen noch zwischen der non-selektiven und selektiven Exkavation. Die Demineralisierungen verliefen fast alle entlang der Zahnoberfläche. Dies könnte ein Zeichen dafür sein, dass die kariösen Läsionen von der Zahnoberfläche aus entstanden und es den Bakterien nicht möglich war zwischen Restauration und Zahn einzudringen. Der adhäsive Verbund zwischen Zahn und Restauration scheint demnach intakt. Lediglich drei Proben zeigten Entmineralisierungen, die vom Kavitätenboden her entstanden. Ein Grund dafür kann das Versagen des adhäsiven Verbundes sein.

Auf diese Weise konnten Bakterien durch Randspalten in den Restaurationsrand eindringen und zu Entmineralisierungen vom Kavitätenboden aus führen.

7 Schlussfolgerung

Diese Versuche belegen, dass es keinen signifikanten Unterschied der Restaurationsrandintegrität zwischen non-selektiver Exkavation und selektiver Exkavation gibt. Weder die Randspaltenanalyse noch die Farbstoffpenetration oder die mikroradiographische Auswertung von induzierter Sekundärkaries zeigten eine nachteilige Restaurationsrandqualität von selektiv versus non-selektiv exkavierten Proben. Vielmehr war die Tiefe der kariösen Residualläsion und das Adhäsionssubstrat (Schmelz vs. Dentin) entscheidend.

Innerhalb der Limitation dieser In-vitro-Studie lässt sich schlussfolgern, dass sich das Belassen von Residualkaries nicht negativ auf die Randintegrität der Restauration auswirkt. Die selektive Exkavation kann so, insbesondere bei tiefen kariösen Läsionen, das pulpale Risiko des Zahnes vermindern, ohne die Qualität der anschließenden Restauration negativ zu beeinflussen. Weitere In-vitro-Studien mit größeren Fallzahlen könnten hilfreich sein, um diese Ergebnisse zu überprüfen. Ebenso wären klinische Studien zur Überprüfung der Ergebnisse wünschenswert.

8 Literaturverzeichnis

1. Hellwig E, Klimek, J., Attin, T. *Einführung in die Zahnerhaltung*. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag; 2010.
2. Schroeder H.E., *Pathobiologie oraler Strukturen*. München: Karger; 1991.
3. Schwendicke F, Kern M, Blunck U, Dorfer C, Drenck J, Paris S. Marginal integrity and secondary caries of selectively excavated teeth in vitro. *J Dent*. 2014;42(10):1261-8.
4. Schroeder H. *Orale Strukturbiologie*: Thieme; 1992.
5. Gwinnett AJ. Structure and composition of enamel. *Oper Dent*. 1992;Suppl 5:10-7.
6. Schuhmacher GH. *Anatomie Band 1*. Leipzig: Barth; 1991.
7. Herting HC. [Electron microscopic studies on carious dentin. II]. *Dtsch Zahnarztl Z*. 1966;21(9):1085-94.

8. Herting HC. [Electron Microscopic Studies on Carious Dentin]. Dtsch Zahnarztl Z. 1965;20:SUPPL:704-16.
9. Welsch U. *Sobotta Lehrbuch Histologie*: Urban & Fischer; 2005.
10. Lehmann KM, Hellwig, E., Wenz, H.-J. *Zahnärztliche Propädeutik Einführung in die Zahnheilkunde*. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag; 2008.
11. Keyes PH. Recent advances in dental caries research. Bacteriological findings and biological implications. Int Dent J. 1962;12:443.
12. König KG. Karies und Kariesprophylaxe. Goldmann; 1971:33.
13. Loesche WJ. Chemotherapy of dental plaque infections. Oral Sci Rev. 1976;9:65-107.
14. Marsh PD. Microbial ecology of dental plaque and its significance in health and disease. Adv Dent Res. 1994;8(2):263-71.
15. Menaker L. *The biologic basis of dental caries*. Hagerstown: 1980; 1980.
16. Schroeder HE. *Pathobiologie oraler Strukturen: Zähne, Pulpa, Parodont*. Freiburg i.B.: Karger; 1996.
17. Takahashi N, Nyvad B. Ecological Hypothesis of Dentin and Root Caries. Caries Res. 2016;50(4):422-31.
18. Klimm W. *Kariologie*. Wien: Hanser Fachbuch; 1997.
19. Meyer-Lueckel H, Paris S. Improved resin infiltration of natural caries lesions. J Dent Res. 2008;87(12):1112-6.
20. Meyer-Lueckel H, Bitter K, Paris S. Randomized controlled clinical trial on proximal caries infiltration: three-year follow-up. Caries Res. 2012;46(6):544-8.
21. Paris S, Meyer-Lueckel H. Inhibition of caries progression by resin infiltration in situ. Caries Res. 2010;44(1):47-54.
22. Innes NP, Evans DJ, Stirrups DR. The Hall Technique; a randomized controlled clinical trial of a novel method of managing carious primary molars in general dental practice: acceptability of the technique and outcomes at 23 months. BMC Oral Health. 2007;7:18.
23. Innes NP, Evans DJ, Stirrups DR. Sealing caries in primary molars: randomized control trial, 5-year results. J Dent Res. 2011;90(12):1405-10.
24. Bakhshandeh A, Qvist V, Ekstrand KR. Sealing occlusal caries lesions in adults referred for restorative treatment: 2-3 years of follow-up. Clin Oral Investig. 2012;16(2):521-9.
25. Kidd EA. How 'clean' must a cavity be before restoration? Caries Res. 2004;38(3):305-13.
26. 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.
27. 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.
28. Whitworth JM, Myers PM, Smith J, Walls AW, McCabe JF. Endodontic complications after plastic restorations in general practice. Int Endod J. 2005;38(6):409-16.
29. Bjorndal L, Reit C, Bruun G, Markvart M, Kjaeldgaard M, Nasman P, Thordrup, M., Dige I, Nyvad B, Fransson H, Lager A, Ericson D, Petersson K, Olsson J, Santimano E M, Wennstrom A, Winkel P, Gluud C. Treatment of deep caries lesions in adults: randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. Eur J Oral Sci. 2010;118(3):290-7.

30. 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.
31. Bjorndal L, Thylstrup A. A practice-based study on stepwise excavation of deep carious lesions in permanent teeth: a 1-year follow-up study. *Community Dent Oral Epidemiol.* 1998;26(2):122-8.
32. Oliveira EF, Carminatti G, Fontanella V, Maltz M. The monitoring of deep caries lesions after incomplete dentine caries removal: results after 14-18 months. *Clin Oral Investig.* 2006;10(2):134-9.
33. Maltz M, Garcia R, Jardim JJ, de Paula LM, Yamaguti PM, Moura MS, Garcia F, Nascimento C, Oliveira A, Mestrinho H D. Randomized trial of partial vs. stepwise caries removal: 3-year follow-up. *J Dent Res.* 2012;91(11):1026-31.
34. Schwendicke F, Frencken JE, Bjorndal L, Maltz M, Manton DJ, Ricketts D, Van Landuyt K, Banerjee A, Campus G, Domejean S, Fontana M, Leal S, Lo E, Machiulskiene V, Schulte A, Splieth C, Zandona A F, Innes N P. Managing Carious Lesions: Consensus Recommendations on Carious Tissue Removal. *Adv Dent Res.* 2016;28(2):58-67.
35. Yoshiyama M, Doi J, Nishitani Y, Itota T, Tay FR, Carvalho RM, Pashley D H. Bonding ability of adhesive resins to caries-affected and caries-infected dentin. *J Appl Oral Sci.* 2004;12(3):171-6.
36. Yoshiyama M, Tay FR, Doi J, Nishitani Y, Yamada T, Itou K, Carvalho R M, Nakajima M, Pashley D H. Bonding of self-etch and total-etch adhesives to carious dentin. *J Dent Res.* 2002;81(8):556-60.
37. 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.
38. 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.
39. Moorthy A, Hogg CH, Dowling AH, Grufferty BF, Benetti AR, Fleming GJ. Cuspal deflection and microleakage in premolar teeth restored with bulk-fill flowable resin-based composite base materials. *J Dent.* 2012;40(6):500-5.
40. Roulet JF, Reich T, Blunck U, Noack M. Quantitative margin analysis in the scanning electron microscope. *Scanning Microsc.* 1989;3(1):147-58; discussion 58-9.
41. Arends J, ten Bosch JJ. Demineralization and remineralization evaluation techniques. *J Dent Res.* 1992;71 Spec No:924-8.
42. Steiner M, Mitsias ME, Ludwig K, Kern M. In vitro evaluation of a mechanical testing chewing simulator. *Dent Mater.* 2009;25(4):494-9.
43. Schwendicke F, Dorfer C, Kneist S, Meyer-Lueckel H, Paris S. Cariogenic effects of probiotic *Lactobacillus rhamnosus* GG in a dental biofilm model. *Caries Res.* 2014;48(3):186-92.
44. Takada K, Hirasawa M. A novel selective medium for isolation of *Streptococcus mutans*. *J Microbiol Methods.* 2005;60(2):189-93.
45. Wong L, Sissons C. A comparison of human dental plaque microcosm biofilms grown in an undefined medium and a chemically defined artificial saliva. *Arch Oral Biol.* 2001;46(6):477-86.
46. Williams VD, Svare CW. The effect of five-year storage prior to bonding on enamel/composite bond strength. *J Dent Res.* 1985;64(2):151-4.

47. Attia A, Kern M. Influence of cyclic loading and luting agents on the fracture load of two all-ceramic crown systems. *J Prosthet Dent.* 2004;92(6):551-6.
48. Kern M, Douglas WH, Fechtig T, Strub JR, DeLong R. Fracture strength of all-porcelain, resin-bonded bridges after testing in an artificial oral environment. *J Dent.* 1993;21(2):117-21.
49. Carvalho RM, Santiago SL, Fernandes CA, Suh BI, Pashley DH. Effects of prism orientation on tensile strength of enamel. *J Adhes Dent.* 2000;2(4):251-7.
50. Kramer N, Garcia-Godoy F, Frankenberger R. Evaluation of resin composite materials. Part II: in vivo investigations. *Am J Dent.* 2005;18(2):75-81.
51. Kramer N, Garcia-Godoy F, Reinelt C, Feilzer AJ, Frankenberger R. Nanohybrid vs. fine hybrid composite in extended Class II cavities after six years. *Dent Mater.* 2011;27(5):455-64.
52. Kramer N, Kunzelmann KH, Garcia-Godoy F, Haberlein I, Meier B, Frankenberger R. Determination of caries risk at resin composite margins. *Am J Dent.* 2007;20(1):59-64.
53. Kramer N, Reinelt C, Garcia-Godoy F, Taschner M, Petschelt A, Frankenberger R. Nanohybrid composite vs. fine hybrid composite in extended class II cavities: clinical and microscopic results after 2 years. *Am J Dent.* 2009;22(4):228-34.
54. Schwendicke F, Eggers K, Meyer-Lueckel H, Dorfer 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.
55. Zheng L, Hilton JF, Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GW. Dentin caries activity status related to hardness and elasticity. *Eur J Oral Sci.* 2003;111(3):243-52.
56. Moron BM, Comar LP, Wiegand A, Buchalla W, Yu H, Buzalaf MA, Magalhaes A C. Different protocols to produce artificial dentine carious lesions in vitro and in situ: hardness and mineral content correlation. *Caries Res.* 2013;47(2):162-70.
57. Marquezan M, Correa FN, Sanabe ME, Rodrigues Filho LE, Hebling J, Guedes-Pinto AC, Mendes F M. Artificial methods of dentine caries induction: A hardness and morphological comparative study. *Arch Oral Biol.* 2009;54(12):1111-7.
58. Schwendicke F, Meyer-Lueckel H, Dorfer C, Paris S. Attitudes and behaviour regarding deep dentin caries removal: a survey among German dentists. *Caries Res.* 2013;47(6):566-73.
59. Asmussen E, Peutzfeldt A. Short- and long-term bonding efficacy of a self-etching, one-step adhesive. *J Adhes Dent.* 2003;5(1):41-5.
60. Frankenberger R, Kramer N, Petschelt A. Technique sensitivity of dentin bonding: effect of application mistakes on bond strength and marginal adaptation. *Oper Dent.* 2000;25(4):324-30.
61. Frankenberger R, Lohbauer U, Roggendorf MJ, Naumann M, Taschner M. Selective enamel etching reconsidered: better than etch-and-rinse and self-etch? *J Adhes Dent.* 2008;10(5):339-44.
62. Van Meerbeek B, Kanumilli PV, De Munck J, Van Landuyt K, Lambrechts P, Peumans M. A randomized, controlled trial evaluating the three-year clinical effectiveness of two etch & rinse adhesives in cervical lesions. *Oper Dent.* 2004;29(4):376-85.
63. Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res.* 1987;66(11):1636-9.
64. DeLong R, Pintado M, Douglas WH. Measurement of change in surface contour by computer graphics. *Dent Mater.* 1985;1(1):27-30.

65. 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.
66. Kern M, Strub JR, Lu XY. Wear of composite resin veneering materials in a dual-axis chewing simulator. *J Oral Rehabil.* 1999;26(5):372-8.
67. Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent.* 1999;27(2):89-99.
68. Bullard RH, Leinfelder KF, Russell CM. Effect of coefficient of thermal expansion on microleakage. *J Am Dent Assoc.* 1988;116(7):871-4.
69. Wendt SL, McInnes PM, Dickinson GL. The effect of thermocycling in microleakage analysis. *Dent Mater.* 1992;8(3):181-4.
70. Pazinato FB, Campos BB, Costa LC, Atta MT. Effect of the number of thermocycles on microleakage of resin composite restorations. *Pesqui Odontol Bras.* 2003;17(4):337-41.
71. Smith ED, Martin FE. Microleakage of glass ionomer/composite resin restorations: a laboratory study. 1. The influence of glass ionomer cement. *Aust Dent J.* 1992;37(1):23-30.
72. Gladys S, Van Meerbeek B, Lambrechts P, Vanherle G. Microleakage of adhesive restorative materials. *Am J Dent.* 2001;14(3):170-6.
73. Mixson J, Eick JD, Chappell RP, Tira DE, Moore DL. Comparison of two-surface and multiple-surface scoring methodologies for in vitro microleakage studies. *Dent Mater.* 1991;7(3):191-6.
74. Kidd EA. Microleakage: a review. *J Dent.* 1976;4(5):199-206.
75. Friedl KH, Schmalz G, Hiller KA, Mortazavi F. Marginal adaptation of composite restorations versus hybrid ionomer/composite sandwich restorations. *Oper Dent.* 1997;22(1):21-9.
76. Schuckar M, Geurtsen W. Proximo-cervical adaptation of Class II-composite restorations after thermocycling: a quantitative and qualitative study. *J Oral Rehabil.* 1997;24(10):766-75.
77. Al-Boni R, Raja OM. Microleakage evaluation of silorane based composite versus methacrylate based composite. *J Conserv Dent.* 2010;13(3):152-5.
78. Nassar HM, Gonzalez-Cabezas C. Effect of gap geometry on secondary caries wall lesion development. *Caries Res.* 2011;45(4):346-52.
79. Damen JJ, Exterkate RA, ten Cate JM. Reproducibility of TMR for the determination of longitudinal mineral changes in dental hard tissues. *Adv Dent Res.* 1997;11(4):415-9.
80. Buskes JA, de Josselin de Jong E, Christoffersen J, Arends J. Microradiographic study on the demineralization of thick enamel sections: a constant composition study. *Caries Res.* 1987;21(1):15-21.

Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Josephine Katharina Bodi, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „In Vitro Analyse der Randqualität von Kompositrestaurationen nach non-selektiver und selektiver Kariesexkavation“ 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.“

Ort, Datum

Unterschrift

Anteilserklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Josephine Katharina Bodi, geb. Drenck, hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1:

Schwendicke F, Kern M, Blunck U, Dorfer C, Drenck J, Paris S. Marginal integrity and secondary caries of selectively excavated teeth in vitro. J Dent. 2014;42(10):1261-8.

Beitrag im Einzelnen (bitte kurz ausführen):

- Entwicklung und Durchführung der gesamten Versuche
- Auswertung und Interpretation der Ergebnisse Rasterelektronenmikroskopie, Farbstoffpenetration und der Mikroradiographie
- Mit-Verfassen des Manuskriptes
- aus meiner statistischen Auswertung sind die Tabellen 4 und 5 sowie die Abbildungen 9 und 10 entstanden

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers/der betreuenden Hochschullehrerin

Unterschrift des Doktoranden/der Doktorandin

9 Lebenslauf

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

10 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich meinen besonderen Dank nachstehenden Personen entgegen bringen, ohne deren Mithilfe die Anfertigung dieser Promotionsschrift niemals zustande gekommen wäre:

An erster Stelle gilt mein Dank PD Dr. Falk Schwendicke und Prof. Dr. Sebastian Paris aus der Abteilung für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin (Charité Universitätsmedizin Berlin) für Ihre wissenschaftliche und methodische Unterstützung während der gesamten Bearbeitungsphase meiner Dissertation.

Mein großer Dank gilt Herrn Prof Dr. C. Dörfer, der als Direktor der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie (UKSH Kiel) das Umfeld für diese wissenschaftliche Arbeit zur Verfügung gestellt hat. Herrn Prof. Dr. M. Kern danke ich dafür, dass ich die Gerätschaften der Klinik für zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffkunde (UKSH Kiel) für die Durchführung meiner Versuche verwenden durfte. Ebenso danke ich Dr. Sebastian Wille, Rüdiger Möller und Frank Lehmann für die technische Begleitung des Projekts. Frau Regina Marquardt danke ich herzlich für die Unterstützung bei der Herstellung der Proben für die transversale Mikroskopie.

Insbesondere möchte ich meiner Schwester Dr. Kristina Elisabeth Philine Drenck für die unermüdliche Stärkung und Motivierung danken. Tief verbunden und dankbar bin ich meinem Ehemann Jesco Bodi für das stets offene Ohr für meine Gedanken.

Mein ganz besonderer Dank jedoch geht an meine Eltern, Kristine und Dr. Claus-Robert Drenck, die mir meinen bisherigen Lebensweg ermöglichten und denen ich diese Arbeit widme.