

Aus der Abteilung für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin des
CharitéCentrums 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der
Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Randintegrität und Sekundärkaries von Kompositrestaurationen mit und
ohne Kalziumhydroxidliner sowie Glashybridrestaurationen nach selektiver
Exkavation *in vitro*

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Jana Lina Marie Knieß

aus Berlin

Datum der Promotion: 23.06.2019

Vorwort

In dieser Arbeit befinden sich bereits veröffentlichte Ergebnisse aus folgender Vorabpublikation:

Schwendicke F, Kniess JLM, Paris S, Blunck U. Margin Integrity and Secondary Caries of Lined or Non-lined Composite and Glass Hybrid Restorations After Selective Excavation In Vitro. Oper Dent. 2017;42(2):155-164.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis

1 Abstract	1
1.1 Abstract (englisch)	1
1.2 Abstract (deutsch)	3
2 Einleitung	5
2.1 Kariesentstehung	5
2.2 Histologie der Karies	7
2.3 Selektive Exkavation	7
2.4 Risiken der selektiven Exkavation	9
2.5. Anwendung von Linern	10
2.6 Restauration	11
2.7 Hypothesen und Ziele der Arbeit	13
3 Material und Methoden	14
3.1 Versuchsaufbau	14
3.2 Vorbereitung der Proben	16
3.3 Kavitätenpräparation	16
3.4 Induktion der kariösen Läsionen	18
3.5 Restauration der Zähne	20
3.6 Thermomechanische Wechselbelastung	25
3.7 Randspaltanalyse	25
3.8 Biofilmmodell	28
3.9 Transversale Mikroradiografie	29
3.9.1 Probenherstellung für die Mikroradiografie	29
3.9.2 Anfertigung der transversalen Mikroradiografien	31
3.9.3 Auswertung der TMR	31
3.10 Statistische Analyse	32
4 Ergebnisse	33
4.1 Randspaltanalyse	33
4.2 Ergebnisse der mikroradiografischen Untersuchung	35
4.3 Mikrobiologische Auswertung	37
5 Diskussion	38
5.1 Diskussion von Material und Methoden	38

5.1.1 Allgemeiner Versuchsaufbau	38
5.1.2 Analyse	41
5.2 Schlussfolgerung und klinische Relevanz	42
6 Zusammenfassung	45
7 Literaturverzeichnis	46
8 Eidesstattliche Versicherung	51
9 Anteilserklärung an etwaigen erfolgten Publikationen	52
10 Lebenslauf	53
11 Publikationsliste	54
12 Danksagung	55

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Modifizierte Abbildung zur Kariesätiologie nach Paradigmenwechsel in Karies. Wissenschaft und klinische Praxis nach Paris et al. (4).....	6
Abbildung 2: Schema zum Versuchsablauf.....	15
Abbildung 3: Ausdehnung der präparierten Kavität nach Schwendicke et al. (1).....	17
Tabelle 1: Demineralisationslösung nach Buskes et al. 1985 (68).....	19
Abbildung 4: Beispielhafte Abbildung für Restaurationsablauf mit Komposit.....	23
Tabelle 2: DMM-Medium: modified defined Mucine Medium.....	24
Abbildung 5: Rasterelektronische Aufnahmen der verschiedenen Randqualitäten der Restaurationsränder in Schmelz und Dentin (200fach vergrößert).....	27
Tabelle 3: Qualitäten 1-5 der Randspaltanalyse.....	28
Abbildung 6: Mikroradiografie einer restaurierten Probe modifiziert nach Schwendicke et al. (1).....	30
Abbildung 7: Füllungs­ränder in Schmelz und Dentin unter fünffacher Vergrößerung....	32
Abbildung 8: Randintegrität in Abhängigkeit der verschiedenen Restaurationsmaterialien nach thermomechanischer Wechselbelastung modifiziert nach Schwendicke et al. (1).....	33
Abbildung 9: Darstellung des Mineralverlustes der kariösen Läsionen nach Schwendicke et al. (1).....	35
Abbildung 10: Darstellung des Mineralverlustes angrenzend an eine beispielhafte Restauration nach Schwendicke et al. (1).....	36
Tabelle 4: Bakterien­zahlen im Biofilm im Bereich des Füllungsrandes nach Schwendicke et al. (1).....	37

1 Abstract

1.1 Abstract (english)

Abstract aus Schwendicke F, Kniess JLM, Paris S, Blunck U. Margin Integrity and Secondary Caries of Lined or Non-lined Composite and Glass Hybrid Restorations After Selective Excavation *In Vitro*. Oper Dent. 2017; 42(2):155-164. (1)

„OBJECTIVES:

For deep carious lesions, selective carious tissue removal (leaving soft dentin close to the pulp) is suggested. Afterward, different restoration materials, such as resin composites or glass hybrids (GHs), can be placed. Many dentists also apply setting or non-setting calcium hydroxide liners before restoration. We compared margin integrity and susceptibility for secondary caries in differently restored premolars in vitro.

METHODS:

In 48 extracted human premolars, artificial residual lesions were induced on pulpo-axial walls of standardized cavities. Teeth were restored using a GH (Equia Forte) or adhesively placed resin composite restoration (OptiBond FL and Tetric EvoCeram) without any liner (RC), resin composite restoration with a non-setting calcium hydroxide liner (RC_NCH), or resin composite restoration with a setting calcium hydroxide liner (RC_SCH). After thermomechanical cycling, groups (n=12) were compared regarding their gingivocervical margin integrity (proportion of irregularities, microgaps, gaps >5 µm, overhangs). Teeth were then submitted to a continuous culture *Lactobacillus rhamnosus* biofilm model. After 14 days, bacterial numbers in biofilms, along tooth-restoration margins and mineral loss (ΔZ) of secondary lesions, were determined.

RESULTS:

GH and RC_NCH showed significantly higher proportions of irregularities than RC and RC_SCH ($p < 0.05$ /Mann-Whitney). GH also showed significantly more gaps than alternative restorations ($p < 0.05$). Bacterial numbers and ΔZ did not differ significantly between groups ($p > 0.05$).

CONCLUSIONS:

GH and composites lined with non-setting calcium hydroxide showed reduced margin integrity compared with non-lined composites or composites lined with setting calcium hydroxide. This did not increase susceptibility for secondary caries.“ (1)

1.2 Abstract (deutsch)

Einleitung:

Bei tiefen kariösen Läsionen birgt die nonselektive Kariesentfernung bis zum harten Dentin das Risiko einer iatrogenen Pulpeneröffnung mit Folge einer Wurzelkanalbehandlung. Die selektive Kariesentfernung mit Belassen von weichem Dentin in Pulpennähe ist daher als schonendere Behandlungsmethode vorzuziehen. Nach der Exkavation können verschiedene Restaurationsmaterialien wie Komposit oder Glashybride eingesetzt werden, wobei viele Zahnärzte zusätzlich medikamentöse Liner wie Kalziumhydroxid in wässriger Suspension oder als aushärtendes Präparat verwenden. In der vorliegenden In-vitro-Studie wurde die Randintegrität und Anfälligkeit für Sekundärkaries von unterschiedlich restaurierten, selektiv exkavierten Prämolaren verglichen.

Methode:

An achtundvierzig extrahierten menschlichen Prämolaren wurden standardisierte Präparationen durchgeführt und an den pulpoaxialen Wänden künstliche kariöse Läsionen erzeugt und belassen (Simulation einer selektiven Exkavation). Die Zähne wurden mit Glashybrid (Equia Forte, GH) oder adhäsiv befestigtem Komposit (OptiBond FL und Tetric EvoCeram) restauriert. Die mit Komposit versorgten Proben wurden dabei in 3 Gruppen unterteilt: ohne Liner (RC), mit einem wässrigen Kalziumhydroxidliner (RC_NCH) oder einem aushärtenden Kalziumhydroxidpräparat (RC_SCH). Nach der thermomechanischen Wechselbelastung wurden die Gruppen (n=12) bezüglich ihrer gingivozervikalen Randintegrität (Irregularitäten, Mikrorisse < 5 µm, Spalten > 5 µm, Überhänge) verglichen. Die Zähne wurden dann in ein computergesteuertes Laktobazillus-ramnosus-Biofilmmodell zur Induktion von Sekundärkariesläsionen überführt. Nach 14 Tagen folgte die Bestimmung der Bakterienzahlen (koloniebildende Einheiten) in den kultivierten Biofilmen. Weiterhin wurde der Mineralverlust der induzierten Sekundärläsionen mittels transversaler Mikroradiografie analysiert.

Ergebnisse:

GH und RC_NCH zeigten signifikant höhere Anteile an Irregularitäten in der Randspaltanalyse als RC und RC_SCH ($p < 0.05$ /Mann-Whitney). GH zeigte außerdem deutlich mehr Risse und Spalten als andere Restaurationsarten ($p < 0.05$). Die

Bakterienzahl war nicht signifikant verschieden zwischen den Biofilmen verschiedener Gruppen ($p > 0.05$). Der Mineralverlust der Sekundärläsionen war im Dentin im Vergleich zum Schmelz deutlich höher ($p < 0.05$), aber ohne signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen.

Schlussfolgerung:

GH und Komposite mit wässrigem Kalziumhydroxidliner zeigten reduzierte Randintegritäten im Vergleich mit Kompositrestauration mit härtendem Kalziumhydroxidliner sowie jenen ohne Anwendung eines Liners. Die Ausbildung einer Sekundärkaries blieb davon unbeeinflusst.

2 Einleitung

2.1 Kariesentstehung

Nach der *chemoparasitären Theorie* von Willoughby D. Miller (1890) wird die Entstehung von Karies durch die Produktion von Säure durch kariogene Mikroorganismen ermöglicht. Voraussetzung für einen Säureangriff ist das Überangebot an niedermolekularen Kohlenhydraten. Bis in die 1960er Jahre hielt man Laktobazillen als wahrscheinlichste Pathogene, da diese aufgrund ihrer ausgeprägten azidogenen (schnelle Metabolisierung von Zucker zu Säure) und azidurischen (überlebensfähig bei saurem pH-Wert) Eigenschaften besonders geeignet schienen. Durch neue Erkenntnisse wurden Streptokokken, insbesondere *Streptococcus mutans* als hauptursächlich bei der Kariesentstehung gesehen. Die *spezifische Plaquehypothese* beschreibt, dass einer kariösen Läsion die Infektion mit *Streptococcus mutans* vorangeht und Karies somit eine Infektionserkrankung ist (2). Die *nicht spezifische Plaquehypothese* erkennt die Tatsache an, dass neben *Streptococcus mutans* eine Reihe anderer Streptokokken (*Gruppe der Streptococcus viridans - Streptococcus sanguinis, salivarius, mitis etc.*), Aktinomyzeten und Laktobazillen ähnlich azidurische und azidogene Eigenschaften aufweisen und ihre Anwesenheit den Kariesprozess begünstigen oder bei Abwesenheit von *Streptococcus mutans* sogar initiieren kann (3).

Im Gegensatz dazu betont die *ökologische Plaquehypothese* die Bedeutung äußerer Einflüsse und die Eigenschaften der Mikroflora der Plaque. Eine kariogene Plaque wird charakterisiert als eine an die regelmäßige Zufuhr von Zucker und damit längeren Episoden mit niedrigem pH-Wert angepasste Mikroflora, die aufgrund einer Selektion zugunsten azidogener, azidurischer Bakterien Zucker besonders effizient umsetzen kann. Ein Individuum mit zuckerarmer Kost erfährt seltenere Episoden mit niedrigem pH-Wert und fördert entsprechend eine nicht azidurische Flora. Ein übermäßiger Zuckerkonsum begünstigt also durch eine ökologische Verschiebung zugunsten säuretoleranter Bakterien die Entstehung der Karies. Damit sind 3 Hauptfaktoren der Kariesentstehung bereits genannt - Zahnhartsubstanz, kariogene Mikroorganismen und Überangebot an Säuren. Nur im Zusammenspiel aller drei und unter Gewährung eines zeitlichen Rahmens kann ein kariöser Prozess initiiert werden. Entscheidend sind darüber hinaus zahlreiche individuelle Faktoren wie zum Beispiel genetische oder sozioökonomische Faktoren, Immunabwehr, Ernährung, zahnärztliche Betreuung,

Fluoridangebot, Speichelzusammensetzung und -menge und Mundhygiene (vgl. hierzu Abbildung 1).

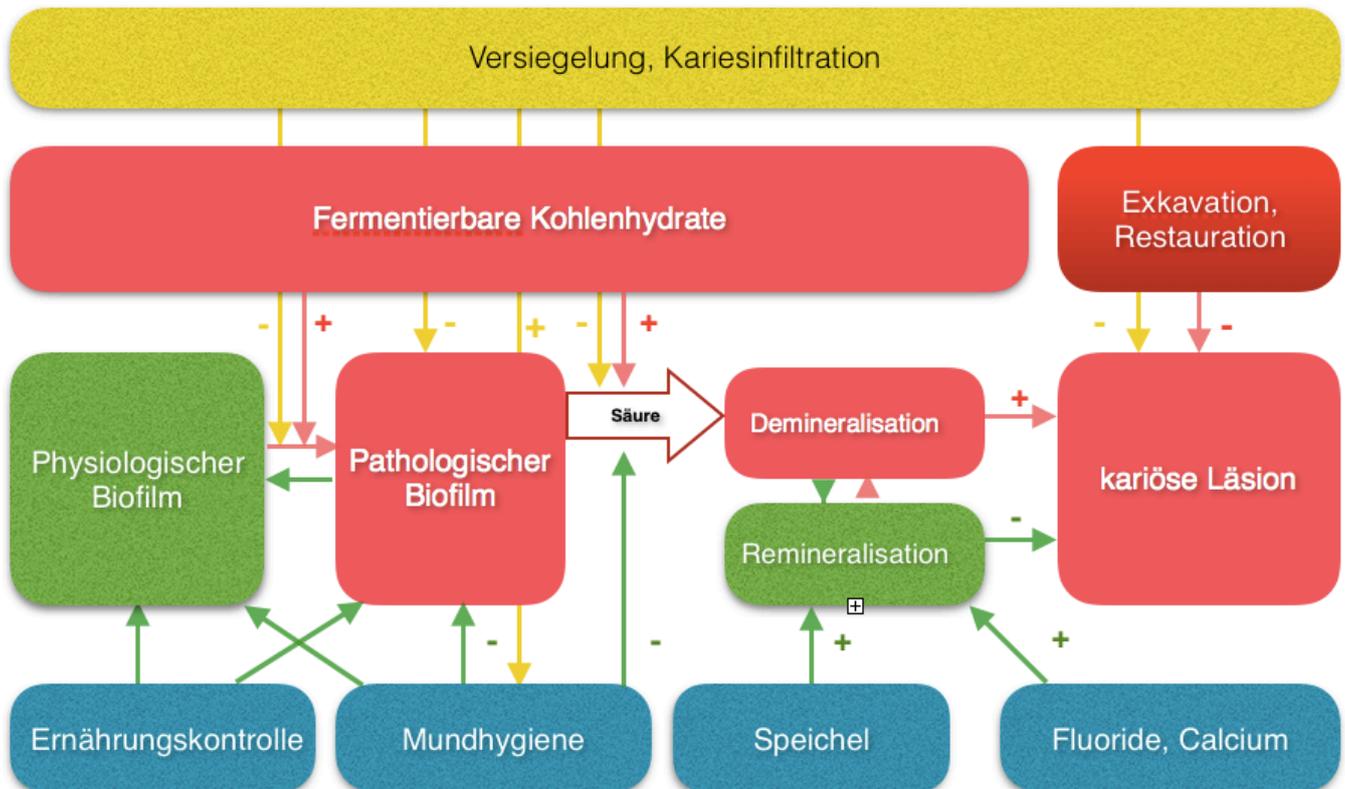


Abbildung 1: Modifizierte Abbildung zur Kariesätiologie, modifiziert nach (4). Entsprechend der ökologischen Plaquehypothese begünstigt eine übermäßige Zufuhr fermentierbarer Kohlenhydrate die Umwandlung des Biofilms mit physiologischer Flora zu pathogener Flora. Azidogene, azidurische Bakterien bilden organische Säuren und fördern Demineralisationsprozesse. Symptom dieses Prozesses ist die Ausbildung einer kariösen Läsion. Non-invasive Therapieansätze (in blau) zielen auf die Reduktion der begünstigenden Faktoren (zuckerreiche Kost, Biofilmkontrolle, Remineralisationsförderung/Demineralisationshemmung via Fluoride und Kalzium). Mikro-invasive Maßnahmen (in gelb) bezeichnen Maßnahmen, deren Einsatz die Progression einer (nicht-kavitierten) Läsion unterbrechen. Invasive Maßnahmen (in dunkelrot) werden bei kavitierten Läsionen eingesetzt.

2.2 Histologie der Karies

Kavitierte kariöse Läsionen sind der Mundhygiene nicht mehr zugänglich. Daher wird bei kavitierten Läsionen eine Restauration zur Entfernung des bakteriell kontaminierten Dentins sowie zur Umgestaltung der Zahnoberfläche, um funktionsfähige, der Mundhygiene zugängliche Bereiche zu schaffen, als notwendig angesehen (5). Grundsätzlich unterscheiden sich bei tiefen Dentinläsionen zwei Zonen - die äußere (infizierte) kariöse Zone und die innere, remineralisierbare kariöse (englisch: affected) Zone. In beiden Zonen nehmen Mineralgehalt und Dentinhärte in Richtung Pulpa zu. Von innen nach außen finden sich histologisch folgende fünf Zonen: die Pulpa bildet als Reaktion auf die kariöse Läsion sogenanntes *Tertiärdentin* (oder Reizdentin), das sich durch eine geringere Härte als reguläres Dentin auszeichnet. Im Anschluss findet sich die *transparente Zone*, das zusammen mit der *Zone der Demineralisation* das innere, kariöse Dentin darstellt. Dieses ist nicht bakteriell kontaminiert, remineralisierbar und vital. Die äußere kariöse Zone wird dargestellt durch die *Zone der Penetration* und die *Zone der Nekrose*, beide bakteriell besiedelt, nicht remineralisierbar und avital. Diese histologisch unterscheidbaren Zonen sind schon aufgrund ihres sukzessiven Überganges klinisch nicht zuverlässig voneinander abgrenzbar (6), sodass kein verlässlicher Rückschluss auf die Qualität des zurückgelassenen oder des entfernten Dentins möglich ist und auch bei sorgfältiger Exkavation Bakterien in der Kavität zurückbleiben können.

2.3 Selektive Exkavation

Moderne Therapiekonzepte fernab der nonselektiven Kariesentfernung sind vielen Zahnärzten immer noch fremd, da die Annahme besteht, dass nur die nonselektive Kariesentfernung bis zum harten Dentin zur Arretierung der Karies führt und eine weitere Progression verhindert wird (7). Ein besseres Verständnis der Erkrankung hat in den vergangenen Jahren zu einem Paradigmenwechsel geführt. Zum Schutz der Pulpa ist das Zurücklassen kleiner pulpennaher Anteile weichen Dentins akzeptabel, da zurückgebliebene Bakterien durch Diffusionsbarrieren wie adhäsive Restaurationen von der Substratzufuhr abgeschnitten und der Kariesprozess arretiert wird. Die kariöse Läsion wird als Symptom der Grunderkrankung „Karies“ erfasst und rein symptomatisch,

möglichst wenig invasiv behandelt. Das Hauptziel ist die Ursachenbekämpfung, das Verhindern neuer Läsionen durch Kontrolle der Biofilm- und Läsionsaktivität und die Vermeidung der Restaurationsspirale (8). Es folgt eine Übersicht verschiedener Ansätze zur Kariesentfernung.

Nonselektive Kariesentfernung bis zum harten Dentin

Die nonselektive Kariesentfernung bis zum harten Dentin stellt die klassische, nicht mehr empfohlene Variante der Kariesexkavation dar und führt in einem einzeitigen Verfahren zur vollständigen Entfernung des kariösen Gewebes, wobei das Risiko einer Pulpenexposition oder -schädigung gerade bei tiefen Läsionen berücksichtigt werden muss. Die Läsion wird im Anschluss mit einer definitiven Restauration versiegelt. Die Schwierigkeit, unter klinischen Umständen zwischen demineralisiertem und bakterienfreiem Dentin zu unterscheiden, führt oft zu unnötigem Zahnhartsubstanzverlust.

Schrittweise Exkavation

Die schrittweise Exkavation wird zweizeitig durchgeführt, sodass in einer ersten Behandlung nur in der Peripherie Kariesfreiheit erzielt wird, pulpenah dagegen schonend exkaviert wird, wobei weiches, kariöses Dentin verbleibt. Optional ist die Applikation von Kalziumhydroxid, die Kavität wird dann temporär verschlossen. Bei einer zweiten Sitzung nach 6 bis 12 Monaten wird die temporäre Füllung entfernt und es erfolgt die vollständige Exkavation. Dieser Behandlungsansatz stellt ein Therapiekonzept ausschließlich bei tiefen, pulpenahen Läsionen dar. Die Versiegelung des Dentins führt zur Inaktivierung der bakteriellen Stoffwechselprozesse (9) und verhindert ein Fortschreiten der Demineralisation. Dies ermöglicht die Bildung von Reizdentin und soll als Schutzschicht der Pulpa postoperative Komplikationen minimieren. Die verzögerte Exkavation ermöglicht die Remineralisation des kariösen Dentins, sodass in der zweiten Sitzung weniger Dentin entfernt werden muss, als bei einem einzeitigen, nonselektiven Verfahren.

Selektive Exkavation

Die selektive Kariesexkavation beschreibt ein schonendes Verfahren, bei dem periphere Bereiche der Läsion vollständig exkaviert werden, in zentralen, pulpennahen Bereichen hingegen weiches oder festes Dentin bewusst belassen wird. Bei Läsionen, die nicht in das innere Dentindrittel reichen, ist festes, nicht sondenhartes Dentin zu hinterlassen. Es folgt die adhäsive Restauration (10). Bei tiefen Läsionen wird pulpennah weiches Dentin belassen. Im Vergleich zum schrittweisen Verfahren reduziert dieses Verfahren das Risiko pulpaler Komplikationen (11), sodass auch geringere Kosten als bei nonselektiver Kariesentfernung oder schrittweiser Exkavation erwachsen (12), da die Folgebehandlungen entfallen. Bei der klinischen Anwendung kann die Qualität und Quantität des zurückgelassenen Dentins nur schwer bestimmt werden, weil der Übergang von gesundem oder zumindest remineralisierbarem Dentin zu bakteriell kontaminiertem, kariösem Dentin fließend ist. In der Regel werden hierfür visuell-taktil subjektive Kriterien wie Farbe und Härte des Dentins bewertet, seltener auch die Feuchtigkeit des Dentins. Im klinischen Alltag können als Hilfsmittel zum Beispiel fluoreszenzassistierte oder chemo-mechanische Exkavation zum Einsatz kommen. Beim Belassen von kariösem Dentin unter einer adhäsiven Restauration fürchtet man dessen Einfluss auf den Füllungsverbund.

2.4 Risiken der selektiven Exkavation

Die nonselektive Kariesexkavation bis zum harten Dentin bei der Behandlung pulpennaher Läsionen birgt das Risiko der iatrogenen Pulpenexposition, daher scheint bei symptomfreien, vitalen Pulpen die selektive (unvollständige) Exkavation die überlegenere Behandlungsmethode zu sein. Zur Minimierung postoperativer pulpaler Komplikationen (13) wird pulpennah bewusst auf die vollständige Exkavation verzichtet und kariös verändertes Dentin belassen. Allerdings ist das demineralisierte Dentin weich und weniger elastisch als gesundes Dentin (14), sodass sich ein geschwächter, weniger vorhersagbarer und dauerhafter Füllungsverbund (15) ergeben könnte. Der verminderte Haftverbund zwischen Dentin und Restauration (16) beeinflusst die Integrität und die mechanische Stabilität der Restauration in nicht absehbarer Weise. Die Folgen könnten eine verringerte Lebensdauer der Restauration, mehr Restaurationsverluste und

Frakturen, eine Beeinträchtigung der Randintegrität und eine erhöhte Anfälligkeit für Sekundärkaries sein (17,18,19). Diese Effekte konnten in In-vitro-Studien nur bedingt bestätigt werden (20,72,74).

2.5 Anwendung von Linern

Traditionell wurde vor der Restauration vor allem pulpennaher Kavität ein Medikament (engl. Liner) zur Reduzierung pulpaler Schädigungen und postoperativer Komplikationen appliziert. Die verwendeten Liner sollten eine symptomfreie Vitalerhaltung der Pulpa sowie die Anregung der Pulpa zur Reizdentinbildung ermöglichen sowie antibakterielle und remineralisierende Effekte ausüben. Die Pulpa soll außerdem vor potentiell toxischen Effekten der verwendeten Restaurationsmaterialien geschützt werden.

Ein typisches Liningmaterial ist Kalziumhydroxid. Es wurde 1920 erstmals in der Zahnmedizin eingesetzt und ist heute das am häufigsten verwendete Liningmaterial (21). Die Applikation von Kalziumhydroxid induziert durch Stimulierung undifferenzierter Zellen in der Pulpa die Bildung von Odontoblasten und Tertiärdentin (22,23,24,25) und zeigte in vitro (26) und in vivo (27,28,29,30) remineralisierende Effekte. Kalziumhydroxid setzt Kalzium- und Hydroxylionen frei. Die hochreaktiven Hydroxylionen führen zu einem starken pH-Wertanstieg (31) und erzeugen für verbleibende Bakterien ungünstige Bedingungen (39). Sie beeinflussen den bakteriellen Stoffwechsel, Zellteilung, Wachstum und Struktur (32). Das saure Milieu der kariesverursachenden Bakterien wird abgepuffert (pH-Wert 12) und die Bildung von Wachstumsfaktoren aus dem Dentin gefördert.

Kalziumhydroxid wird in diversen Anwendungsformen angeboten - als wässrige Suspension bzw. in Pulverform zum Anmischen mit destilliertem Wasser (nicht aushärtend) oder als Paste-Paste-System (aushärtend). Härtendes Kalziumhydroxid weist eine mäßige Stabilität und geringe Druckfestigkeit auf. Dies geht mit einer potentiell niedrigeren antibakteriellen Wirkung einher, da hier weniger Kalzium und Hydroxylionen freigesetzt werden (33,34). Die wässrigen Präparate sind Suspensionen von Kalziumhydroxid in Wasser. Nach der Applikation verdunstet das Wasser und es verbleibt eine dünne Schicht Kalziumhydroxid. Kalziumhydroxid ist in wässriger und härtender Form empfindlich für Degradation durch Säureätzung (35) und ihre langfristige

Zersetzung hinterlässt Porositäten, die empfänglich für bakterielle Rekolonisation sind, sogenannte Tunneldefekte (36,37,38).

Die Anwendung von Mineral Trioxid Aggregat (MTA) als Alternative zu Kalziumhydroxid ist derzeit Gegenstand zahlreicher Diskussionen. Die aktuelle Studienlage zeigt kein einheitliches Urteil, da sich in einigen Untersuchungen signifikante Vorteile von MTA zeigten (39,40,41), dies in anderen Studien aber nicht bestätigt werden konnte (42,43). Darüber hinaus wird eine Vielzahl an Materialien empfohlen oder diskutiert, zum Beispiel Zinkoxideugenol, Kalziumphosphate, Dentinadhäsive sowie die experimentelle Anwendung von zum Beispiel Schmelzmatrixderivaten („bioaktive Moleküle“) (44,45,46,47). Auch hier sind weitere Studien notwendig.

Die Deutsche Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde empfiehlt in der seit 1998 vorliegenden Leitlinie zur Caries profunda-Behandlung von bleibenden Zähnen die Anwendung von Kalziumhydroxid sowie zur Anwendung bei Milchzähnen MTA oder Kalziumhydroxid und betont außerdem die Bedeutung eines dichten Kavitätenverschlusses (48,49). Kürzlich publizierte internationale und nationale Stellungnahmen (50,51) empfehlen eine solche Lineranwendung nicht mehr zwingend.

2.6 Restauration

Unabhängig von der vorherigen Applikation eines Liners wird nach der Exkavation die Kavität restauriert. Neben Silberamalgam, das in dieser Studie nicht eingesetzt wurde und daher nicht diskutiert werden soll, stellen Kunststoffkomposite eine weitverbreitete Materialklasse dar. Komposite sind lighthärtende, zahnfarbene Füllungsmaterialien auf Methacrylatbasis, welche auf der vorbehandelten Zahnhartsubstanz in sog. Adhäsivtechnik mikromechanisch verankert werden, was eine defektorientierte Präparation mit geringem Zahnhartsubstanzverlust ermöglicht. Der Zusatz von anorganischen Füllstoffen erlaubt den Einsatz als dauerhafte Restauration im krafttragenden Seitenzahnggebiet durch hohe Druck- und Verschleißfestigkeit. Nachteilig sind im Vergleich zu Silberamalgam und Zement höhere Materialkosten, die zeitaufwendige Applikation in Mehrschichttechnik sowie Techniksensitivität und Empfindlichkeit gegen Feuchtigkeit.

Eine weitere Materialklasse sind Glasionomere (GIZ). Diese zeigen remineralisierende Wirkung auf Dentin *in vitro* und *in vivo* (52,53,54,55,56,57,58).

Glasionomere werden vor allem für Klasse V-Restaurationen eingesetzt und zeigen ästhetisch schlechtere Ergebnisse sowie verminderte physikalisch-mechanische Eigenschaften (zum Beispiel eine schlechte Polierbarkeit sowie niedrigere Verschleißtoleranz und Bruchfestigkeit) im Vergleich mit Kompositen (59), sodass der Einsatz für Klasse I- und Klasse II-Kavitäten bisher vor allem als temporäre Restauration erfolgte. Dem stehen positive Aspekte dieser Werkstoffgruppe gegenüber, wie eine chemische Haftung an Zahnhartsubstanz sowie eine Fluoridabgabe zur Kariesprävention (60,61,62). Es bedarf außerdem im Gegensatz zu Kompositen nur einer relativen Trockenlegung und keiner Schichttechnik, was für die Anwendung bspw. in der Kinderzahnheilkunde vorteilhaft ist. Nach lokaler Applikation von Fluorid soll es zu einer „Neuaufladung“ der Glasionomerrestauration mit Fluoriden kommen („recharging“-Effekt) (63). Dies soll das bakterielle Wachstum und damit die Gefahr einer Sekundärkaries verringern oder ihre Entstehung zumindest verlangsamen (64,65). Die jüngsten Weiterentwicklungen dieser Materialgruppe erlauben eine breitere Indikationsstellung. So sind in verstärkten (auch als Glashybride bezeichneten) Glasionomerzementen große Glasfüller mit einem kleineren, hochreaktiven Silikatpartikel sowie einem Akrylsäuremolekül mit höherem Molekulargewicht zur Verbesserung der Biegefähigkeit und Härte des Materials kombiniert worden. Die Versiegelung der Glasionomerzementrestauration mit einem Kompositlack soll zusätzlich die Abrasionsstabilität, Biegefestigkeit, Verschleißfestigkeit und das ästhetische Bild verbessern (66). So sollen Glashybride (GH) bei einfacher und schneller Anwendung auch im Seitenzahnggebiet für größere, biegebelastete Kavitäten eine ökonomische und zahnfarbene Versorgung darstellen (67).

Es bleibt unklar, ob GH tatsächlich zur Restaurierung ausgedehnter, selektiv exkavierter Kavitäten eingesetzt werden können. Ebenso ist unklar, inwieweit die Verwendung von Linern die Integrität von Restaurationen in selektiv exkavierten und anschließend mit Komposit versorgten Kavitäten beeinflusst. Mögliche Endpunkte zur Überprüfung dieser Restaurationsintegrität wären beispielsweise die Randintegrität sowie die Anfälligkeit für Sekundärkaries.

2.7 Hypothesen und Ziele der Arbeit

Die vorgelegte Studie untersuchte die Randintegrität und die Anfälligkeit für Sekundärkaries von Kompositrestaurationen mit und ohne Liningmaterial sowie von GH - Restaurationen in selektiv exkavierten, ausgedehnten Kavitäten. Es wurden zwei Hauptziele verfolgt:

1. GH sollten bezüglich ihrer Randintegrität und Anfälligkeit für Sekundärkaries untersucht und mit Komposit verglichen werden.
2. Die Auswirkung von Kalziumhydroxiden, angewandt als Liner, auf die Randintegrität und Anfälligkeit für Sekundärkaries sollte untersucht werden.

Folgende Hypothesen sollten dabei überprüft werden:

1. Bei der Anwendung von GH zeigen sich signifikant geringere Randqualitäten als bei Komposit.
2. Die Anfälligkeit für Sekundärkaries ist bei Anwendung von GH signifikant größer als bei Kompositen.
3. Die Verwendung von Liningmaterialien nach selektiver Kariesexkavation vermindert die Randintegrität bei Kompositen.
4. Die Applikation von Kalziumhydroxidliner unter einer Kompositrestauration nach selektiver Exkavation begünstigt die Entstehung von Sekundärkaries mit signifikanten Unterschieden zur direkten Kompositrestauration ohne Liner.

3 Material und Methoden

3.1 Versuchsaufbau

In 48 extrahierten menschlichen Prämolaren wurden an pulpoaxialen Wänden standardisierte Kavitäten mittels Parallelschleifer erzeugt. Innerhalb festgelegter Bereiche wurden anschließend mit einer Demineralisationslösung kariöse Läsionen induziert und die Zähne mit GH (Equia forte, GC, Tokio, Japan) ohne Liner sowie verschiedenen Kalziumhydroxidlinern und Kompositrestaurationen restauriert (n=12/Gruppe). Verwendet wurde dabei das Nanohybrid-Komposit Tetric EvoCeram (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) sowie der härtende Kavitätenliner Kerr Life (Kerr, Scafati, Salerno, Italien) und die Kalziumhydroxidpaste UltraCal XS (Ultradent, Köln, Deutschland). Nach Belastung der Proben im Thermowechselbad und Kausimulator wurde die Randintegrität der Restaurationen bestimmt. Dann erfolgte eine Überführung der Proben in ein kariogenes Laktobazillus-rhamnosus-Biofilmmodell zur Induktion von Sekundärkariesläsionen. Die Zahl der Bakterien in den kultivierten Biofilmen sowie der Mineralverlust der Sekundärkariesläsionen wurden bestimmt. Im Folgenden wird der Versuchsablauf anhand eines Schemas verdeutlicht (Abbildung 2).

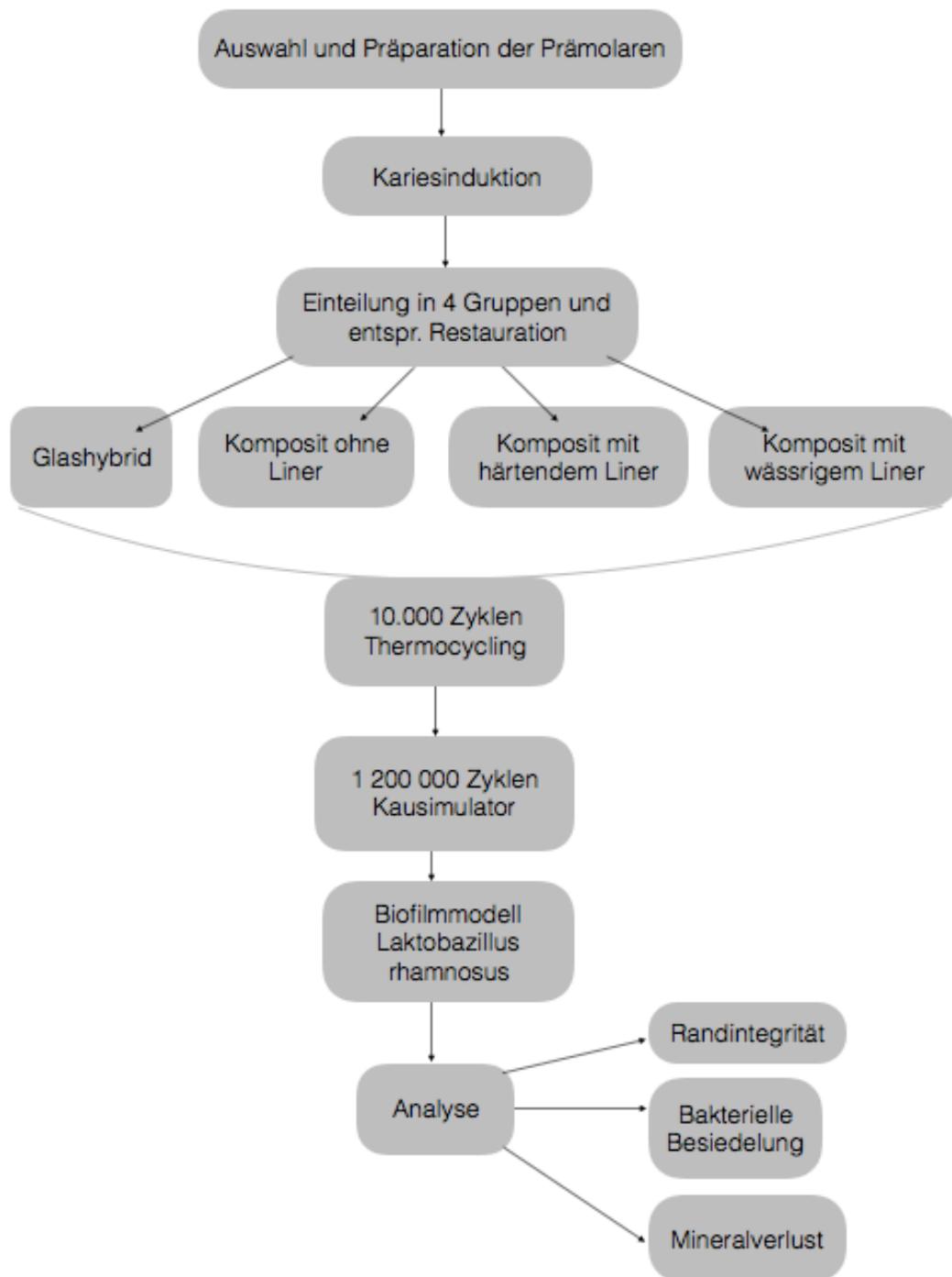


Abbildung 2: Schema zum Versuchsablauf

3.2 Vorbereitung der Proben

Es wurden insgesamt 317 zweite obere karies- und füllungsfreie Prämolaren ausgewählt und vermessen (digitale Messlehre, ALDI Nord, Essen, Deutschland), aus denen dann 48 Zähne mit einer orovestibulären Breite von 8,7 mm und mesiodistalen Breite von 6,5 mm ($\pm 0,2$ mm) für den Versuch ausgewählt wurden. Der Einsatz der menschlichen Zähne zu Forschungszwecken wurde durch die Ethikkommission der Charité - Universitätsmedizin Berlin genehmigt (Ethikantrag EA4 102/14). Die Proben lagerten in 0,1% Thymollösung. Nach der Reinigung per Hand mit einem Scaler (M23 Scaler, Deppeler SA, Rolle, Schweiz) und einer Polierbürste (HS-Prophylaxebürstchen, Henry Schein, Langen) wurden die Zähne erneut visuell-taktil auf Unversehrtheit geprüft. Für die standardisierte Präparation mit dem Parallelschleifgerät (Celay, Mikrona, Spreitenbach, Schweiz) wurde es nötig, die Proben in Kupferrohre (Bauhaus, Belp, Schweiz) einzubetten und mit entsprechenden Sockeln zu versehen (VITA Zahnfabrik, Bad Säckingen, Deutschland). Dafür wurde das 2 cm lange Rohr (Durchmesser: 15 mm) in 15 mm lange Abschnitte geschnitten, die Ränder geglättet und die Zähne in einer Einbettvorrichtung auf der gleichen Höhe im Kupferrohr fixiert. Das zugegebene Akrylharz (Technovit 4071, Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) reichte bis 2 mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze. Nach dem Aushärten des Akrylharzes wurden die Sockel mit Ausrichtung der Vestibulärfläche zur Einkerbung des Füßchens mit Epoxidkleber befestigt (UHU Plus Endfest, Bühl, Deutschland), an der Unterseite beschriftet und in den Parallelschleifer eingespannt.

3.3 Kavitätenpräparation

Als Vorlage für die Präparationen diente ein Kunststoffprämolare des Zahnes 15 (Frasaco, Tettngang, Deutschland), der mit Komposit (Tetric EvoCeram, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) auf gleicher Höhe mit den Proben fixiert wurde. Die mesial-distal-okklusale Kavität erhielt folgende Ausdehnung: Zentralkavität 2 mm tief und 2,5 mm breit, distaler und mesialer Kasten 4 mm breit (vgl. hierzu Abbildung 3). Der Kavitätenrand lag dabei distal 1 mm unterhalb und mesial 1 mm oberhalb der Schmelz-Zement-Grenze. Diese „Ideal-Präparation“ wurde mit einem grünen Zylinderdiamanten (ISO 550.4020.01, Schleifkörper ZY-91, Mikrona, Spreitenbach, Schweiz) auf die ausgewählten Prämolaren

übertragen. Per Hand wurden kleinere Unebenheiten und individuelle Größenunterschiede der Zähne mit einem roten zigarrenförmigen Diamanten (Henry Schein, Melville, Australien) bei 200.000 Umdrehungen/Minute unter Wasserkühlung korrigiert. Mit einem Stereomikroskop (Stemi Zoom, Zeiss, Oberkochen, Germany) wurde die Oberfläche erneut kontrolliert.

Es folgte ebenso unter optischer Kontrolle (Lupenbrille, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) die Abdeckung der Oberfläche mit 2 dünnen Schichten Nagellack (Lotus Effect 43K, Manhattan, Mainz, Deutschland), wobei die zur Pulpa gerichteten Wände ausgespart wurden. Es entstand mesial und distal ein $1,5 \times 2$ mm großes Fenster. Im Anschluss wurden an den pulpoaxialen Wänden künstliche demineralisierte Läsionen induziert.

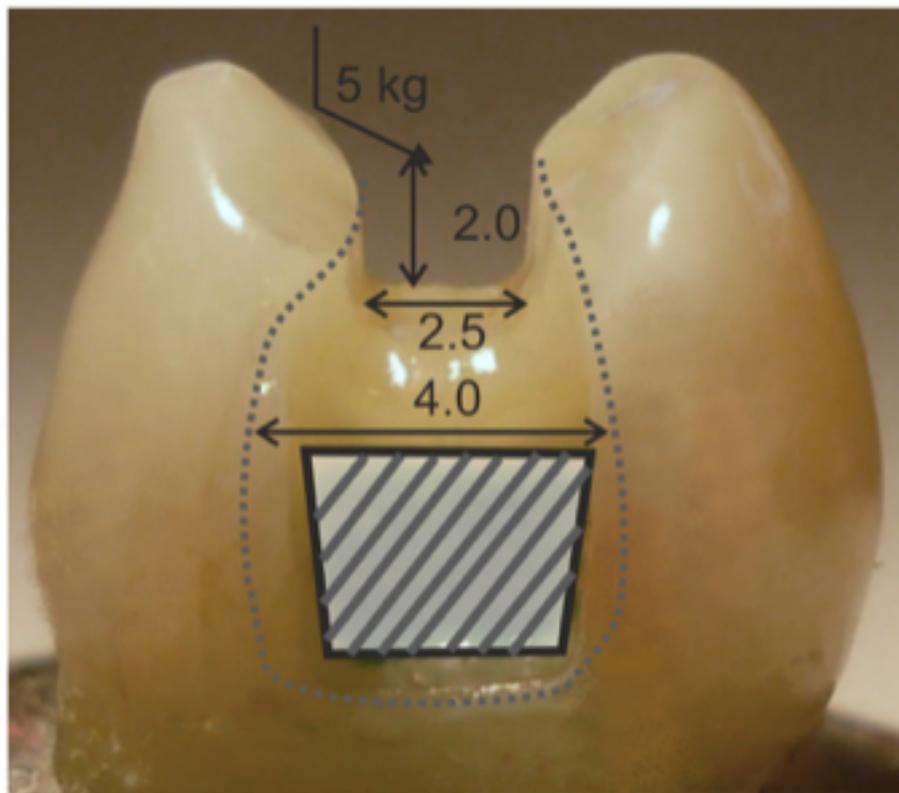


Abbildung 3: Ausdehnung der präparierten mesial-okklusale-distalen Kavität. Abbildung aus (1). Die mesial-distal-okklusale Kavität erhielt folgende Ausdehnung: Zentralkavität 2 mm tief und 2,5 mm breit, distaler und mesialer Kasten 4 mm breit. Der Kavitätenrand lag dabei distal 1 mm unterhalb und mesial 1 mm oberhalb der Schmelz-Zement-Grenze; der schraffierte Bereich entspricht der Fläche der künstlich hergestellten demineralisierten Läsion ($1,5 \times 2$ mm).

3.4 Induktion der kariösen Läsionen

Im Vorversuch wurde ermittelt, dass die Lagerung für 2 Wochen in einer Azetat-Lösung bei einem konstanten pH-Wert von 5,3 keine ausreichende Demineralisationstiefe erzeugte, so dass ein Zeitraum von 12 Wochen festgelegt wurde. Zur Demineralisation wurde eine Lösung nach Buskes (vgl. hierzu Tabelle 1) angesetzt und die Proben bei pH 5,3 bei 37 °C im Wärmeschrank unter konstanter Bewegung gelagert. Über den Zeitraum von 3 Monaten wurde der Zustand der Proben mittels pH-Meter (pH-Elektrode GE 100 BNC mit pH-Meter GMH 3510, Greisinger, Regenstauf, Deutschland) anfangs täglich, dann wöchentlich kontrolliert. Bei Abweichungen des pH-Wert wurde unter Rühren Salzsäure (0,1 M, Merck, Darmstadt, Deutschland) oder Kaliumhydroxid (10 M, Merck, Darmstadt, Deutschland) tropfenweise hinzupipettiert und der pH-Wert so über die gesamte Demineralisationsdauer konstant gehalten. Die resultierenden Läsionen hatten durchschnittliche Tiefen von 76 (Standardabweichung 27) μm und einen durchschnittlichen ΔZ von 1575 (736) Vol.% $\times \mu\text{m}$.

Nach Abschluss der Demineralisationsphase wurden die Proben mit destilliertem Wasser abgespült und alle Kupferrohre mit feinem Sandpapier gereinigt. Der Nagellack wurde mit einem Scaler (M23 Scaler, Deppeler SA, Rolle, Schweiz) und Skalpell (12A, Henry Schein, Melville, Australien) entfernt und die Zähne optisch auf Unversehrtheit geprüft. Aufgrund des Kupferringes kam es zu grünlichen Verfärbungen im Bereich der Läsion.

Tabelle 1: Demineralisationslösung nach Buskes et al. 1985 (68)

Stoff	Ansatz in l	Konzentration in mmol/l	Molare Masse in g/mol	Menge
CaCl ₂	5	3	147,02	2,205 g
KH ₂ PO ₄ **	5	3	136,09	2,041 g
Methyldiphosphorsäure Stammlösung*	5	0,006	176,00	10 ml
Eisessig (CH ₃ COOH 100%)	5	50	60,05	15,012 g entspr. 14,3 ml
KOH 10 M	5	ad pH 5,3	56,11	ca. 23 ml
Aqua dest.	5	-	18,00	auf 5 l auffüllen

*MDPH-Stammlösung: 0,0528 g MDPH auffüllen auf 100 ml Aqua dest.

**KOH 10 M: 56,11 g KOH auffüllen auf 100 ml Aqua dest.

3.5 Restauration der Zähne

Anschließend wurden die Zähne zufällig in vier Gruppen (n=12) aufgeteilt. Je eine Gruppe (12 Zähne) wurde mit unterschiedlichen Füllungs- und Liningmaterialien versorgt. Die erste Gruppe wurde mit GH (Equia forte) gefüllt, die zweite, dritte und vierte Gruppe wurden mit einer Kompositrestauration (Tetric EvoCeram) versorgt, wobei bei der zweiten Gruppe kein Liner, bei der dritten Gruppe ein wässriger Kalziumhydroxidliner (UltraCal XS) und bei der vierten Gruppe ein härtender Kavitätenliner (Kerr Life) appliziert wurde. Die Abkürzungen ergeben sich wie folgt: GH - Glashybridrestauration, RC - Kompositrestauration ohne Liner (aus dem Englischen: resin composite), RC_NCH - Kompositrestauration mit wässrigem Kalziumhydroxidliner (resin composite restoration with a non-setting calcium hydroxid liner), RC_SCH - Kompositrestauration mit härtendem Kalziumhydroxidliner (resin composite restoration with a setting calcium hydroxid liner).

1. **GH:**

Ein Tofflemire-Matrizenband im Halter (Henry Schein, Melville, Australien) wurde platziert und die Kavität entsprechend Herstellerangaben mit Polyakrylsäure (Equia Cavity Conditioner, GC, Tokio, Japan) konditioniert. Nach 10 Sekunden wurde die Säure gründlich abgespült und die Kavität leicht getrocknet. Das Glashybrid-Restaurationsmaterial (Equia forte) wurde in der vordosierten Kapsel aktiviert, 10 Sekunden im Mischgerät (Silamat S6, 4500 rpm, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) gemischt und im Kapselapplikator (Capsule Applier, GC) zügig in die Kavität gebracht. Eine grobe Ausarbeitung folgte innerhalb von einer Minute nach Applikation mit einem Heidemannspatel (mittelbreit 2,0 mm, Henry Schein). Nach der Aushärtung erfolgte die feine Ausarbeitung mit rotierenden Instrumenten. Dabei verwendet wurden SoFlex-Scheiben (Ø 9,5 mm, rot-gelb, Henry Schein) in grober bis sehr feiner Körnung sowie Brownie/Greenie-Gummipolierer (Henry Schein). Abschließend wurde die Restauration okklusal mit Kompositlack (Equia Coat, GC) versiegelt und mit einer LED-Polymerisationslampe mit einer Intensität von 1.400 mw/cm² für 20 Sekunden gehärtet (VALO, Ultradent, Salt Lake City, USA). Um die klinische Anwendung möglichst realitätsgenau abzubilden, wurde auf einen approximalen Auftrag des Lackes verzichtet.

2. **RC:**

Eine Tofflemire-Matrize wurde platziert und die Kavität mit Phosphorsäure-Gel (GB Etching Gel, 37%, Orbis, Münster, Deutschland) auf die Füllung vorbereitet. Dabei wurde das Gel zunächst im Schmelzbereich und anschließend im Dentin aufgetragen, sodass eine effektive Ätzzeit von 30 Sekunden im Schmelz und 15 Sekunden im Dentin erreicht wurde (vgl. hierzu Abbildung 4). Anschließend wurde die Phosphorsäure 30 Sekunden gründlich abgespült und getrocknet, ohne die Kavität auszutrocknen. Das Rewetting erfolgte für 30 Sekunden mit einem Chlorhexidin-Präparat (2%, Charité Hausapotheke, Berlin, Deutschland). Die Konditionierung erfolgte mit einem Zweikomponenten-Adhäsiv (OptiBond FL, Kerr Italia, Salerno, Italien). Der Primer wurde in einem ersten Schritt aktiv für 30 Sekunden einmassiert und anschließend, ohne die Kavität auszutrocknen, verblasen. Im zweiten Schritt folgte der gleichmäßige Auftrag des Adhäsivs und ebenso im Anschluss die Entfernung aller stehenden Flüssigkeit mit einem Puster und die Lichthärtung (VALO, Ultradent, Salt Lake City, USA). Das Kompositmaterial (Tetric EvoCeram A2) wurde in der Inkrementtechnik in die Kavität eingebracht, dabei wurde mit einer approximalen 1 mm dicken Schicht begonnen, um den C-Faktor zu optimieren und die Polymerisationsschrumpfung zu minimieren (Abbildung 4) (69). Verwendet wurde dabei der genannte Heidemannspatel und ein Kugelstopfer (Kugel-Ø: 1,2 mm/1,6 mm, Henry Schein); nach jedem eingebrachten Inkrement erfolgte die Lichthärtung für 20 Sekunden. Für Ausarbeitung und Politur der Restauration wurden die gleichen Materialien verwendet wie bei der Glasionomierzement-Füllung sowie eine Polierbürste (Hawe Occlubrush, Kerr).

3. **RC_NCH:**

In der dritten Gruppe wurde auf den pulpoaxialen Wänden ein wässriger Kalziumhydroxidliner appliziert, abgedeckt und danach wie beschrieben gefüllt. Verwendet wurde hierbei UltraCal XS, eine 35%ige Kalziumhydroxidpaste mit pH 12,5, die an der mesialen und distalen Oberfläche der künstlichen Demineralisation appliziert wurde. Aufgetragen wurde das Produkt mit einem feinen Applikationstip (NaviTips, Ultradent) in einer dünnen Schicht (Abbildung 4). Im Anschluss wurde ein lichthärtendes, kunststoffmodifiziertes

Glasionomermaterial (Vitrebond Plus, 3M ESPE, St. Paul, Maine, USA) auf einer Glasplatte (Henry Schein) 1:1 für 15 Sekunden durchmischt, appliziert und 20 Sekunden lichtgehärtet. Die anschließende Kompositrestauration erfolgte wie beschrieben.

4. **RC_SCH:**

Für die vierte Gruppe wurde Kerr Life verwendet, ebenso mit Vitrebond Plus abgedeckt und mit Tetric EvoCeram restauriert. Das Kalziumhydroxidpräparat wurde dafür laut Herstellerangaben mit je einem Teil Basis- und Katalysatorpaste angemischt, mit einem kleinen Kugelstopfer (Kugel-Ø: 0,8 mm/1,0 mm, Henry Schein, Melville, Australien) vorsichtig aufgetragen und nach der Abbindezeit (3-4 Minuten) von einer dünnen Schicht Glasionomermaterial bedeckt und 20 Sekunden lichtgehärtet. Beide Kalziumhydroxidpräparate sind röntgenopak und sollen durch den basischen pH-Wert die Bildung von Sekundärdentin anregen. Die anschließende Kompositrestauration erfolgte wie beschrieben.

Alle Proben wurden im Anschluss auf Unversehrtheit geprüft (Abbildung 4) und mit einem wasserfesten Stift beschriftet.

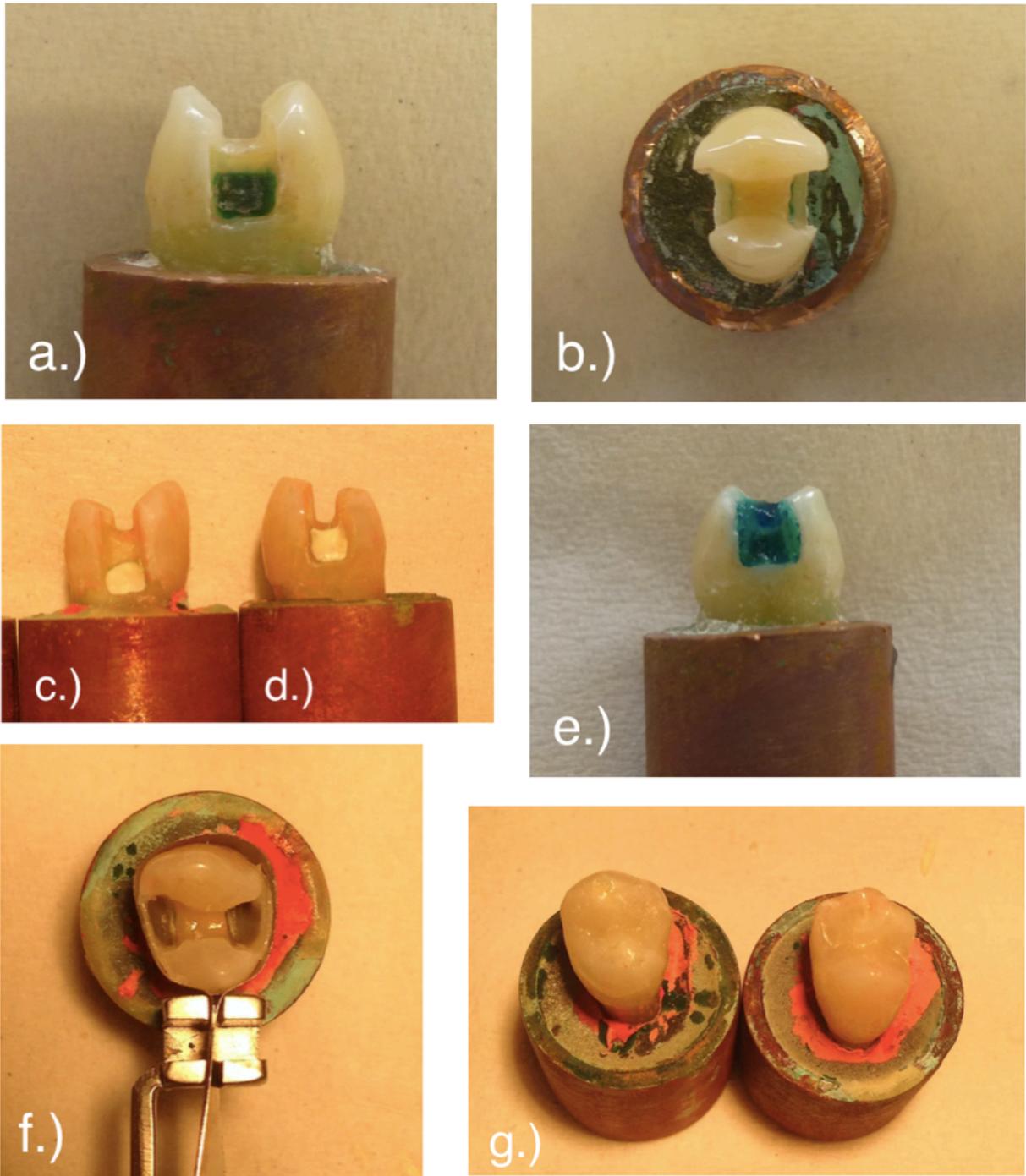


Abbildung 4: Beispielhafte Abbildung für Restaurationsablauf mit Komposit a.) und b.) Beispiel für gereinigte Probe nach Abschluss der Demineralisationsphase. Die grünliche Verfärbung im Bereich der künstlichen Läsion wurde durch den Kupferferring hervorgerufen. c.) und d.) Beispiel für Proben mit dünnem Auftrag eines härtenden Kalziumhydroxidliners (Kerr Life, Kerr, Scafati, Salerno, Italien) im Bereich der künstlichen Demineralisation vor Applikation eines lichts härtenden Glasionomerzementes (Vitrebond Plus, 3 M ESPE, St. Paul, Maine, USA) c.) Beispiel für die distale Ansicht einer Probe mit Kavitätenrand 1 mm unterhalb sowie d.) Beispiel für die mesiale

Ansicht einer Probe 1 mm oberhalb der Schmelz-Zement-Grenze e.) Beispiel für Vorbereitung der Kavität mit Phosphorsäuregel, via „Etch and Rinse“ - Technik, mit Ätzeit von 15 Sekunden im Dentin und 30 Sekunden im Schmelz. Anschließendes Absprühen, Trocknen, Rewetting und Konditionierung der Kavität mit Zweikomponenten-Adhäsiv f.) Beispiel für platzierte Tofflemire-Matrize und eingebrachtes Kompositmaterial in der Inkrementtechnik zur Minimierung der Polymerisationsschrumpfung. Man beachte, dass zur besseren Darstellung die Platzierung der Tofflemire-Matrize erst in diesem Arbeitsschritt erfolgte. g.) Beispiel für eine Kompositrestauration nach der Politur.

Zwischen den folgenden Phasen des Versuches wurden die restaurierten Proben in DMM Medium (vgl. hierzu Tabelle 2) mit Zusatz von 500 ppm NaFl im Kühlschrank (6° Celsius) gelagert, die Flüssigkeit wurde regelmäßig, mindestens 1 × die Woche, kontrolliert und ausgetauscht.

Tabelle 2: DMM-Medium: modified defined Mucine Medium

Stoff	Ansatz in l	Konzentration in mmol/l	Menge in g
Kalziumchlorid-Dihydrat	2	1,0	0,294
Magnesiumchlorid-Hexahydrat	2	0,2	0,081
Kaliumdihydrogenphosphat	2	0,5	0,136
Kaliumhydrogenphosphat-Trihydrat	2	0,5	0,17418
Natriumchlorid	2	1,0	0,117
Kaliumchlorid	2	3,0	0,447
Ammoniumchlorid	2	0,2	0,021
Harnstoff (Urea)	2	0,5	0,060
Muzin*	2	-	5

*Muzin vom Schweinemagen Typ III

3.6 Thermomechanische Wechselbelastung

Alle Proben wurden möglichst realitätsgetreu einer künstlichen Alterung unterzogen. Zunächst wurde thermisch, dann mechanisch belastet. Es wurden jeweils 12 Proben in einem Behälter je 10 000 Zyklen wechselwarmer Wasserbäder bei 5 ° und 55° Celsius für 30 Sekunden ausgesetzt (liquid cycler, Haake, Karlsruhe, Germany), mit je 12 Sekunden Ruhezeit dazwischen, bei einer Gesamtdauer von circa 10 Tagen. Das Wasserbad war mit destilliertem Wasser gefüllt, das regelmäßig kontrolliert und ausgetauscht wurde. Die Proben wurden im Anschluss in einen Kausimulator (CS-4.8, Willytech, Feldkirchen-Westerham, Deutschland) eingebracht und für 1.2×10^6 Zyklen mit 5 kg/ 50 N beladen. Die Belastung erfolgte mit einer Steatitkugel ($\varnothing=5$ mm, Hoechst, Wunsiedel, Deutschland) bei einer Hubhöhe von 6 mm und einer Absenkgeschwindigkeit von 30 mm/Sekunde auf den bukkalen Höckerabhang des palatinalen Höckers, was eine Abgleitbewegung von palatinal nach mesio-zentral ermöglichte und die bei der Mastikation auftretenden Kräfte simulieren sollte. Die Proben wurden vorher mit entsprechenden Haltern beklebt (UHU Epoxidkleber, Bühl, Deutschland) und während der Kaubelastung in destilliertem Wasser gelagert.

3.7 Randspaltanalyse

Zur Randspaltanalyse wurden alle Zähne zu den Zeitpunkten T1 (nach Fertigstellung der Füllung) und T2 (nach der thermomechanischen Wechselbelastung) repliziert und unter 200facher Vergrößerung mit dem Rasterelektronenmikroskop untersucht. Vor der Abformung wurde zunächst der zu analysierende Bereich mit einem gelben Diamanten (Flamme, Henry Schein, Melville, Australien) manuell festgelegt und markiert. Die Proben wurden gründlich gesäubert und von Feuchtigkeit befreit. Für die Abformung wurde ein Silikonschlauch (Versilic, Geyer, Renningen, Deutschland) mit 10 mm Durchmesser in circa 2 cm lange Stücke geschnitten und als Förmchen verwendet. Es folgte eine Vorabformung der Proben im Silikonschlauch mit einem additionsvernetzenden Silikon (Provil novo Putty, Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland). Nach frühestens 3:30 Minuten wurden die Proben entfernt und der Abdruck großzügig im Analysebereich mit einem Skalpell ausgeschnitten (Einmal-Skalpell, Henry Schein, Melville, Australien). Die zweite Phase der Abformung erfolgte mit einem dünnfließenden additionsvernetzenden Silikon

(Honigum light, DMG, Hamburg, Deutschland), was sowohl in die Abformung als auch auf die Proben gegeben und vorsichtig verblasen wurde. Nach dem Aushärten wurden die Abformungen abgezogen und 24 Stunden trocken und dunkel gelagert. Die fertigen Abformungen wurden eingehend auf Vollständigkeit sowie Verziehungen geprüft und bei Bedarf erneuert.

Die hergestellten Abformungen wurden im Anschluss mit Alkohol und Azeton gesäubert und entfettet, mit Epoxidharz (Stycast 1266, Emerson and Cuming, Henkel, Westerlo, Belgien) ausgegossen, mit Füßchen (agar scientific, Essex UK, Vereinigtes Königreich) versehen und nach 24 Stunden entformt und nummeriert. Die Replika konnten nach einer abschließenden Prüfung auf Blasen und Abformfehler für 120 s bei 40 mA mit einer 20 nm dicken Goldbeschichtung zur Generierung der Leitfähigkeit besputtert werden. Im Anschluss wurden die Replika im Rasterelektronenmikroskop (AMRAY 1810, Amray, Bedford, USA) unter 200facher Vergrößerung betrachtet und verblindet analysiert (vgl. hierzu Tabelle 3 sowie Abbildung 5). Diese Analysemethode wurde bereits in anderen Studien angewandt und modifiziert (70,71). Die Proben wurden während und vor der Analyse staubdicht gelagert.

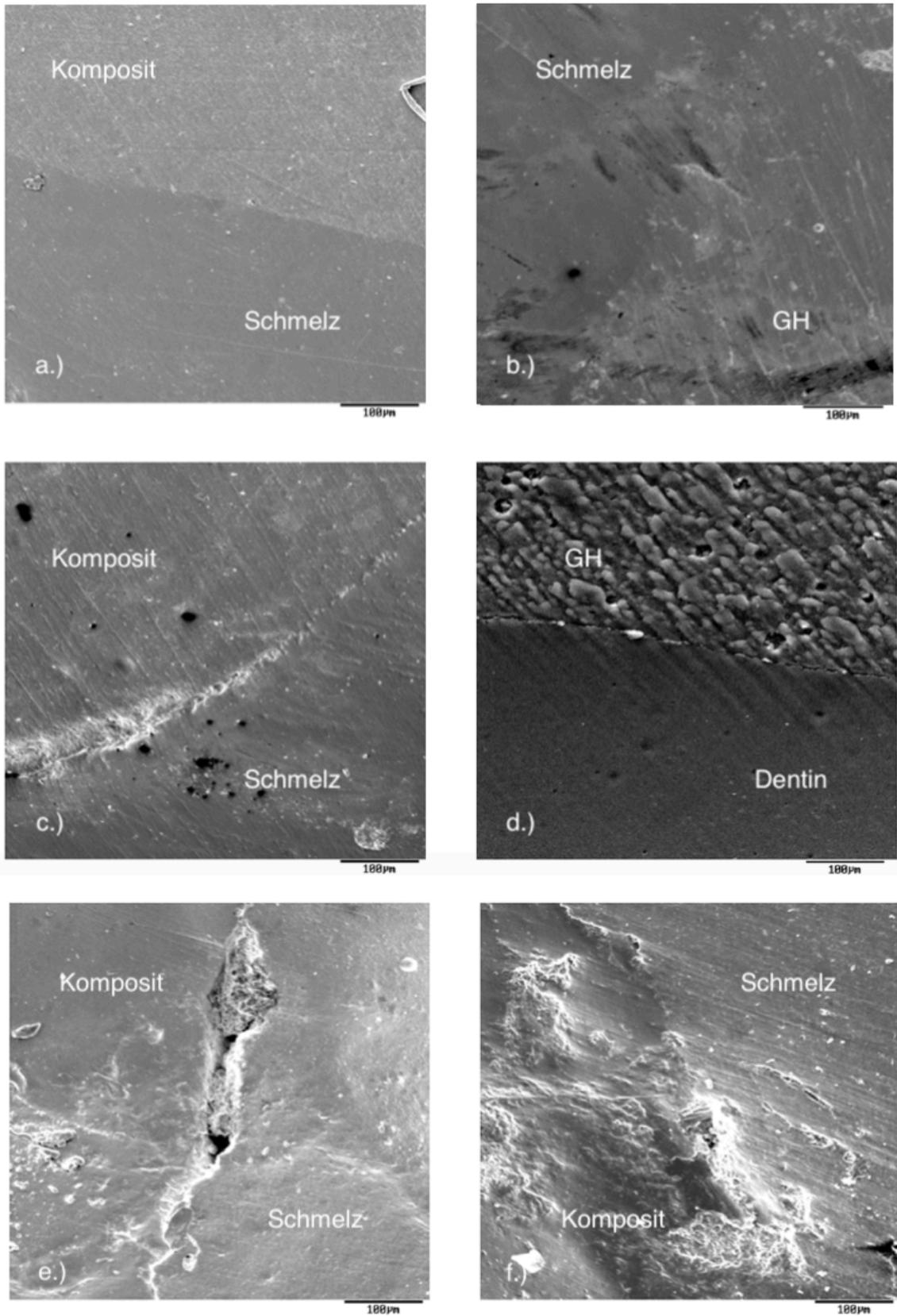


Abbildung 5: Rasterelektronische Aufnahmen der verschiedenen Randqualitäten der Restaurationsränder in Schmelz und Dentin (200fach vergrößert). Beispielhaft sind hier die Randqualitäten 1-5 zu sehen, vgl. hierzu Tabelle 3. a.) Beispiel für Randqualität 1,

Restaurationsmaterial: Komposit b.) Beispiel für Randqualität 1, Restaurationsmaterial: GH, c.) Beispiel für Randqualität 2, d.) Beispiel für Randqualität 3, e.) Beispiel für Randqualität 4, f.) Beispiel für Randqualität 5.

Tabelle 3.: Qualitäten 1-5 der Randspaltanalyse

Randqualität 1	-perfekter Rand -geringe Unregelmäßigkeiten
Randqualität 2	-massive Unregelmäßigkeiten -kein Spalt
Randqualität 3	-Haarriss, Spalt < 5 μm -mit und ohne Unregelmäßigkeiten
Randqualität 4	-Spalt > 5 μm -mit und ohne Unregelmäßigkeiten
Randqualität 5	-Überschuss -nicht beurteilbar

3.8. Biofilmmodell

Zur Vorbereitung auf die folgende Sekundärkariesinduktion wurden die Proben erneut mit Nagellack (Lotus Effect 43K, Manhattan, Mainz, Deutschland) bedeckt und im mesialen und distalen Randbereich der Füllung ein 2 × 2 mm großes Fenster frei gelassen. Im Anschluss wurden die Proben für 14 Tage in ein computergesteuertes Modell gegeben, in dem sie täglich mit deMan-Rogosa-Sharpe-Medium (MRS), *Lactobacillus rhamnosus*, sowie Natriumfluorid und DMM-Medium umspült wurden. MRS-Medium mit über Nacht angesetzten Kulturen *L. rhamnosus* (DSM200/21) wurde täglich zu Beginn des Tages für 30 Minuten hinzugegeben, es folgte 1 Stunde Pause. Natriumfluorid in destilliertem Wasser (250 ppm) wurde per Hand hinzugegeben und die Proben für 10 Minuten damit umgeben. In je 5 Pumpzyklen pro Tag wurde abwechselnd steriles MRS-Medium (2% Saccharose, 250 μ g/ml Amphotericin B) für je 45 Minuten und steriles DMM-Medium für je 30 Minuten hinzugegeben, im Anschluss folgten 6 Stunden Ruhezeit.

Bei jedem Pumpvorgang wurden bei einer Flussrate von 100 ml pro Minute 200 ml Flüssigkeit verwendet; die Proben waren während der gesamten Versuchszeit bei 100% Feuchtigkeit im Brutschrank bei 37° Celsius. Eingesetzt wurden Pumpen (Type PR1, Seko, Mainz, Germany), verbunden mit autoklavierten Zu-/Abflusssilikonschläuchen mit variablem Durchmesser (Rotilabo - Silikonschlauch, Innendurchmesser 2,5 mm, Karlsruhe Deutschland; VWR Silicone, Peroxide Tubing, Innendurchmesser: 4 mm, Leuven, Belgien), gesteuert von programmierbaren Steckdosen. Nach 2 Wochen wurde der Versuch beendet und die Proben unter sterilen Kautelen untersucht. Der Biofilm im ausgewählten Untersuchungsbereich wurde mit einem Skalpell vorsichtig abgehoben, in 0,9% Kochsalzlösung gelöst und in 6 Verdünnungsstufen (10^{-1} – 10^{-7}) auf MRS Agar zur Koloniebildung aufgetragen. Die Auszählung erfolgte manuell nach 48 Stunden.

3.9 Transversale Mikroradiografie

3.9.1 Probenherstellung für die Mikroradiografie

Die Auswertung der induzierten Läsionen erfolgte mittels transversaler Mikroradiografie (TMR). Die Proben wurden hierfür mit der diamantierten Bandsäge (Exakt 3000 L, Exakt Apparatebau, Norderstedt, Deutschland) unter konstanter Wasserkühlung vom Kupferrohr getrennt und von Akrylharz (Technovit 4071, Heraeus Kulzer, Hanau, Deutschland) gefasst. Es folgte eine Teilung (mesiodistal) durch den demineralisierten Bereich. Alle Reste wurden als Reserveprobe in DMM-Medium gelagert. Die Zähne wurden nach Begradigung und Politur der Oberfläche mit Sekundenkleber (Orbis dental, Offenbach, Deutschland) auf einen Objektträger auf Plexiglas (Diaplas, Oststeinbeck, Deutschland) geklebt, wobei nur der Technovitanteil, nicht die Zahnhartsubstanz Kontakt zum Sekundenkleber hatte, so dass die Probe unberührt blieb. Die Proben wurden mit einer Schleifmaschine (Exakt 400 CS, Steuerungselement Exakt AW 110) plan geschliffen, auf circa 350 µm reduziert und anschließend mit Siliziumcarbid - Schleifpapier mit 1200er und 4000er Körnung poliert. Die finale Dicke der Proben betrug 200 µm, kontrolliert wurde diese mit einem digitalen Messschieber. Pro Zahn wurden zwei Schriffe hergestellt mit je einem Füllungsrand im Schmelz- und einem im Dentinbereich (vgl. hierzu Abbildung 6).

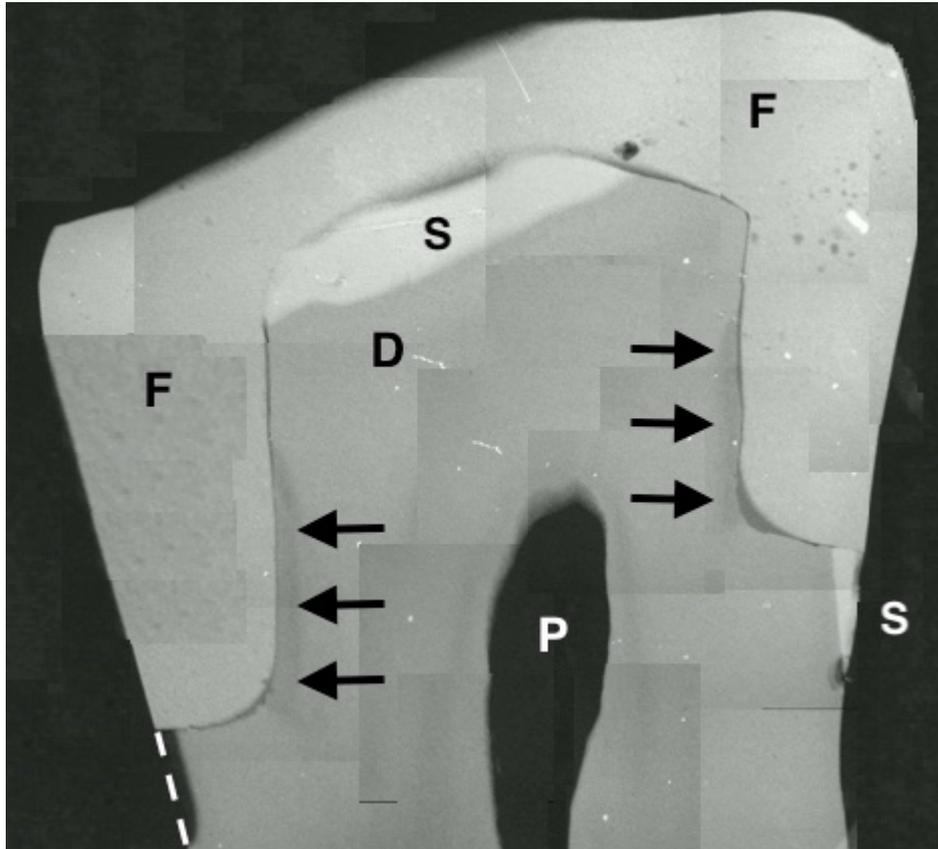


Abbildung 6: Beispielhafte Mikroradiografie einer restaurierten Probe modifiziert nach (1). Es handelt sich hierbei um eine Glashybridrestauration. Die Füllung (F), Schmelz (S), Dentin (D), Pulpa (P) und die künstliche Residualläsion (dunkle Pfeile) sind sichtbar. Auf der Dentinoberfläche im linken Bildausschnitt ist eine sekundäre äußere Läsion, durch das Biofilmmodell induziert, sichtbar (die weiße gestrichelte Linie zeigt den ursprünglichen Verlauf des Dentins). Auch im Schmelzbereich am rechten Bildrand finden sich Demineralisierungen. Da die Grafik aus mehreren Röntgenaufnahmen besteht, zeigen sich quadratische Artefakte (vor allem in linken Bereich der Füllung).

Zur Vorbereitung auf das Röntgen wurden die Proben mithilfe eines Einmalskalpells (Henry Schein, Melville, Australien) aus dem Akrylharz herausgelöst und mit einem Klebestreifen (Tesafilm kristallklar, Norderstedt, Deutschland) im Probenhalter (LEGO, Billung, Dänemark) fixiert. Vor und nach dem Röntgenbild wurden die Proben in Aqua dest. gelagert.

3.9.2 Anfertigung der transversalen Mikroradiografien

Die transversale Mikroradiografie beschreibt eine röntgenologische Untersuchungsmethode zur Darstellung von Mineralgehalten von Zahnhartsubstanzen. Die Proben wurden hierfür in das linsenlose Gehäuse eines Fotoapparates eingebracht und von einer Nickel-Kupfer-Röntgenquelle (PW3830, Pananalytical, Kassel, Deutschland) mit 20 kV und 20 mA geröntgt. Die Röntgenquelle befand sich dabei in 34 cm Distanz zum Objekt; die Belichtungszeit betrug 10 Sekunden. Nach Herstellerangaben wurde der Film (35 mm B/W positive, Fujifilm, Tokio, Japan) im Anschluss per Hand entwickelt.

3.9.3 Auswertung der TMR

Zur Auswertung wurde ein Analyseprogramm für digitale Bilder (CFW 1312M, Scion, Frederick, U.S.A.) genutzt, welches mit einem Universalmikroskop (Axioplan 60318, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) und einem Personalcomputer (TMR für Windows 5.25, UMCG, Gröningen, Niederlande) verbunden war. Das Mikroskop digitalisierte die unter fünffacher Vergrößerung angefertigten Bilder (vgl. hierzu Abbildung 7) und überspielte sie auf den Computer. Es wurden alle Proben auf ihren Mineralisationsverlust (Vol.% \times μm) und ihr Tiefenprofil (μm) untersucht. Alle Zähne wurden sowohl auf Wandläsionen als auch die Präsenz von äußeren Demineralisationszonen im Sinne einer Füllungsrandkaries untersucht. Keine Probe wies eine Wandläsion auf. Bei heterogenen Läsionen wurden die tiefsten Bereiche der Läsion untersucht und ein Mittelwert aus den zwei Messwerten der beiden Schnitte (pro Probe) gebildet.

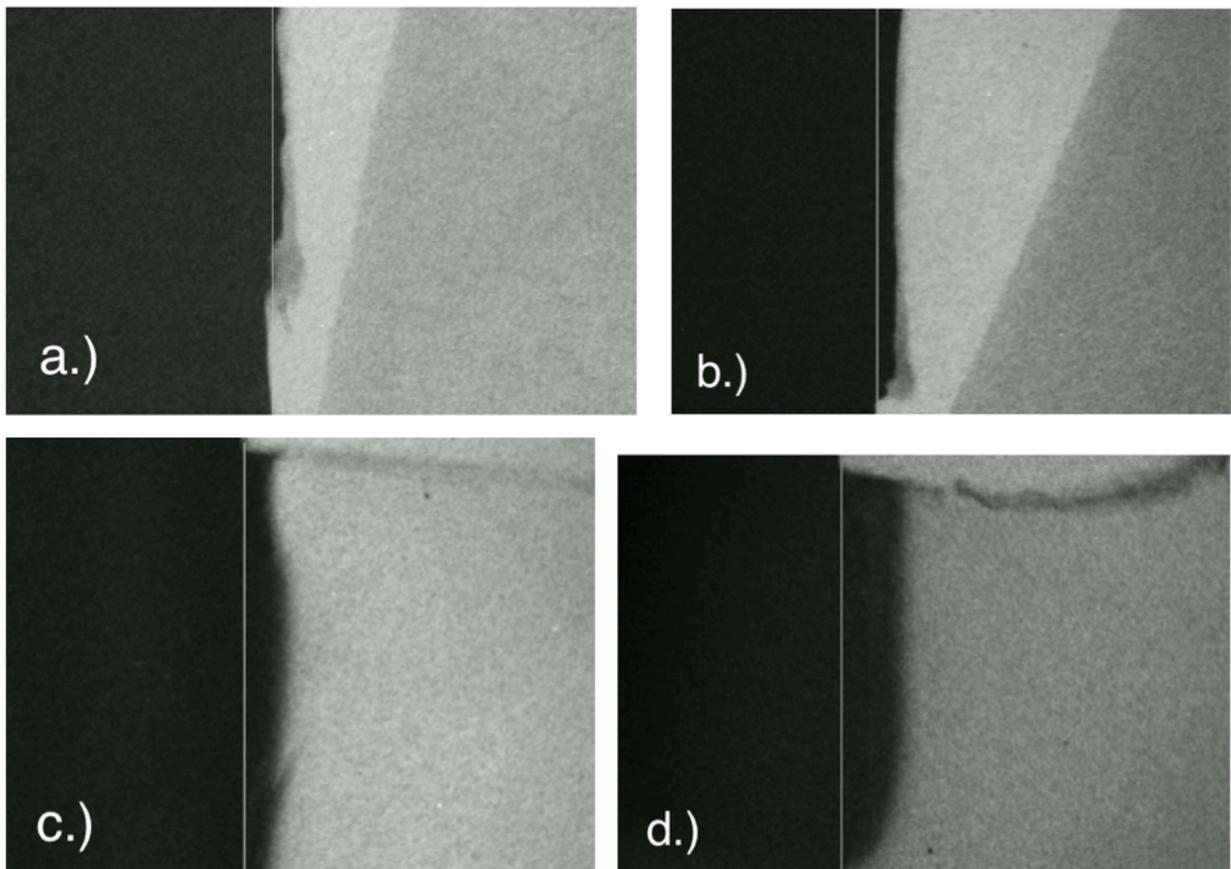


Abbildung 7: Füllungsänder in Schmelz und Dentin unter fünffacher Vergrößerung a.) und b.) Beispiele für eine äußere Läsion im Schmelz. Dargestellt ist der Bereich der tiefsten Läsion ohne Füllungsanschnitt. Die senkrechte Linie verdeutlicht den ursprünglichen Verlauf des Schmelzes vor Induktion der Demineralisation und damit die Oberfläche der Läsion. c.) und d.) In beiden Abbildungen sind Beispiele für äußere Läsion im Dentin unter fünffacher Vergrößerung zu sehen. Am oberen Bildrand angeschnitten findet sich Füllungsmaterial, in der rechten Bildhälfte Dentin. Die senkrechte Linie ermöglicht auch hier ein Nachvollziehen des ursprünglichen Verlaufs vor Demineralisation und zeigt die Oberfläche der Läsion. Man beachte besonders bei d.) den Spalt zwischen Füllungsmaterial und Dentin; es handelt sich um ein herstellungsbedingtes Artefakt.

3.10 Statistische Analyse

Die Daten wurden mit SPSS 20 (IBM, Armonk, U.S.A.) ausgewertet. Ob eine Normalverteilung vorlag, wurde mit dem Shapiro-Wilk-Test untersucht. Zum Vergleich der

Gruppen wurde der Mann-Whitney-U-Tests verwendet; das Signifikanzniveau wurde bei allen Tests auf 5% ($\alpha = 0,05$) festgelegt.

4 Ergebnisse

4.1 Randspaltanalyse

GH sowie RC_NCH zeigten signifikant mehr Randanteile mit Irregularitäten ($p < 0.05$; Mann-Whitney-U) als RC und RC_SCH (vgl. hierzu Abbildung 8). GH zeigte außerdem mehr Randunregelmäßigkeiten im Sinne von Spalten sowohl im Dentin als auch im Schmelz als die Vergleichsgruppen ($p < 0.05$). RC zeigte weitgehend einen perfekten Rand mit geringen Unregelmäßigkeiten in Schmelz und Dentin.

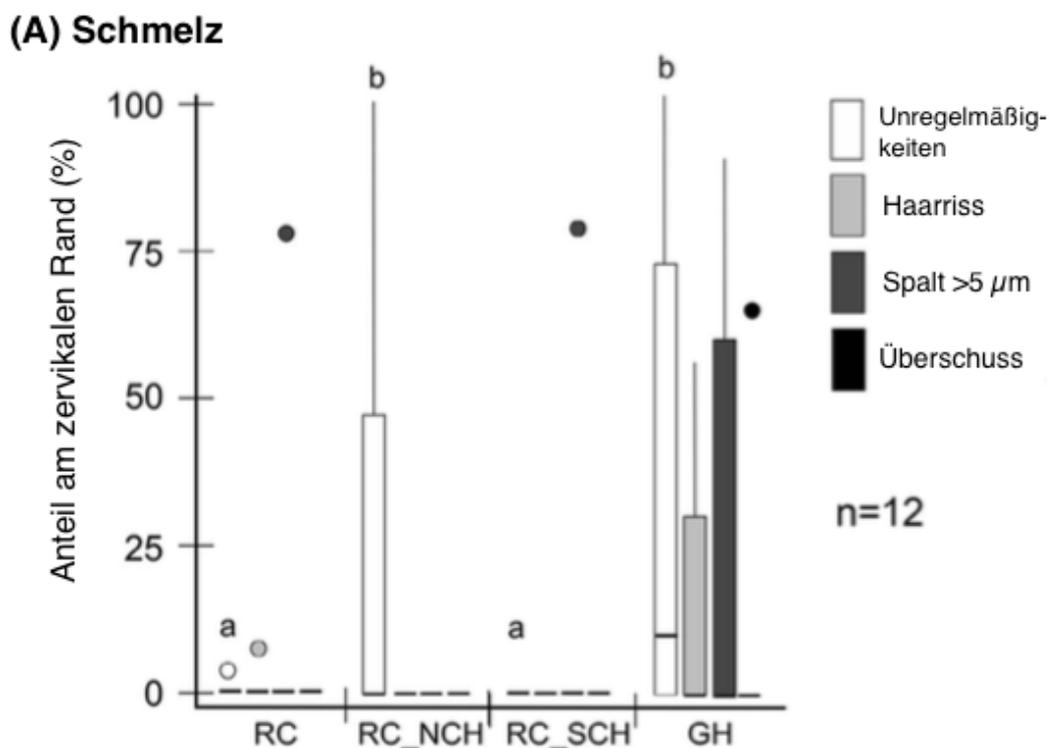
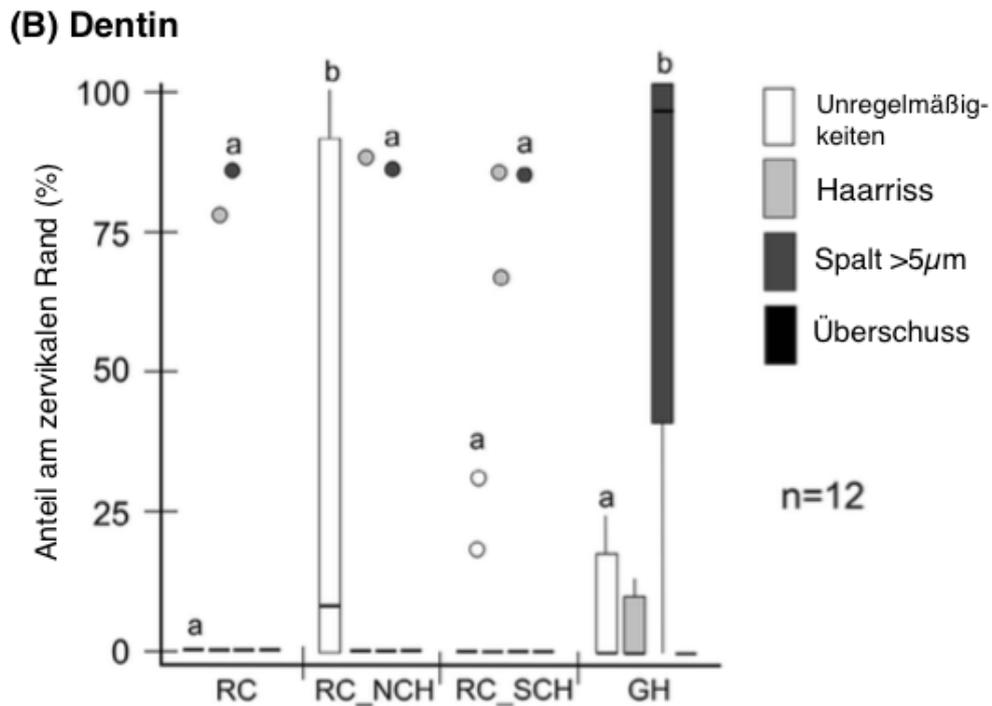


Abbildung 8: Randintegrität in Abhängigkeit der verschiedenen Restaurationsmaterialien nach thermomechanischer Wechselbelastung modifiziert nach (1). Dargestellt ist die Randintegrität in Abhängigkeit von den verschiedenen Restaurationsmaterialien nach thermomechanischer



Wechselbelastung. Es wurden die zervikalen Ränder in Schmelz (A) und Dentin (B) untersucht und nach folgenden Randqualitäten beurteilt: 1 - perfekter Rand, geringe Unregelmäßigkeiten, 2 - massive Unregelmäßigkeiten, aber kein Spalt (hier dargestellt in weiß), 3 - Haarriss, Spalt < 5 µm, mit und ohne Unregelmäßigkeiten (hellgrau), 4 - Spalt > 5 µm, mit und ohne Unregelmäßigkeiten (dunkelgrau), 5 - Überschuss, nicht beurteilbar (schwarz). Die hochgestellten Zahlen weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen hin ($p < 0,05$, Mann-Whitney U Test). n bezeichnet die Anzahl an Proben pro Gruppe. Die Umrisse der schattierten/weißen Kästen bezeichnen den Interquartilsabstand, die Linie den Median. Die Antennen zeigen die Variationsbreite der ermittelten Ergebnisse; die Kreise abweichende Ergebnisse (Ausreißer).

4.2 Ergebnisse der mikroradiografischen Untersuchung

Der Mineralisationsverlust der Sekundärkaries war im Dentin im Vergleich zum Schmelz deutlich höher ($p < 0.05$), aber ohne signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen ($p > 0.05$; Mann-Whitney U test) (vgl. hierzu Abbildung 9 und 10).

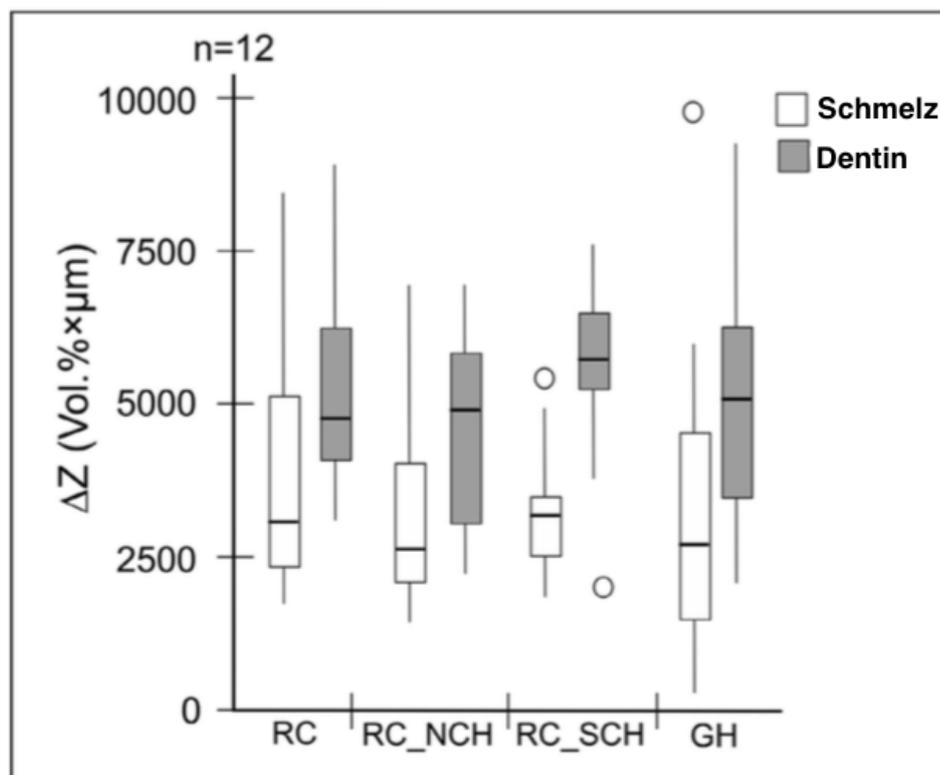


Abbildung 9: Darstellung des Mineralverlustes der kariösen Läsionen nach Schwendicke et al. (1). Darstellung des Mineralverlustes (ΔZ) der kariösen Läsionen in Schmelz (weiß) und Dentin (grau), angrenzend an die Füllung, nach Schwendicke et al. (1). N stellt die Anzahl an Proben pro Gruppe dar. Der Interquartilsabstand wird dargestellt durch den Umriss der schattierten/weißen Kästen; die Linie zeigt den Median. Die Antennen stellen das Minimum und Maximum dar. Kreise: Ausreißer.

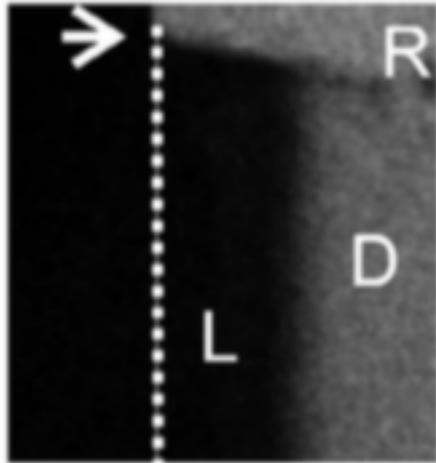


Abbildung 10: Darstellung des Mineralverlustes angrenzend an eine beispielhafte Restauration nach (1): Wir analysierten mit transversalen Mikroradiografien die Läsionen in Schmelz und Dentin. Dargestellt ist hier eine Läsion im Dentin (D). Die gepunktete Linie zeigt die Oberfläche der Läsion und den ursprünglichen Verlauf der Zahnhartsubstanz. In keiner Probe konnte eine Wandläsion festgestellt werden, es wurden ausschließlich äußere Läsionen gefunden.

4.3 Mikrobiologische Auswertung

Der Biofilm wurde im gingivozervikalen Bereich im Schmelz und Dentin in 12 Proben pro Gruppe untersucht. Die Anzahl der koloniebildenden Einheiten zeigte keine signifikanten Unterschiede ($p > 0.05$, Mann-Whitney U Test) (vgl. hierzu Tabelle 4).

Tabelle 4: Bakterienzahlen im Biofilm im Bereich des Füllungsrandes nach Schwendicke et al. (1). Dargestellt ist der Median sowie die 25./75. Perzentile von $10^5 \times$ koloniebildenden Einheiten.

Gruppe	Schmelz	Dentin
RC	8 (3/43)	26 (8/79)
RC_NCH	7 (4/26)	13 (9/19)
RC_SCH	11 (5/21)	11(9/46)
GH	18 (13/49)	28 (20/43)

5 Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde bei selektiv exkavierten Kavitäten GH bezüglich Randintegrität und Anfälligkeit für Sekundärkaries mit Kompositrestaurationen verglichen. Des Weiteren sollte die Auswirkung von Kalziumhydroxidlinern auf den Füllungsverbund und einen möglichen Zusammenhang zur Manifestation von Sekundärkaries untersucht werden. Die Plaqueanlagerung im Füllungsrand sollte anhand der Bestimmung der koloniebildenden Einheiten untersucht und innerhalb der Gruppen auf signifikante Unterschiede verglichen werden. Der direkte Vergleich von Kavitäten mit selektivem und nonselektivem Exkavationskonzept wurde nicht untersucht, da bereits Arbeiten zu dieser Thematik existierten (72,73). In einer Studie konnte gezeigt werden, dass die selektive im direkten Vergleich zur nonselektiven Exkavation keinen negativen Effekt auf die Frakturresistenz hat, vielmehr ist die Tiefe der kariösen Läsion signifikant entscheidend (74). Die Höckerdehnung bei selektiv exkavierten Zähnen war im Gegensatz dazu jedoch signifikant erhöht. Ein Grund dafür könnte die verminderte Haftkraft des Adhäsivsystems an demineralisiertem Dentin sein. Bei weiterer Belastung könnte eine erhöhte Höckerdehnung zum Verlust des Klebeverbundes zwischen Restauration und Zahn und so zu einem erhöhten Risiko für Sekundärkaries führen. In unserer Studie zeigte die Verwendung eines Kalziumhydroxidliners sowie die Verwendung von GH einen signifikant nachteiligen Effekt auf die Füllungsrandqualität. Unsere Versuche konnten aber keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Anfälligkeit für Sekundärkaries feststellen. Sowohl die mikrobiologische als auch die mikroradiografische Analyse ergaben keine signifikanten Unterschiede zwischen den Gruppen.

5.1 Diskussion von Material und Methoden

5.1.1 Allgemeiner Versuchsaufbau

Die Herkunft der eingesetzten Zähne war unbekannt, individuelle Faktoren wie das Alter der Patienten und die damit zusammenhängende zurückliegende Fluoridexposition sowie altersbedingte Strukturunterschiede wurden nicht berücksichtigt. Da es sich ausschließlich um karies- und füllungsfreie Prämolaren handelt, liegt eine eher kurze Verweildauer im Mund oder eine fortgeschrittene parodontale Schädigung nahe.

Hierüber gibt es keine genauen Aufzeichnungen. Dies könnte die Ergebnisse in nicht absehbarer Weise beeinflusst haben. Durch die randomisierte Aufteilung kann von einer gemischten Zusammensetzung der Gruppen ausgegangen werden.

Die Zähne wurden vor Versuchsbeginn in 0,1% Thymollösung gelagert. Thymollösung wurde bereits in Studien mit ähnlichem Design verwandt (74), zeigte in vergangenen Studien keinen degradierenden Effekt auf die Zahnhartsubstanz sowie die Haftung von Komposit am Schmelz und Dentin und eignet sich auch aufgrund seiner bakteriziden und bakteriostatischen Eigenschaften gut zur Lagerung von Zahnproben (75). Zwischen den einzelnen Versuchsabschnitten und zur Simulation einer Remineralisierung über Speichelflüssigkeit wurden die Proben in modified defined Mucin Medium (DMM) mit Zusatz von 500 ppm Fluorid gelagert. DMM eignet sich zur Kultivierung einer (dentalen) Plaque (76), Beeinträchtigungen des mechanischen Füllungsverbandes sind unwahrscheinlich, können aber nicht ausgeschlossen werden. Während der Versuchsdurchführung wurden die Zähne in Kupferrohre eingebettet. Die natürliche Eigenbeweglichkeit der Zähne wurde hier nicht nachgestellt. Das Akrylharz zeigt wenig Elastizität, nicht zu vergleichen mit der durch den parodontalen Halteapparat gewährleisteten Eigenbeweglichkeit. Die Kaubelastung, die die Proben erfuhren, ist also begrenzt vergleichbar zur Situation im Patientenmund; zur besseren Simulation ist die Einlage einer künstlichen Parodontalmembran denkbar (77).

Im weiteren Ablauf des Versuches wurde eine Standardkavität mittels Kopierschleifgerät auf alle Zähne übertragen. Aufgrund der genauen Vermessung der Zähne und der geringgradigen individuellen Größenschwankung war dies problemlos möglich. Keine Beachtung bei der Vermessung erfuhr die individuelle Höckerlänge, so dass je nach Länge und Masse des Zahnes die gewählte Standardkavität unterschiedliche Proportionen aufwies. Darüber hinaus ist eine substanzschonende Exkavation unter klinischen Bedingungen in der Regel unterschneidig und variabel in ihrer Ausdehnung, was hier aufgrund der Übertragbarkeit mittels Kopierschleifgerät nicht möglich war. Es folgte die Erzeugung künstlicher Läsionen an den pulpoaxialen Wänden. Die induzierten kariösen Läsionen gleichen natürlichen Läsionen in Bezug auf ihre mechanischen Eigenschaften und ihren Mineralgehalt (78). Diese Lokalisation wurde gewählt, da an Prämolaren vor allem an den approximalen Zahnflächen Karies entsteht und demnach an diesen Wänden die tiefste Läsionsausdehnung zu erwarten ist. Da pulpoaxial die Pulpenexposition am wahrscheinlichsten ist, wurde hier die selektive Exkavation mit Zurücklassen von weichem Dentin simuliert. Sollte die Exkavation vorzeitig beendet und

mehr kariöses Gewebe zurückgelassen werden, so sind abweichendes Materialverhalten und andere Ergebnisse denkbar.

Es wurde ausschließlich der approximale Füllungsrand untersucht. Die Untersuchung okklusaler Läsionen sowie die Analyse von Läsionen an Frontzähnen und Molaren könnte durch eine abweichende Kaubelastung und eine andere Belastung (auf die Läsion statt entlang zu ihr) zu anderen Ergebnissen führen (19). Es wurde das Etch and Rinse - Adhäsiv OptiBond FL verwendet, dies zeichnet sich durch stabile und hohe Haftwerte mit geringer Streuung der Messwerte aus und wird daher häufig in Studien eingesetzt (79). Die Applikation erfolgt in drei Arbeitsschritten, sodass Verarbeitungsfehler durch den Behandler dabei im Gegensatz zu selbstadhäsiven System nicht ausgeschlossen werden und zu verminderten Haftwerten führen können (80). In dieser Studie wurden die einzelnen Schritte sorgfältig den Herstellerangaben gemäß ausgeführt um Verarbeitungsfehler zu vermeiden.

Die Proben wurden im Anschluss thermomechanisch wechselbelastet. 10.000 Thermowechselzyklen entsprechen ungefähr der Alterung von einem Jahr (81), die Aufnahme von heißen und kalten Nahrungsmitteln wird hier durch wechselwarme Wasserbäder (5° C und 55°C) simuliert und kann aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten von Restaurationmaterial und Zahn zu Spannungen im Randbereich führen. Durch Haftverluste am Füllungsrand können Randspalten entstehen und die Bildung von Sekundärkaries wird ermöglicht (82). Die bei der Mastikation auftretende Belastung wurde möglichst realitätsnah durch eine Abgleitbewegung von palatinal nach mesio-zentral im Kausimulator nachgestellt; die Belastung von 5 kg bei $1,2 \times 10^6$ Kauzyklen soll eine 5-jährige Alterung simulieren. In klinischen Studien wurde geschätzt, dass Zähne pro Jahr circa 250.000 Kauzyklen ausgesetzt sind (83). Parafunktionen mit übermäßiger Beanspruchung wie z.B. Bruxismus wurden hier nicht berücksichtigt.

Das experimentelle Kariesmodell imitierte die Bedingungen der Mundhöhle weitestgehend. Die Proben waren dem feucht-warmen Milieu einer kariogenen Bakterienflora, Speichel in natürlicher Zusammensetzung sowie Fluoridzufuhr durch Mundhygieneprodukte und einer nächtlichen Ruhephase ausgesetzt. Der Einsatz einer Monokultur von *Lactobacillus rhamnosus* stellt eine starke Vereinfachung des komplexen Mundhöhlenmilieus dar. Individuelle Unterschiede (Mundhygiene, Speichelzusammensetzung, Ernährung, variable Kaubelastung usw.) konnten nicht berücksichtigt werden. In aktuellen Studien wurde außerdem der mögliche

begünstigende Effekt von artifizieller mastikatorischer Belastung auf die Entstehung von Sekundärkaries durch einen „Pumpeffekt“ betont, sodass in einer klinischen Umgebung die Anfälligkeit für Sekundärkaries sowie die langfristige Randintegrität nicht nur zwischen den Materialklassen, sondern auch zwischen den Patienten große Unterschiede zeigen könnten (84,85,86,87).

Die Anwendung der Lösung nach Buskes et al. zur Induktion von Residualläsionen führt bezüglich mechanischer Eigenschaften und Mineralgehalt zu nachweislich ähnlichen Läsionen wie klinisch zu beobachten (78), allerdings fehlen remineralisierende Effekte. Die Bildung von Tertiärdentin durch pulpale Prozesse oder der Einfluss von Kavitätenlinern oder Restaurationsmaterialien könnten die mechanische Stabilität erhöhen und die Ergebnisse in positiver Weise beeinflussen.

5.1.2 Analyse

Die Analyse der Füllungsråder erfolgte mit einer indirekten Methode - die Proben wurden abgeformt und repliziert, besputtert und anschließend im Rasterelektronenmikroskop hinsichtlich ihrer Randqualität beurteilt. Vorteil dieser Analysemethode ist die Archivierbarkeit der detailgetreuen Replika der Restauration, nachteilig sind die zweidimensionalen Bilder, die keine Beurteilung der Tiefenausdehnung von Randirregularitäten erlauben. Sind die Bilder nicht achsengenau aufgenommen, können Verzerrungen zu Fehlbeurteilungen führen.

Für die transversale Mikroradiografie wurden alle Proben in mesiodistaler Ausrichtung halbiert; die Teilung wurde dabei im Bereich der größten Demineralisation angelegt, soweit dies mit einer Vergrößerungshilfe erkennbar war. Entsprechend sollten die TMR-Bilder exakt orthogonal zur Läsion ausgerichtet sein. Eine divergierende Achse, die nicht ausgeschlossen werden kann, würde zu verzerrten Röntgenbildern und abweichenden Ergebnissen führen. Es muss zudem beachtet werden, dass der Mineralverlust nur an 2 Bereichen pro Probe untersucht wurden, diese aber nicht zwingend den Abschnitt der stärksten Unregelmäßigkeit des Füllungsrandes sowie die stärkste Demineralisationszone darstellen. Die mikroradiografische Analyse gilt als Goldstandard der Quantifizierung von Re- und Demineralisationsvorgänge. Ihre Anwendung ist weit verbreitet (20, 74, 88). Um die Limitation der transversalen Mikroradiografie, ihre

zweidimensionale Darstellung, zu umgehen, sollten in weiterführenden Studien andere Methoden, zum Beispiel das Mikro-CT, angewandt werden.

5.2 Schlussfolgerung und klinische Relevanz

Traditionelle Exkavationskonzepte strebten die vollständige Entfernung aller Bakterien aus einer Läsion an. Nach der Exkavation von sowohl bakteriell durchsetztem als auch bakterienarmen, demineralisiertem Dentin konnte in einer retentiv präparierten Kavität eine Restauration platziert werden. Moderne Konzepte betonen hingegen die Wichtigkeit der Ursachenbekämpfung (Biofilmaktivität, Ernährung) und verfolgen einen anderen Ansatz - Bakterienfreiheit ist nicht obligatorisch, da entsprechend der ökologischen Plaquehypothese eine dichte Versiegelung zurückbleibende Bakterien von Nahrungskohlenhydraten abschneidet und diese absterben. Studien zeigten zudem, dass auch bei nonselektiver Exkavation Bakterienfreiheit nicht umzusetzen ist und stets Mikroorganismen in der Kavität verbleiben (89). Die Restauration kann zudem mit modernen Restaurationsmaterialien adhäsiv eingebracht werden, sodass eine retentive Präparation nicht benötigt wird. Hauptziele bei der Behandlung von tiefen kariösen Läsionen (Läsionen bis in das innere Dentindrittel) sollten daher sowohl der Erhalt der Pulpenvitalität sowie die Platzierung einer langfristig stabilen Restauration zur Wiederherstellung der Reinigungsfähigkeit (im Sinne einer Tertiärprophylaxe) sein.

Bei der selektiven Exkavation verbleibt weiches, kariöses Dentin in Pulpennähe. Die selektive Kariesentfernung bis zum weichen Dentin oder die Anwendung einer schrittweisen Kariesentfernung reduziert das Risiko einer Pulpenexposition im Vergleich zur nonselektiven oder selektiven Kariesentfernung bis zum festen Dentin signifikant (73). Das Risiko restaurativer Komplikationen scheint hingegen beim Zurücklassen großer Mengen weichen Dentins erhöht; die Restauration ist durch das darunterliegende Dentin nicht ausreichend unterstützt, der mechanische Haftverbund ist vermindert und es kommt eher zum Versagen. Die vorgelegte Studie untersuchte den Einfluss der Nutzung verschiedener restaurativer und Liningmaterialien zur Restauration von Kavitäten nach selektiver Exkavation. GH zeigte vergleichsweise geringe Randqualität mit einem hohen Anteil von Irregularitäten oder ausgeprägten Spalten. Außerdem wurde der nachteilige Effekt von nicht-härtenden Kalziumhydroxidlinern auf die Randintegrität bestätigt. Wir können demnach die Hypothesen 1 und 3 annehmen. Hingegen waren weder die

Anfälligkeit für Sekundärkaries noch die Bakterienzahl in den Biofilmen im Randbereich signifikant verschieden zwischen den Gruppen. Die Hypothesen 2 und 4 müssen daher abgelehnt werden.

Das beobachtete Randspaltverhalten von GH ist mit der Materialbeschaffenheit und der fehlenden Polierbarkeit verbunden, weshalb diese Materialien in vielen Ländern nicht für den Einsatz als permanente Restauration empfohlen werden. Die Applikation eines Methakrylatkunststoffs auf die krafttragende Oberfläche vermindert die Verschleißtoleranz dabei nicht, versiegelt aber oberflächliche Porositäten oder Risse (90). Der Lack soll zudem das ästhetische Erscheinungsbild verbessern und GH vor Feuchtigkeit und Austrocknung schützen (67). Da der Kunststoff nicht auf die approximalen Oberflächen gelangt, sind Randirregularitäten in gingivozervikalen Regionen aber sehr wahrscheinlich unvermeidbar. In einer klinischen Studie zeigte die poröse Oberflächenstruktur der Glasionomere im Vergleich zu Kompositen eine erhöhte Plaqueanlagerung und damit ein gestiegenes Risiko für Sekundärkaries (91). Im Gegensatz dazu stehen die einfache Anwendung von Glasionomerzementen auch bei ungünstigen Bedingungen, ihre chemische Haftung an der Zahnhartsubstanz sowie antibakterielle Effekte und die Remineralisation durch Abgabe von Fluoriden (63). In unserer Studie konnten diese Effekte nicht bestätigt werden, allerdings hatte die verminderte Randqualität im Vergleich zu Kompositrestaurationen keinen signifikanten Effekt auf die bakterielle Kolonisation oder Sekundärkariesentstehung.

Wir konnten keinen grundsätzlichen Zusammenhang zwischen Randqualität und Mineralverlust der Wandläsion feststellen. Dies konnte bereits in einer vorangegangenen In-vitro-Studie beobachtet werden (72). Es scheint, als wären zur Ausbildung einer vollständigen Sekundärläsion (mit einer inneren „Wandläsion“ und einer äußeren Läsion) größere Spalten notwendig als jene unter dem Rasterelektronenmikroskop beobachteten Unregelmäßigkeiten. In unserem Versuch stellen sich die induzierten Läsionen ausschließlich als äußere Läsion dar. Größere Spalten könnten hingegen eine Leakage entlang des Füllungsrandes ermöglichen, sodass Bakterien oder Säuren eindringen und eine eigentlichen „Wandläsion“ entstehen könnte (87,92,93,94,95).

Das verstärkte Auftreten von Randirregularitäten nach thermomechanischer Belastung könnte ein Hinweis auf lokales Debonding sein. Die Proben mit Kompositrestauration ohne Linerapplikation zeigten im Gegensatz dazu mit wenigen Ausnahmen eine perfekte Randqualität in Schmelz und Dentin. So können unter Verwendung von modernen Adhäsivsystemen auch bei selektiver Kariesexkavation exzellente Ergebnisse und

Randintegritäten erzielt werden. Eine Studie mit ähnlichem Versuchsaufbau, allerdings mit einer Vergleichsgruppe mit nonselektiver Kariesentfernung bis zum harten Dentin, kam zum gleichen Ergebnis; die Auswahl des Exkavationskonzepts hatte keinen Einfluss auf die Randintegrität (72). In dieser Studie bedingte die Analyse der Randqualität, ebenso wie in der hier vorgestellten Arbeit, eine perfekte Ausarbeitung und Politur der Füllungsråder im Approximalbereich. Dieser Umstand ist unter klinischen Bedingungen nicht immer möglich und könnte die Randqualität und die Entstehung von Sekundärkaries in nicht absehbarer Weise beeinflusst haben.

Die Applikation einer wässrigen Kalziumhydroxidsuspension vor der Restauration scheint negative Effekte auf die Randqualität mit großen Anteilen an Irregularitäten und Rissen in sowohl Schmelz als auch Dentin zu haben; dies kann möglicherweise durch die mechanische Instabilität des Materials erklärt werden. Diese Umstände traten auf, obwohl das Liningmaterial ausschließlich im klar definierten Läsionsareal (1,5 mm × 2 mm, pulpoaxiale Wände) aufgetragen wurde, was unter klinischen Bedingungen möglicherweise nicht durchführbar ist. Erhärtende Kalziumhydroxidliner haben einen niedrigeren pH-Wert als Suspensionen und damit geringere antimikrobielle Wirkung, zeigen dafür aber kurzfristig eine höhere mechanische Stabilität. Nach längerer Liegedauer treten aber Resorptionserscheinungen auf und es kommt ebenso zur mechanischen Instabilität, sodass sie keine dauerhafte Abstützung für die Hauptfüllung bieten und bei möglicherweise limitiertem positiven Effekt zusätzliche Behandlungsschritte erfordern (48,96). Zunehmend werden auch die positiven Attribute des Kalziumhydroxids, wie remineralisierende und antibakterielle Effekte, in Frage gestellt, sodass Kalziumhydroxid von einigen Autoren nicht mehr als Mittel der ersten Wahl zur Vitalerhaltung der Pulpa angesehen wird (10,28,97,98,99). Für einen langfristigen Restaurationserhalt und eine vitale Pulpa scheint bei der Anwendung eines selektiven Exkavationskonzeptes vielmehr die Restorationsgröße, die Menge des zurückgelassenen Dentins sowie der präoperative Zustand der Pulpa entscheidend zu sein (74,100, 101).

Die beobachteten statistischen Nondifferenzen der Materialklassen bezüglich Sekundärkaries sind möglicherweise auf den begrenzten Umfang der Analyse zurückzuführen. Zur Feststellung signifikanter Unterschiede des Mineralverlustes im Schmelz, wären 4500 Proben notwendig gewesen. Für signifikante Ergebnisse im Dentin wären hingegen nur 87 Proben pro Gruppe für signifikante Ergebnisse erforderlich. Die klinische Relevanz von Unterschieden solcher Dimension erscheint jedoch begrenzt.

Folgende Studien sollten weitere restaurative Parameter untersuchen und die Ergebnisse zur Randintegrität um Materialermüdung und Frakturstabilität ergänzen. Sie könnten zusätzlich Finite-Elemente-Analysen einsetzen, um die Effekte von Liningmaterialien und anderen Fragestellungen besser verstehen zu können.

6 Zusammenfassung

Innerhalb der Limitationen dieser Studie zeigten GH und Kompositrestaurationen, die mit einem wässrigen Kalziumhydroxidliner versorgt worden waren, geringere Randintegritäten als Kompositrestaurationen ohne Liner sowie jene mit härtendem Kalziumhydroxidliner. Allerdings spiegelten sich diese Unterschiede in der Randintegrität nicht in der Anfälligkeit für Sekundärkaries oder für bakterielle Besiedelungen im Randbereich wider. Bei klinischen Entscheidungen sollte der erwartete Nutzen eines etwaigen Kavitätenliners und des eingesetzten Restaurationsmaterials gegenüber möglichen restaurativen Nachteilen abgewogen werden.

7 Literaturverzeichnis

- 1 Schwendicke F, Kniess JLM, Paris S, Blunck U. Margin Integrity and Secondary Caries of Lined or Non-lined Composite and Glass Hybrid Restorations After Selective Excavation In Vitro. *Oper Dent.* 2017;42(2):155-164.
- 2 Keyes PH. The infectious and transmissible nature of experimental dental caries. Findings and implications. *Arch Oral Biol.* 1960;1:304-20.
- 3 Bighton D. The complex oral microflora of high-risk individuals and groups in the caries process. *Community Dent Oral Epidemiol* 2005;33:248-255.
- 4 Paris S, Meyer-Lueckel H. Paradigmenwechsel. In: Meyer-Lückel H, Paris S, Ekstrand KR, Alkilzy M, Effenberger S, Lackner C, editors. *Karies Wissenschaft und klinische Praxis Stuttgart* [u.a.]: Thieme; 2012;71-5.
- 5 Schwendicke F. Exkavation-Wie viel Kariesfreiheit muss sein? *Dtsch Zahnärztl Z.* 2015;70(2):89-97.
- 6 Schwendicke F, Paris S, Tu YK. Effects of using different criteria for caries removal: a systematic review and network meta-analysis. *J Dent.* 2015;43(1):1-15.
- 7 Schwendicke F, Stangvaltaite L, Holmgren C, Maltz M, Finet M, Elhennawy K, Eriksen I, Kuzmishyn TC, Kerosuo E, Doméjean S. Dentists' attitudes and behaviour regarding deep carious lesion management: a multi-national survey. *Clin Oral Investig.* 2017;21(1):191-198.
- 8 Schwendicke F. *Selektive Kariesentfernung: Evidenz und Praxis - Chancen und Hürden [Habilitationsschrift]*. Berlin: Medizinische Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin; 2015.
- 9 Bjørndal L, Larsen T. Changes in the cultivable flora in deep carious lesions following a stepwise excavation procedure. *Caries Res.* 2000;34(6):502-8.
- 10 Corralo DJ, Maltz M. Clinical and Ultrastructural Effects of Different Liners/Restorative Materials on Deep Carious Dentin: A Randomized Clinical Trial. *Caries Research* 2013;47(3):243-50.
- 11 Fontana M. Limited evidence for main reason for failure of partially excavated and restored teeth. *Evid Based Dent.* 2014;15(1):16-7.
- 12 Schwendicke F, Stolpe M, Meyer-Lueckel H, Paris S, Dörfer CE. Cost-effectiveness of one- and two-step incomplete and complete excavations. *J Dent Res.* 2013;92(10):880-7.
- 13 Maltz M, Garcia R, Jardim JJ, de Paula LM, Yamaguti PM, Moura MS, Garcia F, Nascimento C, Oliveira A, Mestrinho HD. Randomized trial of partial vs. stepwise caries removal: 3-year follow-up. *J Dent Res.* 2012;91:1026-31.
- 14 Balooch M, Wu-Magidi IC, Balazs A, Lundkvist AS, Marshall SJ, Marshall GW, Siekhaus WJ, Kinney JH: Viscoelastic properties of demineralized human dentin measured in water with atomic force microscope (AFM)-based indentation. *Journal of Biomedical Materials research* 1998;40(4):539-544.
- 15 Van Meerbeek B, Yoshida Y. *Karies. Wissenschaft und klinische Praxis*. In: Meyer-Lückel H, Paris S, Ekstrand KR, Alkilzy M, Effenberger S, Lackner C, editors. *ZMK Praxis. Stuttgart* [u.a.]: Thieme, 2012:244.
- 16 Yoshiyama M, Tay FR, Doi J, Nishitani Y, Yamada T, Ito K, et al. Bonding of Self-etch and Total-etch Adhesives to Carious Dentin. *Journal of Dental Research* 2002;81(8):556-60.
- 17 Dijkman GE, de Vries J, Arends J. Secondary caries in dentine around composites: a wavelength-independent microradiographical study. *Caries Res* 1994;28(2):87-93.
- 18 Diercke K, Lussi A, Kersten T, Seemann R. Isolated development of inner (wall) caries like lesions in a bacterial-based in vitro model. *Clin Oral Investig* 2009;13(4):439-44.
- 19 Hevinga MA, Opdam NJ, Frencken JE, Truin GJ, Huysmans MC. Does incomplete caries removal reduce strength of restored teeth? *J Dent Res.* 2010;89:1270-5.
- 20 Schwendicke F, Kern M, Dörfer C, Kleemann-Lüpkes J, Paris S, Blunck U. Influence of using different bonding systems and composites on the margin integrity and the mechanical properties of selectively excavated teeth in vitro. *J Dent.* 2015;43(3):327-34.
- 21 Dammaschke T. The history of direct pulp capping. *J Hist Dent.* 2008;56(1):9-23.

-
- 22 Cox CF, Hafez AA, Akimoto N, Otsuki M, Mills JC. Biological basis for clinical success: pulp protection and the tooth-restoration interface. *Pract Periodontics Aesthet Dent* 1999;11(7):819-26.
- 23 Oen KT, Thompson VP, Vena D, Caufield PW, Curro F, Dasanayake A, et al. Attitudes and expectations of treating deep caries: a PEARL Network survey. *Gen Dent* 2007;55(3):197-203.
- 24 Téclès O, Laurent P, Aubut V, About I. Human tooth culture: a study model for reparative dentinogenesis and direct pulp capping materials biocompatibility. *J Biomed Mater Res B Appl Biomater*. 2008;85(1):180-7.
- 25 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.
- 26 Conrado CA. Remineralization of carious dentin. I: In vitro microradiographic study in human teeth capped with calcium hydroxide. *Braz Dent J* 2004;15:59-62.
- 27 Conrado CA. Remineralization of carious dentin. II: In vivo microradiographic and chemical studies in human permanent teeth capped with calcium hydroxide. *Braz Dent J* 2004;15(3):186-9.
- 28 Eidelman E, Finn SB, Koulourides T. Remineralization of carious dentin treated with calcium hydroxide. *J Dent Child* 1965;32(4):218-25.
- 29 Imparato JCP, Moreira KMS, Olegário IC, da Silva SREP, Raggio DP. Partial caries removal increases the survival of permanent tooth: a 14-year case report. *Eur Arch Paediatr Dent*. 2017 Oct 30. [Epub ahead of print]
- 30 Lu Y, Liu T, Li H, Pi G. Histological evaluation of direct pulp capping with a self-etching adhesive and calcium hydroxide on human pulp tissue. *Int Endod J*. 2008;41(8):643-50.
- 31 Fulzele P, Baliga S, Thosar N, Pradhan D. Evaluation of calcium ion, hydroxyl ion release and pH levels in various calcium hydroxide based intracanal medicaments: An in vitro study. *Contemp Clin Dent*. 2011;2(4):291-5.
- 32 Poggio C, Arciola CR, Beltrami R, Monaco A, Dagna A, Lombardini M, Visai L. Cytocompatibility and antibacterial properties of capping materials. *Sci World J*. 2014;2014:181945.
- 33 Staehle HJ, Pioch T, Hoppe W. The alkalizing properties of calcium hydroxide compounds. *Endod Dent Traumatol*. 1989;5(3):147-52.
- 34 Farhad A, Mohammadi Z. Calcium hydroxide: a review. *Int Dent J* 2005;55(5):293-301.
- 35 Ölmez A, Öztaş N, Başak F, Sabuncuoğlu B. A histopathologic study of direct pulp-capping with adhesive resins. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 1998;86(1):98-103.
- 36 Stanley HR, Pameijer CH. Pulp capping with a new visible-light-curing calcium hydroxide composition (Prisma VLC Dycal). *Oper Dent* 1985;10(4):156-63.
- 37 Pereira JC1, Segala AD, Costa CA. Human pulpal response to direct pulp capping with an adhesive system. *Am J Dent*. 2000;13(3):139-47.
- 38 Cox CF, Sübay RK, Ostro E, Suzuki S, Suzuki SH. Tunnel defects in dentin bridges: their formation following direct pulp capping. *Oper Dent* 1996;21:4-11.
- 39 Li Z, Cao L, Fan M, Xu Q. Direct Pulp Capping with Calcium Hydroxide or Mineral Trioxide Aggregate: A Meta-analysis. *J Endod*. 2015;41(9):1412-7.
- 40 Zhu C, Ju B, Ni R. Clinical outcome of direct pulp capping with MTA or calcium hydroxide: a systematic review and meta-analysis. *Int J Clin Exp Med*. 2015;8(10):17055-60.
- 41 Schwendicke F, Brouwer F, Stolpe M. Calcium Hydroxide versus Mineral Trioxide Aggregate for Direct Pulp Capping: A Cost-effectiveness Analysis. *J Endod*. 2015;41(12):1969-74.
- 42 Vural UK, Kiremitci A, Gokalp S. Randomized Clinical Trial to Evaluate MTA Indirect Pulp Capping in Deep Caries Lesions After 24-Months. *Oper Dent*. 2017 Jun 5. doi: 10.2341/16-110-C. [Epub ahead of print]
- 43 Dammaschke T, Stratmann U, Wolff P, Sagheri D, Schäfer E. Direct pulp capping with mineral trioxide aggregate: an immunohistologic comparison with calcium hydroxide in rodents. *J Endod*. 2010;36(5):814-9.
- 44 Najeeb S, Khurshid Z, Sohail Zafar M, Zohaib S, Siddiqui F. Efficacy of Enamel Matrix Derivative in Vital Pulp Therapy: A Review of Literature. *Iran Endod J*. 2017;12(3):269-275.

-
- 45 Rowe A. H. Reaction of the rat molar pulp to various materials. *Br Dent J* 1967;122:291- 300.
- 46 Woehrlen AE Jr. Evaluation of techniques and material used in pulpal therapy based on a review of the literature: part II. *J Am Dent Assoc.* 1978;96(1):107-12.
- 47 Accorinte ML, Loguercio AD, Reis A, Costa CA. Response of human pulps capped with different self-etch adhesive systems. *Clin Oral Investig.* 2008;12(2):119-27.
- 48 Staehle H J. Wissenschaftliche Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde. Cp- Behandlung/ Versorgung pulpanahen Dentins. 1998.
- 49 Kühnisch J, Heinrich-Weltzien, R, Schäfer, E. Wissenschaftliche Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Kinderzahnheilkunde (DGK) und der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ). *Endodontie im Milchgebiss.* 2011.
- 50 Schwendicke F, Frencken JE, Bjørndal L, Maltz M, Manton DJ, Ricketts D, Van Landuyt K, Banerjee A, Campus G, Doméjean S, Fontana M, Leal S, Lo E, Machiulskiene V, Schulte A, Splieth C, Zandona AF, Innes NP. Managing Carious Lesions: Consensus Recommendations on Carious Tissue Removal. *Adv Dent Res.* 2016;28(2):58-67.
- 51 Wissenschaftliche Mitteilung der Deutschen Gesellschaft für Zahnerhaltung (DGZ). Aktuelle Empfehlungen zur Kariesexkavation. *Dtsch Zahnärztl Z.* 2017;72(6):484-494.
- 52 Knight GM, McIntyre JM, Craig GG, Mulyani. Ion uptake into demineralized dentine from glass ionomer cement following pretreatment with silver fluoride and potassium iodide. *Aust Dent J* 2006;51(3):237-41.
- 53 Hatibović-Kofman S, Suljak JP, Koch G: Remineralization of natural carious lesions with a glass ionomer cement. *Swed Dent J* 1997;21:11-17.
- 54 Creanor SL, Awawdeh LA, Saunders WP, Foye RH, Gilmour WH. The effect of a resin-modified glass ionomer restorative material on artificially demineralised dentine caries in vitro. *J Dent* 1998;26(5-6):527-31.
- 55 Yang B, Flaim G, Dickens SH. Remineralization of human natural caries and artificial caries-like lesions with an experimental whisker-reinforced ART composite. *Acta Biomater* 2011;7(5):2303-9.
- 56 Mukai M, Ikeda M, Yanagihara T, Hara G, Kato K, Nakagaki H, et al. Fluoride uptake in human dentine from glass-ionomer cement in vivo. *Arch Oral Biol* 1993;38(12):1093-8.
- 57 Torii Y, Itota T, Okamoto M, Nakabo S, Nagamine M, Inoue K. Inhibition of artificial secondary caries in root by fluoride-releasing restorative materials. *Oper Dent.* 2001;26(1):36-43.
- 58 Smales RJ, Ngo HC, Yip KH, Yu C. Clinical effects of glass ionomer restorations on residual carious dentin in primary molars. *Am J Dent* 2005;18(3):188-93.
- 59 Ilie N, Hickel R, Valceanu AS, Huth KC. Fracture toughness of dental restorative materials. *Clin Oral Investig.* 2012;16(2):489-98.
- 60 Forss, H., Seppa, L.: Prevention of enamel demineralization adjacent to glass ionomer filling materials. *Scand J Dent Res* 98;173-178.
- 61 Glasspoole EA, Erickson RL, Davidson CL. Demineralization of enamel in relation to the fluoride release of materials. *Am J Dent.* 2001;14(1):8-12.
- 62 Triana R, Prado C, Garro J, García-Godoy F. Dentin bond strength of fluoride-releasing materials. *Am J Dent.* 1994;7(5):252-4.
- 63 Forsten L. Fluoride release and uptake by glass-ionomers and related materials and its clinical effect. *Biomaterials.* 1998;(6):503-8.
- 64 Friedl KH, Schmalz G, Hiller KA, Shams M. Resin-modified glass ionomer cements: fluoride release and influence on *Streptococcus mutans* growth. *Eur J Oral Sci.* 1997;105(1):81-5.
- 65 Krämer N, Schmidt M, Lückner S, Domann E, Frankenberger R. Glass ionomer cement inhibits secondary caries in an in vitro biofilm model. *Clin Oral Investig.* 2017 Jul 24. doi: 10.1007/s00784-017-2184-1. [Epub ahead of print] Wie zitiert man hier korrekt?
- 66 Diem VT, Tyas MJ, Ngo HC, Phuong LH, Khanh ND. The effect of a nano-filled resin coating on the 3-year clinical performance of a conventional high-viscosity glass-ionomer cement. *Clin Oral Investig.* 2014;18:753-9.

-
- 67 GC EQUIA Forte – neues Restaurationssystem mit Glas-Hybrid-Technologie. Tokio, Japan.: GC, 2015. (Besucht am 21. September 2017, auf www.gceurope.com/news/press/201503_ids/de_equia_forte.docx)
- 68 Buskes JA, Christoffersen J, Arends J. Lesion formation and lesion remineralization in enamel under constant composition conditions. A new technique with applications. *Caries Res.* 1985;19(6):490-6.
- 69 Kwon Y, Ferracane J, Lee IB. Effect of layering methods, composite type, and flowable liner on the polymerization shrinkage stress of light cured composites. *Dent Mater.* 2012;28(7):801-9.
- 70 Henisch G. Ein computergestütztes System zur Erfassung und Verwaltung von Messdaten im Rahmen der quantitativen Randanalyse am Rasterelektronenmikroskop [Dissertation]. Berlin: Medizinische Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin; 1989.
- 71 Roulet JF, Reich T, Blunck U, Noack M. Quantitative margin analysis in the scanning electron microscope. *Scanning microscopy.* 1989;3(1):147-59.
- 72 Schwendicke F, Kern M, Blunck U, Dörfer C, Drenck J, Paris S. Marginal integrity and secondary caries of selectively excavated teeth in vitro. *J Dent.* 2014;42(10):1261-8.
- 73 Schwendicke F, Dörfer CE, Paris S. Incomplete caries removal: a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res.* 2013;92(4):306-14.
- 74 Schwendicke F, Kern M, Meyer-Lueckel H, Boels A, Doerfer C, Paris S. Fracture resistance and cuspal deflection of incompletely excavated teeth. *J Dentistry* 2013;42(2):107-13.
- 75 Haller B, Hofmann N, Klaiber B, Bloching U. Effect of storage media on microleakage of five dentin bonding agents. *Dent Mater.* 1993;9(3):191-7.
- 76 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.
- 77 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;92:551-6.
- 78 Schwendicke F, Eggers K, Meyer-Lueckel H, Doerfer C, Kovalev A, Gorb S, Paris S. In vitro Induction of residual caries lesions in dentin: comparative mineral loss and nano-hardness analysis. *Caries Res.* 2015;49(3):259-65.
- 79 Asmussen E, Peutzfeldt A. Short- and long-term bonding efficacy of a self-etching, one-step adhesive. *J Adhes Dent.* 2003;5:41-5.
- 80 Frankenberger R, Sindel J, Krämer N, Oberschachtsiek H, Petschelt A. Die Langzeitstabilität des Komposit-Dentinverbunds nach Total-Etching. *Dtsch Zahnärztl Z.* 1998;53:697-700.
- 81 Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent.* 1999;27:89-99.
- 82 Bullard RH, Leinfelder KF, Russell CM. Effect of coefficient of thermal expansion on microleakage. *J Am Dent Assoc.* 1988;116:871-4.
- 83 Sakaguchi RL, Douglas WH, DeLong R, Pintado MR. The wear of a posterior composite in an artificial mouth: a clinical correlation. *Dent Mater.* 1986;2:235-40.
- 84 Qvist V. The effect of mastication on marginal adaptation of composite restorations in vivo. *J Dent Res* 1983;62(8):904-6.
- 85 Ferracane JL. Models of Caries Formation around Dental Composite Restorations. *J Dent Res.* 2017;96(4):364-371.
- 86 Heintze SD. Clinical relevance of tests on bond strength, microleakage and marginal adaptation. *Dental Materials* 2013;29(1):59-84.
- 87 Khvostenko D, Salehi S, Naleway SE, Hilton TJ, Ferracane JL, Mitchell JC, Kruzica JJ. Cyclic mechanical loading promotes bacterial penetration along composite restoration marginal gaps. *Dent Mater.* 2015;31(6):702-710.
- 88 Kielbassa AM, Schendera A, Schulte-Mönting J. Microradiographic and microscopic studies on in situ induced initial caries in irradiated and nonirradiated dental enamel. *Caries Res.* 2000;34(1):41-7.
- 89 Lennon AM, Attin T, Buchalla W. Quantity of remaining bacteria and cavity size after excavation with FACE, caries detector dye and conventional excavation in vitro. *Oper Dent.* 2007;32(3):236-41.

-
- 90 Lohbauer U, Kramer N, Siedschlag G, Schubert EW, Lauerer B, Muller FA, et al. Strength and wear resistance of a dental glass-ionomer cement with a novel nanofilled resin coating. *Am J Dent* 2011;24(2):124-8.
- 91 Forss H, Seppä L, Alakuijala P: Plaque accumulation on glass ionomer filling materials. *Proc Finn Dent Soc* 87,343-350.
- 92 Kidd EAM, Joyston-Bechal S, Beighton D. Marginal Ditching and Staining as a Predictor of Secondary Caries Around Amalgam Restorations: A Clinical and Microbiological Study. *Journal of Dental Research* 1995;74(5):1206-11.
- 93 Kidd EAM. Caries Diagnosis Within Restored Teeth. *Advances in Dental Research* 1990;4(1):10-13.
- 94 Schwendicke F, Diederich C, Paris S. Restoration gaps needed to exceed a threshold size to impede sealed lesion arrest in vitro. *J Dent*. 2016;48:77-80.
- 95 Totiam P, González-Cabezas C, Fontana MR, Zero DT. A new in vitro model to study the relationship of gap size and secondary caries. *Caries Res*. 2007;41(6):467-73.
- 96 Schwendicke F, Goestemeyer G, Gluud C. Cavity lining after excavating caries lesions: meta-analysis and trial sequential analysis of randomized clinical trials. *J Dent* 2015;43(11):1291-1297.
- 97 Akhlaghi N, Khademi A. Outcomes of vital pulp therapy in permanent teeth with different medicaments based on review of the literature. *Dent Res J (Isfahan)*. 2015;12(5):406-17.
- 98 Schwendicke F, Tu YK, Hsu LY, Gostemeyer G. Antibacterial effects of cavity lining: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *J Dent* 2015;43(11):1298-307.
- 99 Opal S, Garg S, Sharma D, Dhindsa A, Jatana I. In Vivo Effect of Calcium Hydroxide and Resin-modified Glass Ionomer Cement on Carious Dentin in Young Permanent Molars: An Ultrastructural and Macroscopic Study. *Pediatr Dent*. 2017;39(1):1-8.
- 100 Schwendicke F, Meyer-Lueckel H, Dörfer C, Paris S. Failure of incompletely excavated teeth--a systematic review. *J Dent*. 2013;41(7):569-80.
- 101 Maltz M, Alves LS, Jardim JJ, Moura Mdos S, de Oliveira EF. Incomplete caries removal in deep lesions: a 10-year prospective study. *Am J Dent*. 2011;24(4):211-4.

8 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Jana Lina Marie Knieß, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Randintegrität und Sekundärkaries von Kompositrestaurationen mit und ohne Kalziumhydroxidliner sowie Glashybridrestaurationen nach selektiver Exkavation *in vitro*“ 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 Betreuer, angegeben sind. Sämtliche Publikationen, die aus dieser Dissertation hervorgegangen sind und bei denen ich Autor bin, entsprechen den URM (s.o) und werden von mir verantwortet.

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

Ort, Datum

Unterschrift

9 Anteilserklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Jana Lina Marie Knieß hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1:

F Schwendicke, JLM Kniess, S Paris, and U Blunck. Margin Integrity and Secondary Caries of Lined or Non-lined Composite and Glass Hybrid Restorations After Selective Excavation *In Vitro*, *Operative Dentistry*, 2017;42(2):155-164.

Beitrag im Einzelnen:

- Mitentwicklung und Durchführung des Versuchs
- Auswertung und Interpretation der Ergebnisse
- Mitarbeit am Manuskript

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

Unterschrift der Doktorandin

10 Lebenslauf

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

11 Publikationsliste

Publikation 1: F Schwendicke, JLM Kniess, S Paris, U Blunck. Margin Integrity and Secondary Caries of Lined or Non-lined Composite and Glass Hybrid Restorations After Selective Excavation *In Vitro*, Operative Dentistry, 2017;42(2):155-164.

12 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt PD Dr. Falk Schwendicke und Prof. Dr. Sebastian Paris aus der Abteilung für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin des CharitéCentrums 3 für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der Medizinischen Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin für die Überlassung eines interessanten Promotionsthemas und Herrn Dr. Uwe Blunck für die engagierte und fachkundige Betreuung während der praktischen Umsetzung der Studie. Ich möchte PD Dr. Falk Schwendicke für die geduldige, kompetente und freundliche Begleitung und Unterstützung bei der Durchführung und Erstellung der Arbeit danken.

Weiterhin danke ich Rainer Toll und Carola Schweynoch für die technische Begleitung des Projekts.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern und meinen Freund Matthias, die mir sowohl während des Studiums als auch der experimentellen Arbeit sowie der Anfertigung der Doktorarbeit stets unterstützend, liebevoll und verständnisvoll zur Seite standen. Danke!