

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

## DISSERTATION

Untersuchung der Höckerdehnung und Frakturbeständigkeit  
selektiv exkavierter Prämolaren

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät  
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von  
Annika Boels  
aus Eckernförde

Datum der Promotion: 09.12.2016



# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Abstract .....</b>	<b>1</b>
1.1 Abstract (englisch) .....	1
1.2 Abstract (deutsch) .....	3
<b>2 Einleitung .....</b>	<b>5</b>
2.1 Die Ätiologie und Pathogenese der Karies .....	5
2.2 Die Therapie der Karies .....	8
2.3 Selektive Kariesexkavation .....	12
2.4 Hypothesen und Ziele .....	13
<b>3 Material und Methoden.....</b>	<b>15</b>
3.1 Versuchsaufbau .....	15
3.2 Vorbereitung der Zähne .....	17
3.3 Kavitätenpräparation .....	17
3.4 Erzeugung künstlicher Läsionen .....	19
3.5 Restauration der Zähne .....	20
3.6 Wechselbelastung im Kausimulator und Thermocycling .....	21
3.7 Röntgenologische Darstellung der Läsionen .....	23
3.8 Höckerdehnung bei Belastung .....	24
3.9 Frakturbeständigkeit und Frakturmodus.....	25
3.10 Transversale Mikroradiographie .....	27
3.10.1 Herstellung der Proben	27
3.10.2 Anfertigung der transversalen Mikrographien	28
3.10.3 Auswertung der Mikroradiographie	29
<b>4 Ergebnisse .....</b>	<b>30</b>
4.1 Tiefe der belassenen entmineralisierten Läsion.....	30

<b>4.2</b>	<b>Frakturbeständigkeit .....</b>	<b>30</b>
<b>4.3</b>	<b>Frakturmodus .....</b>	<b>31</b>
<b>4.4</b>	<b>Höckerdehnung.....</b>	<b>33</b>
<b>5</b>	<b>Diskussion.....</b>	<b>35</b>
<b>5.1</b>	<b>Diskussion von Material und Methoden .....</b>	<b>35</b>
<b>5.2</b>	<b>Diskussion der Ergebnisse .....</b>	<b>39</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Frakturbeständigkeit</b>	<b>39</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Höckerdehnung</b>	<b>40</b>
<b>5.3</b>	<b>Schlussfolgerungen .....</b>	<b>41</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>43</b>
<b>7</b>	<b>Eidesstattliche Versicherung .....</b>	<b>47</b>
<b>8</b>	<b>Lebenslauf.....</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Danksagung .....</b>	<b>50</b>

# 1 Abstract

## 1.1 Abstract (englisch)

Schwendicke, F., Kern, M., Meyer-Lueckel H., Boels, A., Doerfer, C., Paris, S., *Fracture resistance and cuspal deflection of incompletely excavated teeth*. J Dent, 2014. 42(2): p. 107-13.

*Objectives:* Incomplete excavation reduces the risk of pulpal complications, but doubts remain regarding the mechanical properties of incompletely excavated teeth. Remaining carious dentine is suspected to not sufficiently support the restoration and to reduce bond strengths between the tooth and the restoration, with effects possibly varying depending on the depth of the remaining caries lesion. This study investigated fracture resistance (FR) and cuspal deflection (CD) of premolars after leaving or removing demineralized dentine *in vitro*.

*Methods:* In 48 premolars, shallow and deep artificial lesions (depths [mean  $\pm$  SD] of  $64 \pm 18 \mu\text{m}$  and  $771 \pm 176 \mu\text{m}$ ) were created on pulpo-axial walls of standardised mesial- distal-occlusal cavities. Demineralized dentine was either removed or left before adhesively restoring the tooth (n = 12/group). Restored teeth were submitted to thermo-mechanical cycling. CD was subsequently measured at loads of 200 N and 400 N, and teeth submitted to occlusal-perpendicular loading until fracturing occurred.

*Results:* FR was not significantly different between teeth with or without remaining demineralized dentine regardless of the lesion depth ( $p > 0.30$ , t-test). Irrespective of the removal technique, teeth with deep lesions showed significantly decreased FR ( $p \leq 0.001$ ). In contrast, CD was significantly increased in teeth with remaining demineralized dentine compared with completely excavated teeth ( $p \leq 0.05$ ; Mann–Whitney test).

*Conclusions:* Remaining demineralized dentine did not significantly decrease the fracture resistance of premolars *in vitro*. Effects of increased cuspal deflection on restoration margins should be assessed. This study showed no indication that incomplete excavation increases the risk of non-pulpal complications.

*Clinical significance:* Incomplete caries removal seems suitable to treat especially deep lesions. Leaving demineralized dentine does not seem to affect the fracture resistance of incompletely excavated teeth regardless of the lesion depth.” (1)

## 1.2 Abstract (deutsch)

Einleitung: Die non-selektive (vollständige) Exkavation birgt bei ausgedehnten kariösen Läsionen hohe Risiken für die Vitalität der Pulpa. Hingegen reduziert die selektive (unvollständige) Kariesexkavation das Risiko einer iatrogenen Eröffnung der Pulpa. Zweifel bestehen jedoch hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften von selektiv exkavierten Zähnen, da demineralisiertes Dentin unterhalb der Restauration verbleibt. Dieses weichere Dentin könnte zum einen die Restauration nur unzureichend unterstützen, wodurch die Frakturbeständigkeit der Zähne reduziert würde; zum anderen ist die Haftkraft konventioneller Adhäsivsysteme an demineralisiertem Dentin reduziert, was die Integrität der Restauration kompromittieren könnte. Dabei ist auch unklar, ob Frakturbeständigkeit und Restaurationsstabilität von der Tiefe der belassenen kariösen Läsion abhängen. Ziel dieser Studie war daher die Untersuchung der Frakturbeständigkeit und Höckerdehnung von selektiv exkavierten Prämolaren.

Methodik: Achtundvierzig Prämolaren wurden mit einer standardisierten mesial-distal-okklusalen Präparation versehen und anschließend flache und tiefe demineralisierte kariöse Läsionen an den pulpalen Wänden induziert. Das demineralisierte Dentin wurde anschließend belassen oder exkaviert (n = 12/Gruppe) und die Zähne mit einer adhäsiven Kompositrestauration restauriert. Die restaurierten Zähne wurden im Kausimulator und im Thermowechselbad belastet. Um die Höckerdehnung bei Belastung zu bestimmen, wurden die Zähne zuerst mit einer Kraft von 200 N und dann mit 400 N belastet. Im Anschluss erfolgte die kontinuierliche Steigerung der Kraft bis zur Fraktur. Als Letztes wurde die Tiefe der belassenen kariösen Läsionen mittels transversaler Mikroradiografie bestimmt.

Ergebnisse: Unabhängig von der Läsionstiefe zeigten Zähne mit oder ohne belassenem demineralisiertem Dentin unterhalb der Restauration keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der Frakturbeständigkeit. Jedoch zeigten die Zähne mit tieferen Läsionen eine signifikant niedrigere Frakturbeständigkeit als jene mit flachen Läsionen, unabhängig davon ob das demineralisierte Dentin unterhalb der Restauration entfernt wurde oder nicht. Im Gegensatz dazu war die Höckerdehnung signifikant niedriger bei den Zähnen, die vollständig exkaviert wurden, als bei Zähnen mit belassenem demineralisiertem Dentin. Auch in Bezug auf den Frakturmodus gab es keinen

signifikanten Unterschied zwischen den Versuchsgruppen mit tiefen und flachen Läsionen; jedoch zeigten Zähne mit flachen Läsionen mehr reparable Frakturen als Zähne mit tiefen Läsionen.

Schlussfolgerung: Unter einer Restauration belassenes demineralisiertes Dentin verringerte nicht die Frakturresistenz von Zähnen *in vitro*. Die Tiefe der zu behandelnden Läsion scheint jedoch einen Einfluss auf die Frakturresistenz von selektiv und vollständig exkavierten Zähnen zu haben. Unklar bleibt die Auswirkung der erhöhten Höckerdehnung von selektiv exkavierten Zähnen, z.B. auf die Randdichtigkeit der Restauration.

## 2 Einleitung

### 2.1 Die Ätiologie und Pathogenese der Karies

Die World Health Association (WHO) definiert Karies als einen „multikausalen irreversiblen pathologischen Vorgang exogenen Ursprungs, der post eruptiv mit Erweichung der Zahnhartgewebe und einer nachfolgenden Kavitätenbildung einhergeht“ (2). Zur Entstehung der Karies hat es in der Vergangenheit viele Theorien gegeben. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts ging man im Rahmen der chemoparasitären Theorie davon aus, dass kariogene Mikroorganismen, die sich im dentalen Biofilm befinden, bei einem Überangebot an kariogenem Substrat (niedermolekulare Kohlenhydrate) organische Säuren produzieren, die die Zahnhartsubstanz (Wirt) demineralisieren (3). Im Jahr 1971 wurde dieses Modell lediglich um den Faktor Zeit ergänzt, denn eine Zerstörung der Zahnhartsubstanz tritt erst nach langanhaltenden und häufigen Säureangriffen auf (Abb. 1) (4).



Abb. 1 - Traditionelles Schema nach Miller (1898) modifiziert nach König (1971) (4).

Karies entsteht durch die Wechselwirkung der 4 Faktoren: Wirt, Substrat, Mikroorganismen und Zeit.

Neben der chemoparasitären Theorie gab es noch weitere Ansichten über die Entstehung von Karies, die in der spezifischen und unspezifischen Plaquehypothese

dargestellt wurden. Die unspezifische Plaquehypothese basierte auf der Ansicht, dass Karies durch ein Zusammenwirken aller im Biofilm vorkommenden Mikroorganismen entsteht. Man ging davon aus, dass eine bestimmte Menge an kariogenen Mikroorganismen im Biofilm vorliegen muss, damit eine Karies entstehen kann. Die spezifische Plaquehypothese hingegen sah Karies als eine „übertragbare Infektionskrankheit“ (5), die durch eine Infektion des Wirtes mit spezifischen pathogenen Keimen (z.B. *Streptococcus mutans*, *Streptococcus sobrinus* und Laktobazillen) entsteht. Im Gegensatz zur unspezifischen Plaquehypothese steht hier die Qualität und nicht die Quantität der Plaque im Vordergrund. Man ging daher davon aus, dass die Entstehung der Karies verhindert werden konnte, wenn die krankheitsverursachenden Keime vollständig entfernt wurden. Jedoch konnte nachgewiesen werden, dass Karies auch dann entstehen kann, wenn *S. mutans* (als angenommener „Leitkeim“ der Kariesentstehung) nicht nachweisbar ist. Außerdem wurde festgestellt, dass auch bei Vorhandensein von *S. mutans* eine niedrige Kariesaktivität vorherrschen kann (6, 7). Durch diese Erkenntnisse verlor vor allem die spezifische Plaquehypothese an Bedeutung und neue Theorien traten hervor.

Heutzutage wird überwiegend die ökologische Plaquehypothese favorisiert (Abb. 2), die die Ursache der Kariesentstehung in einer Verschiebung des ökologischen Gleichgewichts in der Mundhöhle sieht (8).

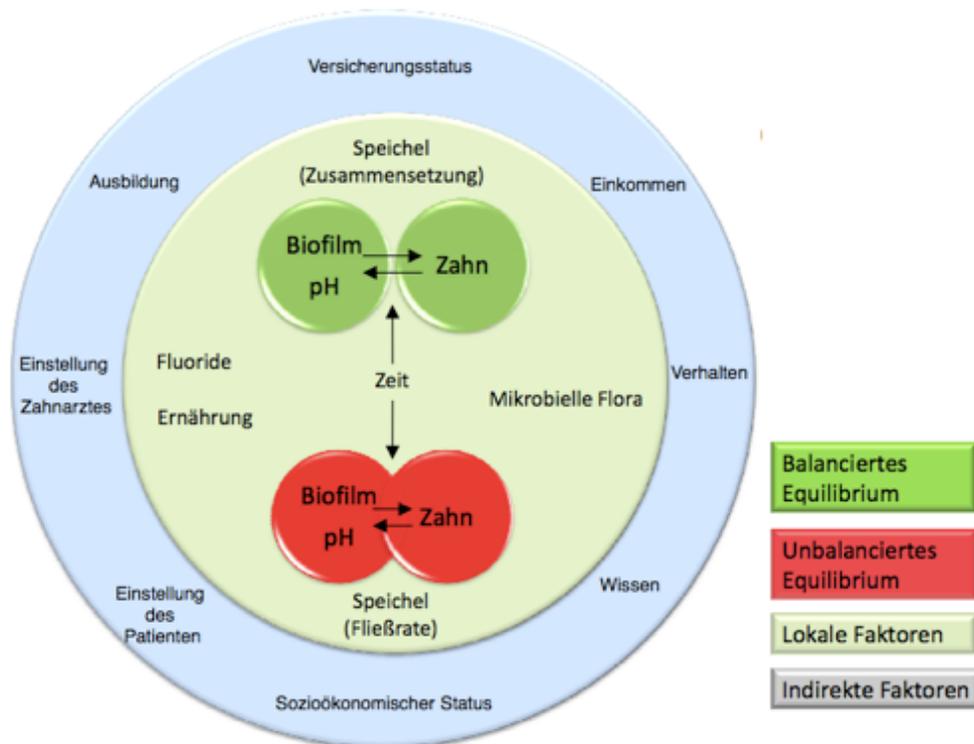


Abb. 2 - Determinanten des Kariesprozesses.

Dargestellt sind Faktoren, die auf direkte oder indirekte Weise einen Einfluss auf die Entstehung der Karies haben. Zu den direkten lokalen Faktoren zählen unter anderem die Ernährung, die Zusammensetzung und Menge des Speichels, Fluoride, die Zeit und die mikrobielle Flora. Neben den direkten Faktoren gibt es noch die indirekten Faktoren (hellblau), die auf die direkten Faktoren einen Einfluss ausüben können, wie z.B. die Einstellung des Patienten oder des Zahnarztes, sowie die Ausbildung, der sozioökonomische Status und das Einkommen (9).

Karies entsteht durch die Veränderungen der ökologischen Verhältnisse (z.B. mangelnde Mundhygiene, Erhöhung der Zuckernahrung) in der Mundhöhle, durch die es zur Bildung einer ausgereiften Plaque auf der Zahnoberfläche kommt. Natürlicherweise kommen potenziell kariogene Mikroorganismen in einer sehr geringen Konzentration in der Plaque vor. Liegt der pH-Wert im Normbereich (6,5 - 6,9) und wird wenig Zucker mit der Nahrung aufgenommen, spielen diese keine bedeutende Rolle für die Kariesentstehung. Erhöht sich die Aufnahme von fermentierbaren Kohlenhydraten (z.B. Saccharose), werden diese durch die Plaquebakterien metabolisiert und es kommt zu einer vermehrten Bildung von Säuren, die zu einem Abfall des pH-Wertes der Plaque führen. Dadurch wird das Wachstum von azidurischen (wandeln Zucker schnell in

Säure um) und azidogenen (können in niedrigen pH-Wert-Bedingungen überleben) Bakterien der Plaque begünstigt und die physiologische Plaqueflora kompetitiv verdrängt (8). Dies fördert wiederum die Azidogenität der Plaque, also das Vermögen, den pH-Wert im Fall einer Kohlenhydratzufuhr rasch und länger andauernd zu senken. Durch diese pH-Wert-Verschiebung entstehen optimale Bedingungen für die Kariesentstehung.

Die Bakterien in der Plaque verstoffwechseln die niedermolekularen Kohlenhydrate der Nahrung und scheiden dabei organische Säuren (z.B. Milchsäure, Essigsäure) aus. Dies führt dann letztendlich zu den klinischen Symptomen der Karies. Werden keine fermentierbaren Kohlenhydrate mehr mit der Nahrung aufgenommen, steigt der pH-Wert wieder an und die potenziell kariogenen Bakterien gehen wieder auf eine geringere Konzentration zurück. So wird wieder ein Gleichgewicht aufgebaut. Die ökologische Plaquehypothese schließt aber auch Faktoren ein, die der Kariesentstehung entgegen wirken. Durch die Mundhygiene des Patienten kann die Anzahl der in der Plaque vorhandenen Mikroorganismen verringert, die Plaque lokal entfernt und somit eine Säurebildung verhindert werden. Außerdem kann durch den Speichel sowie durch Fluoride und Kalzium, die durch Zahnpasten und Nahrung aufgenommen werden, bereits demineralisierte Zahnhartsubstanz wieder remineralisiert werden (10). Karies entsteht also durch die Wechselwirkung von vielen Faktoren, die zum Teil die Kariesentstehung fördern, aber auch den Zahn vor der Kariesentstehung schützen. Die Demineralisation der Zahnhartsubstanz schreitet voran, wenn die pathogenen Faktoren im Übergewicht sind (11). Wenn jedoch die schützenden Faktoren überwiegen, kann es nur in einem geringen Maße zur Demineralisation kommen und eine bereits demineralisierte Zahnhartsubstanz kann wieder remineralisiert werden.

## **2.2 Die Therapie der Karies**

Ebenso wie es einen Wandel in der Erklärung der Entstehung der Karies gab, hat sich auch die Behandlung der Karies gewandelt. Traditionell sah man es als Voraussetzung für den Erfolg einer Behandlung an, dass kariös veränderte Zahnhartsubstanz vollständig entfernt wurde. Bezugnehmend auf die spezifische Plaquehypothese schien dies dann die richtige Möglichkeit zu sein, kariöse Läsionen zu therapieren. Dazu wurde

eine Zugangskavität präpariert, bei der zuerst die Zahnoberfläche präpariert und im Anschluss die kariöse Läsion mit einem Rosenbohrer entfernt wurde. Wurden Restaurationen mit Amalgam gelegt, musste zusätzlich eine unterschrittige Kavität präpariert werden, um das Restaurationsmaterial zu verankern. Diese Art der Exkavation ist aus heutiger Sicht jedoch eine rein symptomatische Behandlung, bei der nur das Kranke entfernt, die Ursache der Erkrankung jedoch nicht behoben wird. Karies wird heutzutage nicht mehr als eine Infektionserkrankung angesehen, sondern als eine Erkrankung, die durch eine pathologische Veränderung des ökologischen Gleichgewichts verursacht wird. Folglich ist eine vollständige Entfernung aller Keime nicht mehr indiziert, um einen Therapieerfolg zu sichern. Daher zielen neue Behandlungskonzepte darauf ab, die ökologischen Rahmenbedingungen zu beeinflussen und so die Aktivität des Biofilms und der entstandenen Läsionen zu kontrollieren.

Neben der Kariesprophylaxe durch die mechanische Plaqueentfernung mit der Zahnbürste und den in Zahnpasten enthaltenen Fluoriden werden auch Fissuren und Grübchen versiegelt, um die Plaqueanlagerung zu erschweren. Man unterscheidet zwischen der präventiven Versiegelung, bei der intakte Fissuren und Grübchen versiegelt werden und der Kariesversiegelung, bei der nicht-kavitierte und kavitierte Läsionen versiegelt werden. Eine weitere Art der Versiegelung ist auch die Kariesinfiltration (12, 13). Diese ist anwendbar für proximale Läsionen, die röntgenologisch maximal bis ins erste Dentindrittel reichen.

Die Versiegelung kann bei den Therapieansätzen verschiedene Ziele und Auswirkungen haben. Bei der präventiven Versiegelung werden für den Patienten leicht zu reinigende Oberflächen geschaffen, wodurch die Ausbildung eines pathologischen Biofilms erschwert wird. Außerdem dient die Versiegelung als Schutz vor Säuren aus dem bakteriellen Stoffwechsel. Dies scheint auch bei nicht kavitierten, nicht infizierten Läsionen ein wichtiger Schutzmechanismus zu sein, der für den Therapieerfolg von Bedeutung ist (14-16). Bei der Versiegelung von Schmelzläsionen und bei der Kariesinfiltration nutzt man ebenfalls das Prinzip der Barriere gegen Säuren. Bei der Versiegelung von kavitierten Läsionen scheint jedoch das Abschneiden der bakteriellen Nährstoffzufuhr von größerer Bedeutung. Die Kohlenhydratversorgung der versiegelten Bakterien wird unterbrochen und es kommt zu einer Inaktivierung der Läsion (17, 18). Zurzeit stehen demnach verschiedene Behandlungsstrategien für kavitierte Läsionen zur Verfügung (Tab. 1).

Tab. 1 – Kariesexkavationsstrategien (19)

Vollständigkeit der Exkavation	„Vollständig“		„Unvollständig“	Keine Exkavation
Schritte	Einzeitig	Zweizeitig	Einzeitig	Einzeitig
	<b>Non-selektive (vollständige) Exkavation</b>	<b>Schrittweise Exkavation</b>	<b>Selektive Exkavation</b>	<b>Versiegelung</b>
Vorgehen	<ul style="list-style-type: none"> <li>vollständige Entfernung allen infizierten Dentins</li> <li>definitive Restauration</li> </ul>	<p>In erster Sitzung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>periphere vollständige Exkavation</li> <li>Belassen von erweichtem (kariösem) Dentin in Pulpanähe</li> <li>Temporäre Restauration</li> </ul> <p>In zweiter Sitzung:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>ggf. weitere Exkavation</li> <li>definitive Restauration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>peripher vollständige Exkavation</li> <li>in Pulpanähe selektives Belassen von erweichtem (kariösem) Dentin</li> <li>definitive Restauration</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Belassen allen kariösen Dentins</li> <li>Dichter Abschluss durch Restauration oder Versiegelung</li> </ul>

Die non-selektive (vollständige) Exkavation zielt auf die Entfernung des gesamten infizierten Zahnhartgewebes ab. Doch auch bei dieser Exkavation ist eine Entfernung aller Bakterien nicht möglich (20, 21). Schon eine Unterscheidung zwischen dem gesunden und dem infizierten Dentin ist klinisch schwer möglich. Zur Beurteilung der vollständigen Exkavation werden Kriterien wie Härte, Farbe oder Feuchtigkeit verwendet (19, 22), jedoch handelt es sich hierbei um subjektive Kriterien. Ein Hilfsmittel zur Darstellung der Karies sind „Kariesdetektoren“. Dies sind basische Fuchsinrotfarbstoffe, die die kariöse Zahnhartsubstanz anfärben sollen. In mehreren Studien wurde herausgefunden, dass sich das kariöse Dentin in zwei Schichten teilt (23, 24). Die erste Schicht liegt meist nahe der Schmelz-Dentin-Grenze und ist sehr stark bakteriell infiziert. Die zweite Schicht, die sich in der Nähe der Pulpa befindet, ist weniger stark demineralisiert, nicht infiziert und lässt sich remineralisieren. Mithilfe des Farbstoffs sollte also die Exkavation nur der infizierten Schicht erleichtert werden. Histologische Untersuchungen zeigten jedoch, dass die genaue Unterteilung in zwei Schichten klinisch sehr schwierig ist und die Schichten sich nur schwer voneinander abgrenzen lassen. Daher wird meist tiefer exkaviert als eigentlich notwendig (25).

Kariesdetektoren scheinen also nur begrenzt anwendbar zu sein und bieten bei pulpanahen Läsionen keine zuverlässige Hilfe bei der Exkavation.

Daneben birgt eine vollständige Exkavation von pulpanahen Läsionen Risiken, u.a. iatrogene Eröffnungen der Pulpa (26). Kommt es zur Eröffnung, sollte eine direkte Überkappung oder eine Wurzelkanalbehandlung erfolgen. Die direkte Überkappung stellt jedoch nur einen Versuch dar, die Wurzelkanalbehandlung zu vermeiden und den Zahn vital zu erhalten. Scheitert dieser Versuch und es kommt zu einer Infektion der Pulpa, muss eine Wurzelkanalbehandlung erfolgen. Die Wurzelkanalbehandlung stellt dann für den Patienten eine unangenehme und teils schmerzhaft Behandlung dar. Durch die Devitalisierung wird der Zahn zusätzlich geschwächt und frakturanfälliger. Die Schwächung resultiert aus dem Substanzverlust durch die Zugangskavität und die Aufbereitung der Kanäle (27), aber auch durch die stärkere Belastung bei Kauvorgängen, da dem Zahn die pulpalen Mechanorezeptoren fehlen (28). Frakturiert ein Zahn, können hohe Kosten für eine prothetische Versorgung für den Patienten entstehen, da eine Krone notwendig werden kann. Bei Verlust des Zahnes muss dieser dann prothetisch ersetzt werden.

Aus all diesen Gründen resultieren Überlegungen, dass man kariöse Zahnhartsubstanz in Pulpanähe belassen und somit eine Exposition der Pulpa verhindern könnte. Eine Therapiemöglichkeit, die dies umzusetzen sucht, ist die schrittweise Exkavation. Hierbei wird demineralisiertes Dentin bewusst belassen und die Kavität zunächst mit einer provisorischen Restauration verschlossen. Bis zur zweiten Behandlung die nach etwa 3 - 6 Monaten erfolgt, werden die Odontoblasten zur Tertiärdentinbildung angeregt und das Dentin wird remineralisiert. In der zweiten Behandlung wird zunächst die Sensibilität des Zahnes überprüft und dann in der Regel das restliche kariöse Dentin entfernt. Studien belegen, dass es nach dem erstmaligen dichten Verschluss schon zu einer Reduzierung der Läsionsaktivität kommt. Durch den dichten Verschluss werden die Mikroorganismen von ihrer Substratzufuhr abgeschnitten und können dadurch nicht überleben und sich nicht weiter vermehren (17, 18, 29-33). So zeigt sich in der zweiten Sitzung häufig eine trockene, härtere und auch teils bakterienfreie Läsion. Daher muss oft gar nicht mehr oder nur sehr wenig exkaviert werden und die provisorische Restauration kann durch eine definitive Restauration ausgetauscht werden. Somit stellt sich die Frage, ob es nicht möglich ist, den Zahn nach dem ersten Exkavationsschritt bereits definitiv zu versorgen, anstatt ein weiteres Mal invasiv vorzugehen und kariöse Zahnhartsubstanz zu entfernen. Bei der selektiven (unvollständigen) Exkavation wird

daher auf diesen zweiten Behandlungsschritt verzichtet und peripher vollständig exkaviert, in Pulpanähe wird jedoch leicht erweichtes Dentin dauerhaft unter einer Restauration belassen. Eine weitere Behandlungsmethode ist die Kariesversiegelung. Hierbei wird gar nicht exkaviert und der Defekt mit einer adhäsiven Restauration oder einer Stahlkrone versorgt (34, 35).

### **2.3 Selektive Kariosexkavation**

Bei der selektiven Exkavation wird wie oben erwähnt das demineralisierte Dentin nur in der Peripherie exkaviert, in Pulpanähe hingegen bewusst belassen. Im Anschluss wird der Defekt adhäsiv restauriert (36). Diese neue Art der Kariesbehandlung ist Gegenstand vieler Untersuchungen. In einer Übersichtsarbeit (19) wurden vorhandene klinische Studien, die sich mit dem Thema der Behandlung von primär im Dentin lokalisierten kariösen Läsionen durch Exkavation und anschließender Restauration beschäftigten, untersucht und ausgewertet. Analysiert wurden hierbei die folgenden Behandlungsrisiken: die Exposition der Pulpa, das Risiko postoperativer Pulpakomplikationen und andere, nicht-pulpale Komplikationen, wie Zahnfraktur und Retentionsverlust. Das Risiko der Pulpaeröffnung war bei schrittweiser oder selektiver Exkavation signifikant geringer als bei vollständiger Exkavation. Im Vergleich zu einer selektiven Exkavation kam es bei schrittweiser Exkavation vor allem im zweiten Exkavationsschritt zur Pulpaexposition (37). Daher scheint in Bezug auf die Vermeidung der Pulpaexposition die selektive Exkavation die überlegenere Behandlungsmethode zu sein. Weiterhin wurde gezeigt, dass nach selektiver Exkavation weniger postoperative pulpale Komplikationen auftreten als nach vollständiger Exkavation (38). Die non-pulpalen Komplikationen bei Zähnen, deren Pulpa nicht exponiert ist, waren bei vollständiger und unvollständiger Exkavation nicht signifikant verschieden.

In einer weiteren Meta-Analyse (39) wurden 19 klinische Studien untersucht, die klinische oder radiologische Misserfolge nach einer selektiven Exkavation analysiert hatten. Zähne, die vor der Exkavation keine Beschwerden zeigten, hatten demnach ein geringeres Versagensrisiko als Zähne, die schon vor der Exkavation Beschwerden zeigen. Weiterhin ergab die Studie, dass das Risiko für Versagen geringer ist bei Zähnen, die selektiv exkaviert wurden im Vergleich zu Zähnen, die schrittweise exkaviert wurden. Die Verwendung von sogenannten Linern wie Kalziumhydroxid

scheint keinen signifikanten Einfluss auf das Versagen von selektiv exkavierten Zähnen zu haben. In Bezug auf die Defektgröße ergab sich, dass selektiv exkavierte Zähne mit einer einflächigen Restauration ein geringeres Risiko für Versagen aufweisen als Zähne mit mehrflächigen Restaurationen.

Unklar ist bisher, wieviel kariöses Dentin belassen werden kann und welche Auswirkungen dies auf die mechanischen Eigenschaften der Zähne hat. Man befürchtet, dass das belassene demineralisierte Dentin zu einer geringeren Frakturbeständigkeit und auch zu einem verminderten Haftverbund zwischen Dentin und Restauration führt (40). Eine Studie (41) deutet darauf hin, dass es einen Unterschied hinsichtlich der Frakturbeständigkeit zwischen Zähnen mit und ohne belassenem demineralisiertem Dentin unter direkten (Komposit) Restaurationen gibt. Hierbei wurden humane extrahierte Molaren mit Läsionen verwendet, die deutliche und großflächige Kavitätenbildungen aufwiesen (42). An allen Probenzähnen wurden okklusale Kavitäten präpariert. Die eine Gruppe wurde selektiv, die andere Gruppe vollständig exkaviert. Im Anschluss wurden alle Zähne mit einer adhäsiven Restauration versorgt und von okklusal bis zur Fraktur belastet. Zähne mit belassener Läsion hatten eine signifikant geringere Frakturbeständigkeit als vollständig exkavierte Zähne. Dies könnte mit der geringeren Härte des kariösen Dentins begründet werden. Die vollständig exkavierten Zähne zeigten überwiegend vertikale Frakturen, während es bei den selektiv exkavierten Zähnen zu sogenannten „ice-cracks“ kam, d.h. die Restaurationen in die darunterliegende weiche, kariöse Schicht eingebrochen waren. Unklar ist, ob ein solches Verhalten nur bei okklusalen oder auch bei approximalen Läsionen auftritt. Zudem ist der Einfluss der Menge des belassenen demineralisierten Dentins auf die Frakturbeständigkeit unbekannt.

## **2.4 Hypothesen und Ziele**

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sowohl die zweizeitige als auch die selektive Exkavation geeignet zu sein scheinen, pulpale Komplikationen bei der Behandlung tiefer kariöser Läsionen in vitalen Zähnen zu vermeiden. Durch die Vermeidung von Pulpaexpositionen und postoperativen Beschwerden könnten Zähne länger erhalten und Behandlungskosten und –aufwand reduziert werden. Unklar ist bisher jedoch, ob eine unter einer Restauration belassene kariöse Läsion die mechanische Unterstützung

der Restauration kompromittiert, da kariöses Dentin weniger hart ist als gesundes Dentin. Dies könnte zu einer höheren Frakturanfälligkeit nach selektiver Exkavation führen (41). Ebenso wird befürchtet, dass der möglicherweise reduzierte Haftverbund zwischen der adhäsiven Restauration und der kariösen Läsion zu einer vermehrten Höckerdehnung bei Belastung führt, was zu Randundichtigkeiten der Restauration führen könnte (43). Schließlich ist auch unklar, ob Frakturanfälligkeit und Höckerdehnung durch die Menge des belassenen (oder exkavierten) Dentins beeinflusst werden.

Um diese Fragen zu klären, wurden Versuche mit folgenden Zielen durchgeführt:

1. Zunächst sollte untersucht werden, ob selektiv exkavierte Zähne eine geringere Frakturbeständigkeit aufweisen als vollständig exkavierte Zähne.
2. Des Weiteren sollte untersucht werden, ob es signifikante Unterschiede der Frakturmodi von selektiv versus vollständig exkavierten Zähnen gibt.
3. Zudem sollte untersucht werden, ob die Tiefe der belassenen oder entfernten Läsionen einen signifikanten Einfluss auf die Frakturbeständigkeit hat.
4. Schließlich sollte ermittelt werden, inwieweit eine belassene Läsion die Dehnung der Höcker bei statischer Belastung beeinflusst.

Folgende Hypothesen sollten dabei überprüft werden:

1. Die Frakturresistenz von selektiv versus vollständig exkavierten Prämolaren ist nicht signifikant verschieden.
2. Die Tiefe der belassenen oder entfernten Läsion hat einen signifikanten Effekt auf die Frakturbeständigkeit.
3. Die Tiefe der belassenen oder entfernten Läsion hat einen signifikanten Effekt auf die Höckerdehnung bei Belastung.

### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Versuchsaufbau**

Für die Versuche wurden 48 humane unversehrte extrahierte Prämolaren verwendet (Abb. 3). Zur Herstellung eines einheitlichen Defektes wurden die Prämolaren mit einer Standard-Präparation versehen. Anschließend wurden flache bzw. tiefe künstliche kariöse Läsionen (mittlere Läsionstiefe  $\pm$  Standardabweichung:  $68 \pm 18 \mu\text{m}$  bzw.  $776 \pm 170 \mu\text{m}$ ) an den pulpalen Wänden hergestellt. Danach wurde das demineralisierte Dentin in der Hälfte der Zähne belassen und in der anderen Hälfte der Zähne vollständig exkaviert ( $n = 12/\text{Gruppe}$ ). Alle Zähne wurden im Anschluss mit einer adhäsiven Kompositrestauration saniert. Die gefüllten Zähne wurden im Kausimulator und im Thermowechselbad belastet. Zur Untersuchung der Höckerdehnung bei Belastung wurden die Zähne zuerst mit einer Kraft von 200 N und dann mit 400 N belastet und die Höckerdehnung über Messuhren bestimmt. Im Anschluss erfolgte die kontinuierliche Steigerung der Kraft bis zur Fraktur. Es folgte die Bestimmung des Frakturmodus. Als Letztes wurde die Tiefe der belassenen kariösen Läsionen mittels transversaler Mikroradiografie gemessen.

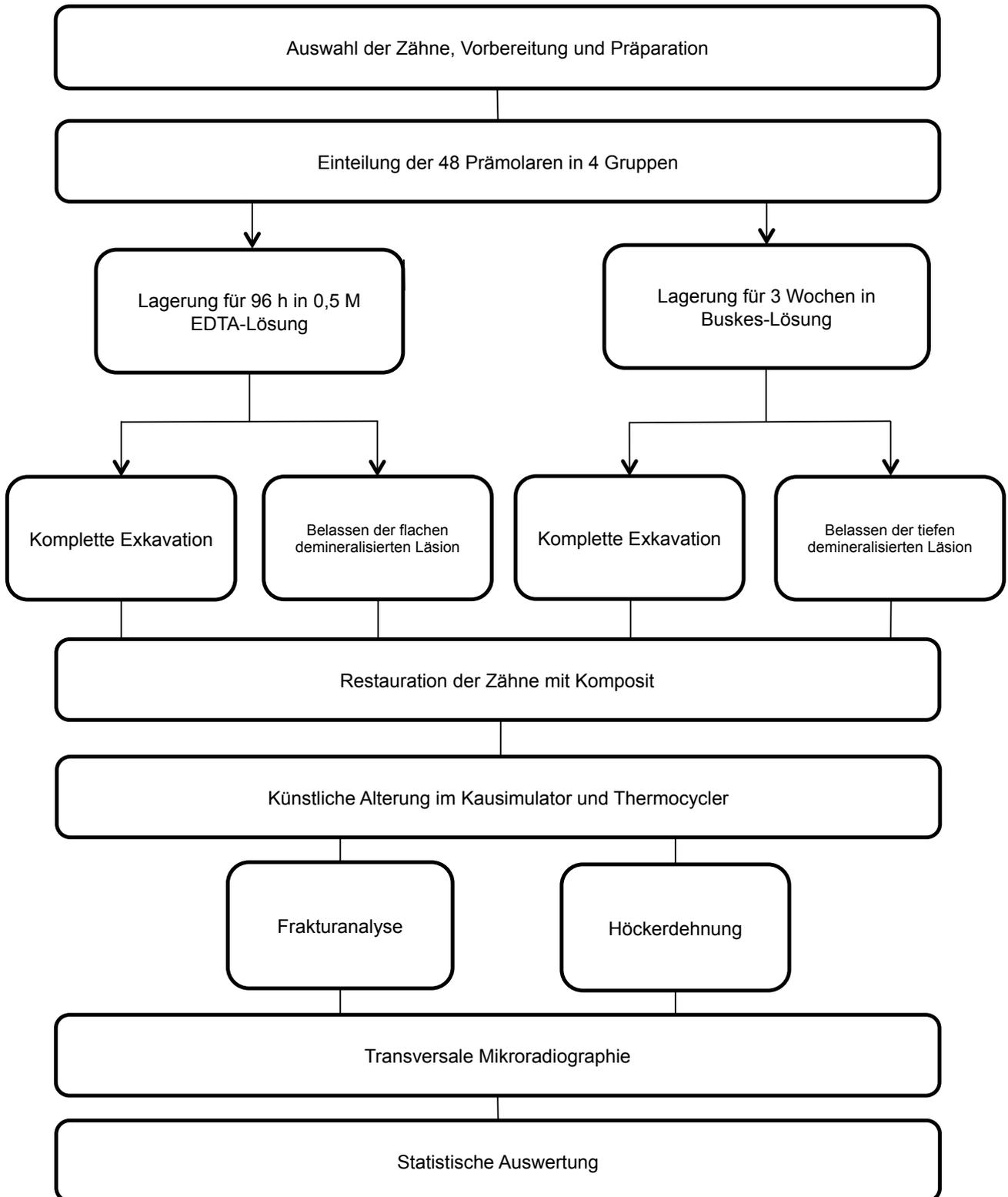


Abb. 3 – Schematische Darstellung des Versuchsablaufes

### **3.2 Vorbereitung der Zähne**

Für die Versuche wurden humane obere Prämolaren unter den Bedingungen der Deklaration von Helsinki gewonnen. Der Einsatz der Zähne für Forschungszwecke war durch die Ethikkommission des UKSH genehmigt (D444/10). Die Prämolaren wurden in 0,1 %iger Thymollösung gelagert. Die Auswahl der Zähne erfolgte zunächst nach ihrer Größe. Dazu wurden 130 Oberkieferprämolaren in mesio-distaler und vestibulo-oraler Richtung vermessen (digitale Messlehre, TCM, Hamburg). Die Spannbreite der 48 ausgewählten Zähne betrug in mesio-distaler Richtung 5,9 - 7,4 mm und in vestibulo-oraler Richtung 7,7 - 10,4 mm. Die Zähne wurden visuell-taktil auf ihre Unversehrtheit hin überprüft.

Vor der weiteren Verwendung wurden die Zähne mithilfe eines Scalers (Hu-Friedy SM239, Hu-Friedy Rotterdam, Niederlande) und einer Polierbürste (HS-Prophylaxebürstchen, Henry Schein, Langen) gereinigt. Zur besseren Handhabung wurden die Zähne bis 1 mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze mit einem Akrylharz (Technovit 4071, Heraeus Kulzer, Hanau) in ein Stahlrohr eingebettet. Das Stahlrohr hatte einen Durchmesser von 15 mm und eine Länge von 15 mm. Die Einbettung erfolgte jeweils entsprechend der Zahnachse mithilfe einer Apparatur so, dass sich die Okklusalfäche senkrecht zum Stahlrohr befand. Alle Zähne wurden auf die gleiche Höhe eingebettet, sodass sie 17 mm über dem Stahlrohr endeten. Für die spätere Zuordnung wurden in die Stahlrohre Nummern (H1 - H32) eingraviert.

An der unteren Seite des Stahlrohres wurde mit Kleber (Instand Adhesive, Loctite, Henkel, Hatfield, United Kingdom) ein Keramikträger (Vita Zahnfabrik, Bad Säckingen) befestigt, um die Proben in den Kopierschleifer (Celay, Mikrona, Spreitenbach, Schweiz) einspannen zu können.

### **3.3 Kavitätenpräparation**

Zur Vorbereitung für die folgenden Versuche wurde eine Master-Präparation an einem Prämolaren vorgenommen (Abb. 4). Die okklusale Kavität war 2,0 mm breit und 2,5 mm tief. Die beiden Kästen wurden unterschiedlich tief präpariert. Mesial endete der Kasten 1 mm oberhalb und distal 1 mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze. Für die

Präparation wurde ein diamantierter Zylinder bei 20.000 Umdrehungen pro Minute (ISO 524, Korngröße 64 – 126  $\mu\text{m}$ ; Komet, Brassler, Lemgo) verwendet.

Die Präparation wurde nun mit einem Kopierschleifer (Celay Mikrona) auf alle Probenzähne übertragen. Um kleine Längenunterschiede der Zähne auszugleichen, wurde der Kavitätenrand an einigen Zähnen mit rotierenden Instrumenten nachpräpariert. Außerdem wurde der Rand der Kavität im Schmelz- und im Zementbereich angeschrägt. Im Anschluss wurden alle Zahnoberflächen mit einem Mikroskop (Stemi Zoom, Zeiss, Oberkochen, Deutschland) auf ihre Unversehrtheit überprüft, um Risse und Veränderungen auszuschließen.

Anschließend sollten an den pulpo-axialen Wänden künstliche demineralisierte Läsionen hergestellt werden. Dazu wurden alle Zähne mit drei dünnen Nagellackschichten (High Gloss, Rossmann, Burgwedel, Deutschland) versehen, um die anderen Zahnflächen vor den Demineralisationslösungen zu schützen. Nun wurde der Nagellack an einem 2 x 2 mm großem Fenster an den pulpo-axialen Wänden mit einem Diamanten (ISO 514, Korngröße 27 – 76  $\mu\text{m}$ ; Komet) entfernt, um im Anschluss dort die demineralisierten Läsionen herzustellen.

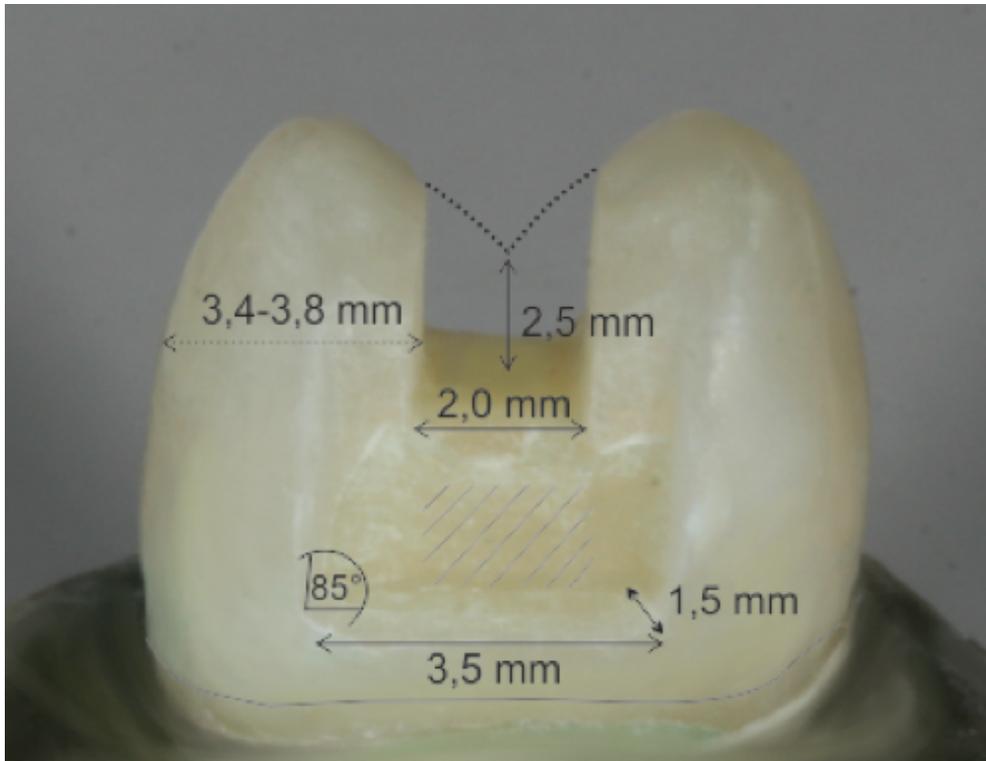


Abb. 4 - Ausdehnung der präparierten Kavität. Abbildung aus (1).

Die Wände der approximalen Kästen standen in einem Winkel von  $85^\circ$  zum Kastenboden, der Kasten endete mesial 1,0 mm oberhalb und distal 1,0 mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze, der schraffierte Bereich entsprach der Fläche der künstlich hergestellten demineralisierten Läsion.

### 3.4 Erzeugung künstlicher Läsionen

Die Zähne wurden nun zufällig in vier Gruppen (n = 12) aufgeteilt (Abb. 5). Zur Erzeugung einer tiefen demineralisierten Läsion wurde die Hälfte der Probenzähne (Gruppe 1 und 2) für 96 h bei 36 °C in 0,5 M EDTA-Lösung gelagert. Die 0,5 M EDTA-Lösung wurde mit Zitronensäure auf einen pH-Wert von 7 gepuffert. Die mittlere Läsionstiefe (LT) (Standardabweichung) betrug 719 (79) µm. Dies war an Probenzähnen in einem Vorversuch mittels Transversaler Mikroradiographie (siehe 3.10) ermittelt worden. Die andere Hälfte der Zähne (Gruppe 3 und 4) wurde zur Erzeugung einer flachen Läsion für 3 Wochen in einer Azetat-Lösung (nach Buskes et. al 1985) gelagert (Tab. 2). Die Lagerung erfolgte ebenfalls unter ständiger Bewegung bei 36 °C. Vorversuche ergaben eine mittlere Läsionstiefe von LT = 262 (40) µm. Die flache Läsion sollte die minimal selektive Kariesexkavation simulieren, die tiefe Läsion die ultrakonservative Kariesexkavation. Diese Typen der Läsionen wurden gewählt, um beide Extreme darzustellen.

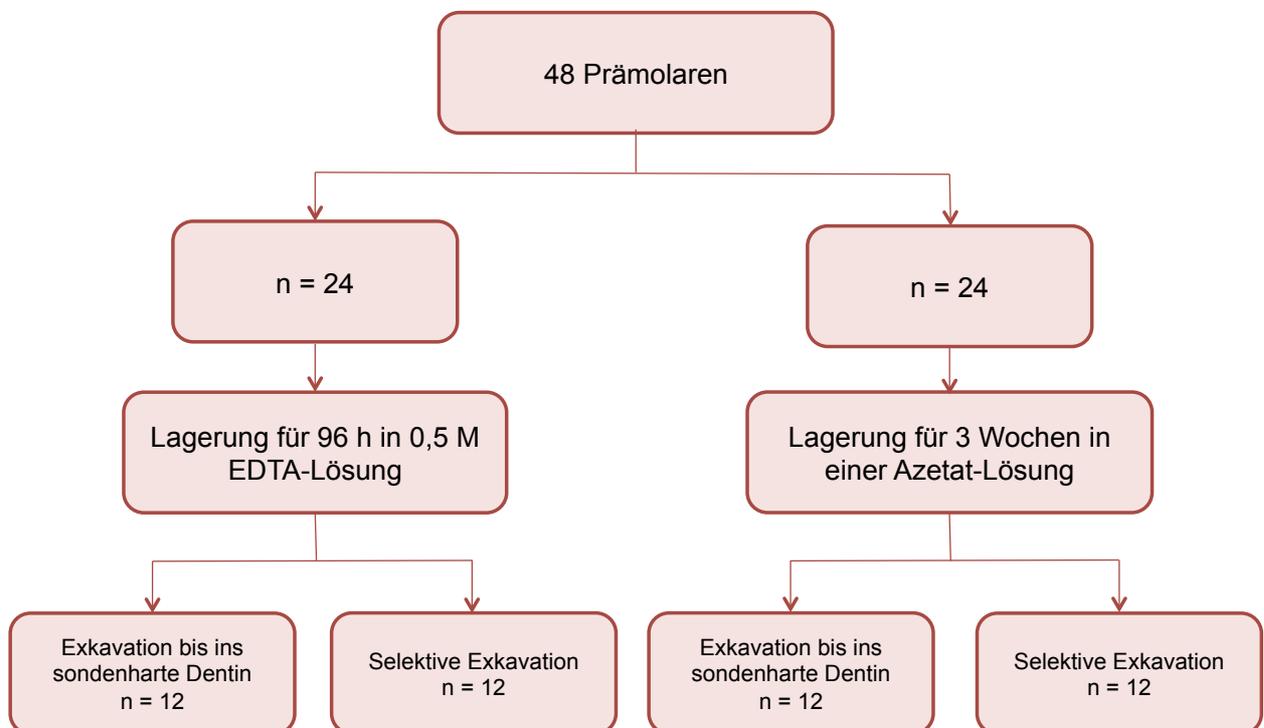


Abb. 5 - Einteilung der Zähne für die Kariesherstellung

Tab. 2 – Zusammensetzung der Demineralisationslösung nach Buskes et al. (1985)

Stoff	Ansatz	Konzentration in mmol	Molare Masse in g/mol	Menge
$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	5 l	3	147,02	2,205 g
$\text{KH}_2\text{PO}_4$	5 l	3	136,09	2,041 g
Methyldiphosphorsäure	5 l	0,006	176,00	5,28 g
Eisessig ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ 100 %)	5 l	50	60,05	15,012 g
KOH 10M (28,055 g / 50 ml $\text{H}_2\text{O}$ )	5 l		56,11	Ad pH 5 ca. 23 ml
Aqua dest.	5 l		18	Ad 5 l

Anschließend wurde der Nagellack mit einem Scaler (Scaler 135 Gr. 9, Hu-Friedy) entfernt. Nun wurden die Gruppe 1 und 3 durch einen erfahrenen Anwender (FS) mit einem Handexkavator (HF CD89/29, HuFriedy) exkaviert bis nur noch hartes Dentin in Pulpanähe verblieb. Während der Exkavation wurde bei keiner Probe die Pulpa eröffnet.

### 3.5 Restauration der Zähne

Zur Konditionierung wurden die Zähne mit 37%iger Phosphorsäure (3M Espe, St. Paul, USA) angeätzt. Dabei wurde zunächst der Schmelz für 15 s und anschließend zusätzlich das Dentin für 15 s geätzt. Die Säure und Präzipitate wurden danach über einen Zeitraum von 30 s mit Wasserspray entfernt. Anschließend wurden die Zähne vorsichtig mit Druckluft getrocknet, bis ein kreidiges Muster im Schmelz erkennbar war. Der Primer (OptiBond FL, Kerr, Bioggio, Schweiz) wurde mittels eines Applikator tips 30 s lang aufgetragen und 5 s lang verblasen. Als Letztes folgte das Adhäsiv (OptiBond FL), das aufgetragen, zu einer dünnen Schicht verblasen und für 20 s nach Herstellerangaben mit einer Strahlungsintensität von  $950 \text{ mW/cm}^2$  lichtgehärtet wurde (Smartlite, Dentsply De Trey, Konstanz).

Die Restauration erfolgte inkremental (Abb. 6) mittels Tetric EvoCeram (Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) nach Herstellerangaben. Das Ausarbeiten der Restauration erfolgte mit einem Diamanten (ISO 504, Korngröße  $\varnothing 15 \mu\text{m}$ ; Komet)

sowie mit Soflex-Scheiben (3M Espe). Um einen optimalen Randschluss zu erreichen, wurde der Randschluss unter dem Mikroskop (Stemi Zoom, Zeiss, Oberkochen) überprüft.

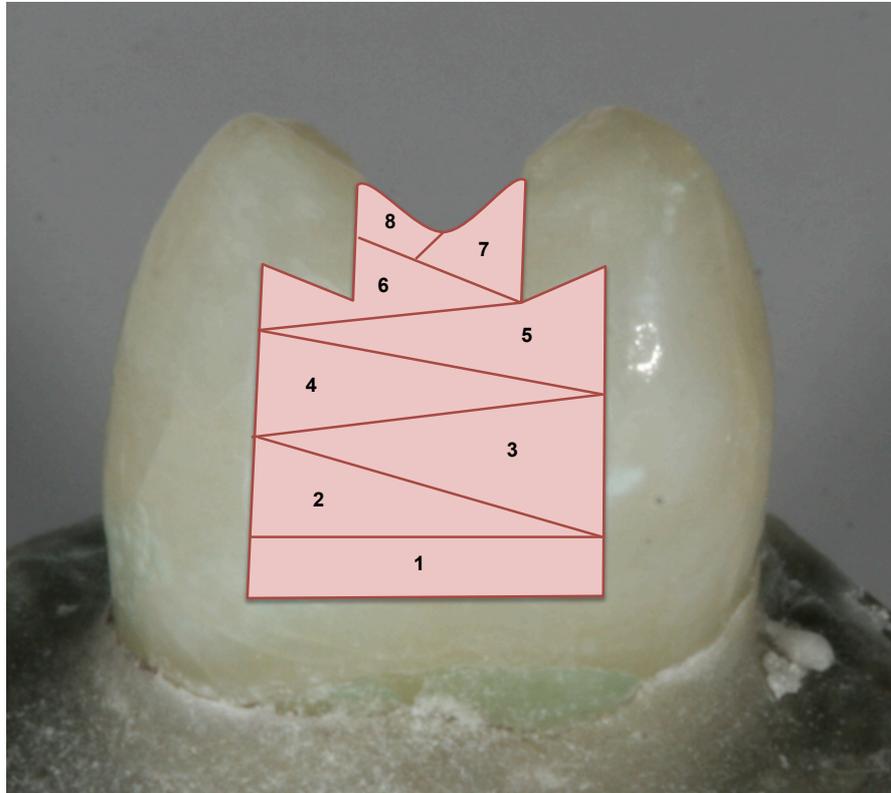


Abb. 6 – Schematische Darstellung der Inkrementtechnik

Bei der Inkrementtechnik werden nacheinander Kompositanteile in die Kavität eingebracht und polymerisiert (44-46). Dadurch kann die Polymerisationsschrumpfung reduziert und die Randdichtigkeit verbessert werden. Die Verbindung der einzelnen Kompositschichten wird durch die Sauerstoffinhibitionsschicht sichergestellt. Ein weiterer Vorteil der Inkrementtechnik ist die Verringerung des Konfigurationsfaktors (C-Faktor). Dieser gibt das Verhältnis zwischen gebundenen und ungebundenen Flächen einer Restauration an. Durch schräge Schichtung der einzelnen Inkremente wird die freie Oberfläche vergrößert, sodass das Material während der Polymerisation von den freien ungebundenen Flächen nachfließen kann und somit die Kontraktionsspannung verringert wird.

### 3.6 Wechselbelastung im Kausimulator und Thermocycling

In einem Vorversuch wurde getestet, ob mechanische (47) und thermische (48, 49) Wechselbelastungen einen signifikanten Einfluss auf die Frakturbeständigkeit selektiv

exkavierter Zähne haben. Dafür wurden acht Prämolaren verwendet und auf ihre Frakturbeständigkeit geprüft. Vier Vorversuchszähne wurden dafür im Thermowechselbad und im Kausimulator belastet. Im Anschluss daran wurden in der Universalprüfmaschine die Untersuchungen zur Frakturbeständigkeit und zur Höckerdehnung durchgeführt. Die anderen vier Prämolaren wurden direkt ohne vorherige Belastung in der Universalprüfmaschine untersucht. Thermisch und mechanisch belastete Zähne wiesen eine signifikant niedrigere Frakturbeständigkeit auf als sofort belastete Zähne ( $p \leq 0,05$ , t-Test). Dies bestätigen auch Ergebnisse aus früheren Studien (50). Um möglichst die Situation der Zähne im Mund darzustellen, erfolgte eine künstliche Alterung der Zähne im Kausimulator (Willytech, Feldkirchen-Westerheim). Es wurden  $1,2 \times 10^6$  Zyklen mit einer Belastung von 50 N durchgeführt (51-53). Eine Keramikkugel ( $\varnothing$  5 mm, Steatite, Hoechst, Wunsiedel) traf dabei von okklusal auf den bukkalen Abhang der palatinalen Höckerspitze (1,6 Hz,  $135^\circ$  Winkel). Die Hubhöhe betrug 6 mm und die Absenkgeschwindigkeit 30 mm pro Sekunde (Abb. 7). Um die Alterung möglichst real zu gestalten, wurde zusätzlich eine Abgleitbewegung von 0,3 mm am palatinalen Höcker durchgeführt. Die Zähne waren währenddessen in destilliertem Wasser gelagert.

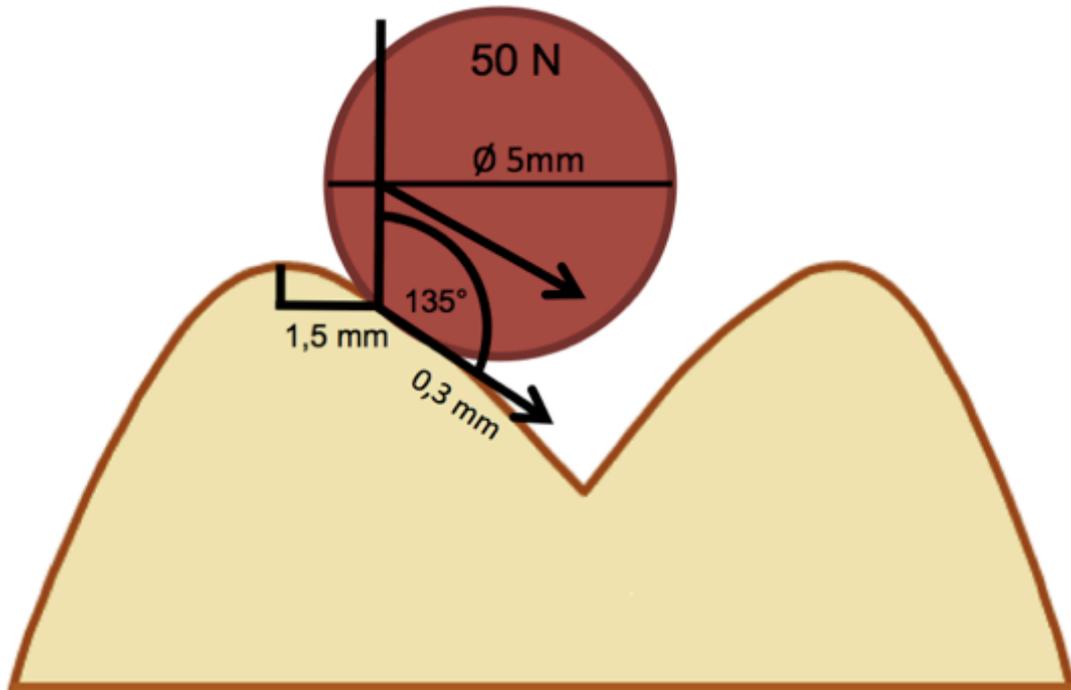


Abb. 7 - Schematische Abbildung der Belastung im Kausimulator.

Die Belastung erfolgt mit einer Keramikugel ( $\varnothing$  5 mm), die von okklusal 1,5 mm neben der palatinalen Höckerspitze auftrifft und in einem Winkel von  $135^\circ$  eine Abgleitbewegung von 0,3 mm durchführt.

Im Anschluss wurden die Zähne für 10.000 Zyklen im Thermowechselbad (liquid cycler, Haake, Karlsruhe) belastet. Dabei wurden die Zähne abwechselnd für jeweils 30 s in  $5^\circ\text{C}$  und  $55^\circ\text{C}$  warmen Wasser gelagert (54). Um eventuelle Risse oder Schäden der Zähne nach der Belastung auszuschließen, wurden sie erneut unter dem Mikroskop begutachtet.

### 3.7 Röntgenologische Darstellung der Läsionen

Röntgenaufnahmen wurden mit dem Röntgengerät KaVo Gendex expert DC (Gendex Dental Systems, Hatfield, USA) durchgeführt (Abb. 8). Dabei wurde die Parallelwinkeltechnik angewendet, bei der die Röntgenstrahlen senkrecht auf den Zahn und die Speicherfolie treffen, um eine möglichst ideale Darstellung zu erreichen. Die Röhrenspannung betrug 63 kV, der Röhrenstrom 8 mA und die Belichtungszeit 0,2 s. Die digitalen Speicherfolien (Größe 2:  $31 \times 41$  mm) wurden mit dem Scanner Scan

Exam digitales intraorales Filmsystem von Kavo (Palo DEx, Tuusula, Finnland) eingelesen und mit der Software VixWinPro (Gendex) dargestellt.

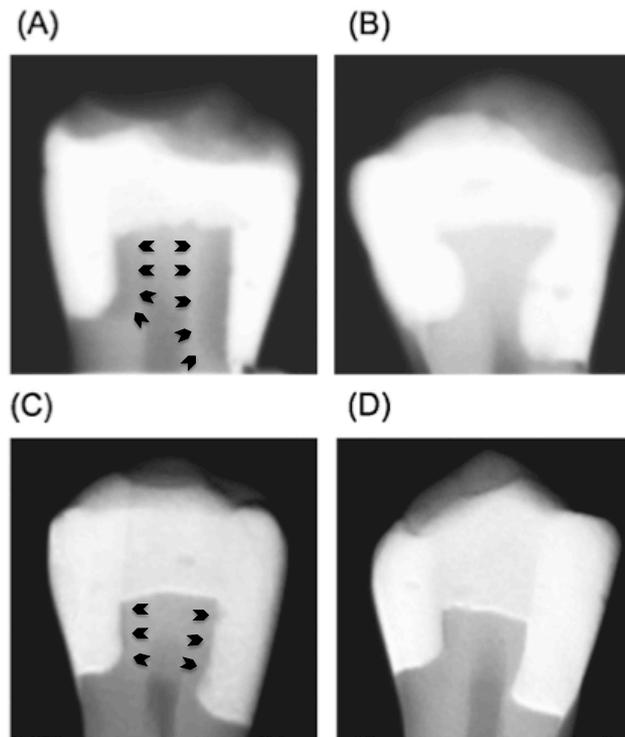


Abb. 8 - Röntgenbilder der Prämolaren mit tiefen (A und B) und flachen Läsionen (C und D).  
Abbildung aus (1) .

Das demineralisierte Dentin wurde unterhalb der Restauration belassen (selektive Exkavation, A und C) oder vollständig exkaviert (B und D).

### 3.8 Höckerdehnung bei Belastung

Die Proben wurden in einer Material-Universalprüfmaschine (Z010/ TN2S, Zwick, Ulm) fixiert und eine Zinnfolie (0,5 mm dick, Dentaurum, Pforzheim) zur gleichmäßigeren Kräfteverteilung zwischen den Stempel und die Kaufläche gelegt (52) (Abb. 9). An der Vestibulär- und Palatinalfläche der Zähne wurden auf Höhe des Äquators zwei Messuhren (Teclock TM-1201, Nagata, Japan, Messgenauigkeit 1 $\mu$ m) positioniert und auf Null geeicht. Um die Messfühler eindeutig positionieren zu können, wurden auf Höhe des Äquators kleine plane Flächen präpariert. Nun wurde statisch zuerst mit 200 N, dann mit 400 N belastet und die Ausschläge an der linken und rechten Messuhr abgelesen. Die Höckerdehnung wurde dann durch Addition der Werte der linken und

rechten Messuhr ermittelt. So wurde zuerst die Höckerdehnung bei 200 N (CD200) und dann bei 400 N (CD400) bestimmt. Während dieses Tests kam es nicht zur Fraktur von Zähnen.

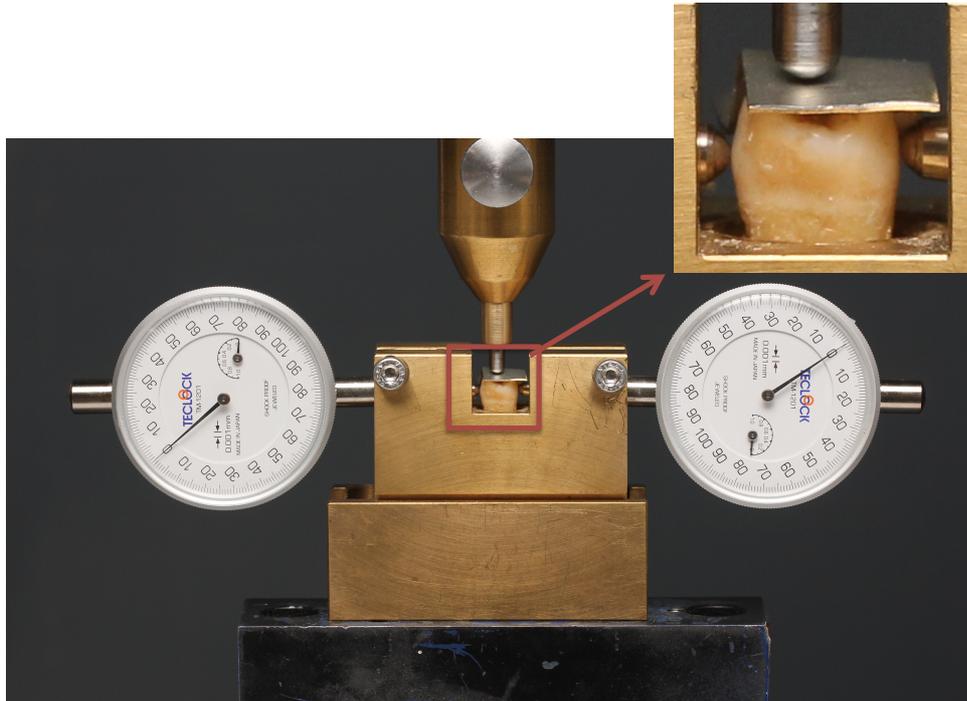


Abb. 9 – Material-Universalprüfmaschine.

Der Probenzahn wird mittig in die Apparatur eingespannt und wird dann von okklusal belastet. Die Zinnfolie zwischen Zahn und Stempel dient der gleichmäßigen Kraftübertragung. Auf Höhe des Zahnäquators sind zwei Messuhren angebracht, die die Auslenkung der Höcker bei Belastung messen sollen.

### 3.9 Frakturbeständigkeit und Frakturmodus

Um die Bruchfestigkeit zu bestimmen, wurden die Zähne mit konstant zunehmendem Druck bis zum ersten Frakturzeichen in einer Material-Prüfmaschine (Z010/ TN2S) belastet. Die Vorkraft betrug 5 N und die Prüfgeschwindigkeit 2 mm/min. Der Druck erfolgte mittig auf den Zahn und die Belastung wurde mit einer Zinnfolie zwischen Zahn und Stempel gleichmäßig übertragen. Der Versuch wurde gleichzeitig mit einer Kamera

(Digi Microscale, dnt, Dietzenbach, Deutschland) aufgezeichnet, um den Moment des Bruches später nachvollziehen zu können. Der Belastungsbruch wurde bei Abfall der maximalen Kraft in den Kraft-Frakturkurven digital aufgenommen (Zwicktest Xpert Software, Zwick) (Abb. 10). Die zum Bruch führende Kraft wurde in Newton gemessen.

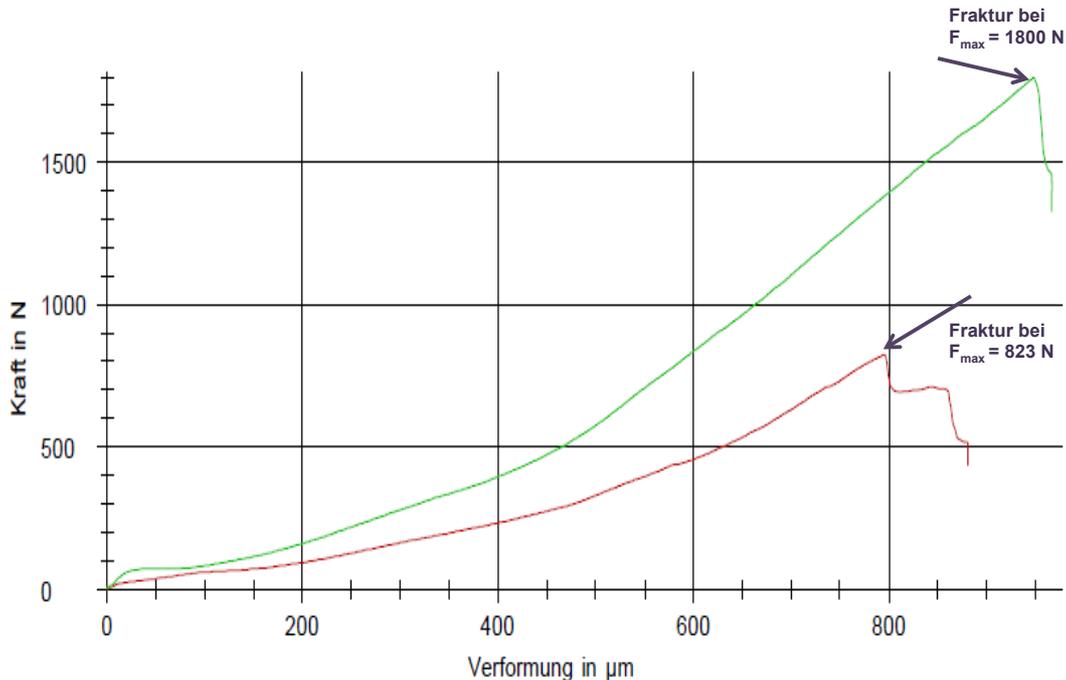


Abb. 10 - Grafik der Kraft-Frakturkurve von 2 Probenzähnen.

Die Grafik zeigt die unterschiedlichen Kraft-Fraktur-Kurven von zwei Probenzähnen (rot und grün). Dargestellt ist auf der Ordinate die Kraft [N] und auf der Abszisse die Verformung [ $\mu\text{m}$ ], die durch die Kraft hervorgerufen wird. Am höchsten Punkt der Kurve kommt es zur Fraktur des Probenzahnes. Anschließend wird die Belastung gestoppt und keine weitere Kraft mehr auf den Zahn ausgeübt.

Neben der Kraft, die aufgewendet werden musste, um den Zahn zu zerbrechen, wurde auch die Art des Bruches untersucht. Dabei wurden die Frakturen zunächst von zwei Personen (AB, FS) exakt hinsichtlich ihrer Ausdehnung und Lage beschrieben. Es wurde beschrieben, ob es sich ausschließlich um Frakturen in der Zahnhartsubstanz, der Restauration oder um kombinierte Frakturen handelte. Die Frakturen in der Zahnhartsubstanz wurden wiederum unterschieden in Schmelz- oder Dentinfrakturen und in kombinierte Schmelz-Dentinfrakturen. Im Anschluss wurden die Zähne danach eingeteilt, ob sie erhaltungsfähig waren oder nicht. Dabei wurde die Schmelz-Zement-

Grenze betrachtet. Zähne mit Frakturen > 2 mm unterhalb der Schmelz-Zement-Grenze wurden als nicht erhaltungsfähig eingestuft. Ebenso wurden Zähne mit vertikalen Kronen-Wurzelfrakturen als nicht erhaltungsfähig eingestuft. Erhaltungsfähig waren Zähne mit Kunststoff- und Höckerabplatzungen, die mittels Restaurationen oder Kronen saniert werden könnten. Diese Einteilung wurde wiederum durch zwei Personen (AB, FS) unabhängig durchgeführt. Die Inter-Rater-Reliabilität war bei dieser Beurteilung nahezu perfekt ( $\kappa = 0,81$ ,  $p = 0,001$ ) (55).

### **3.10 Transversale Mikroradiographie**

Die transversale Mikroradiographie diente der Messung der Läsionstiefe (LT) und des Mineralverlusts ( $\Delta Z$ ) von Läsionen in Schmelz oder Dentin. Dazu wurden die Zahnkronen von der Wurzel und der Metallhülse abgetrennt und für die transversale Mikroradiographie vorbereitet.

#### **3.10.1 Herstellung der Proben**

Die Zahnkronen wurden in einer Dublierform mit Akrylharz (Technovit 4071) eingebettet. Im Anschluss wurden die Zahnkronen von mesial nach distal mittig durchgesägt. Die Probenoberfläche wurde mit Schleifpapier (1200, 4000) absolut plan geschliffen. Nach der Politur wurde die Zahnkrone auf einen Kunststoffobjektträger (Diaplust, Oststeinbeck) geklebt (Instant Adhesive). Hierbei war zu beachten, dass die polierte Seite der Probe auf den Objektträger geklebt wurde und dass der Sekundenkleber nicht mit der Zahnhartsubstanz, sondern nur mit dem Technovit in Verbindung kam. Nach dem Aushärten des Klebers wurde von der Zahnkrone eine Scheibe abgeschnitten. Dazu wurde der Objektträger mit der Zahnkrone in der Aufnahme der Vakuumpalte der Bandsäge (Bandsäge Exakt 3000L, Exakt Apparatebau, Norderstedt) mit der Zahnkrone nach oben zeigend positioniert. So wurde die Probe während des Sägevorgangs in ihrer Position gehalten. Der Abstand des Sägebandes wurde so gewählt, dass die Probe nach dem Sägen noch ungefähr 150 - 200  $\mu\text{m}$  dick war. Die Probe wurde anschließend an der Schleifmaschine (Exakt Mikroschleifsystem 400 CS, Exakt, Norderstedt) plan parallel auf eine Dicke von  $100 \pm 10 \mu\text{m}$  geschliffen (1200 und 2500 Schleifpapier). Wenn die richtige Dicke erreicht war, wurde die Probe auf Hochglanz poliert (Schleifpapier 4000). Nach der Hochglanzpolitur

folgte die Vorbereitung für das Röntgen. Die Dünnschichtprobe wurde mithilfe eines Skalpell vom Objektträger gelöst und mit einem Klebestreifen (Leukofix, BSN medical, Hamburg) auf dem Probenhalter (Plano, Wetzlar) befestigt. Nun war die Probe bereit für die transversale Mikroradiographie und die Auswertung und wurde bis zu diesem Zeitpunkt in 0,9 %iger Kochsalzlösung gelagert.

### 3.10.2 Anfertigung der transversalen Mikrographien

Die hergestellten Proben wurden in ein spezielles Röntgengerät (PW 1730, Philips, Kassel) eingespannt, sodass die Nickel-Kupfer-Röntgenstrahlung (20 kV, 20 mA) die Probe senkrecht zur Schnittebene und parallel zur kariösen Oberfläche durchdringen konnte. Der Röntgenfilm (Fuji 35 positive, Amsterdam, Niederlande) befand sich in einem Abstand von 280 mm zur Strahlenquelle. Die Belichtungszeit betrug 10 s. Der Film wurde unter standardisierten Bedingungen nach Angaben des Herstellers entwickelt (Abb. 11).

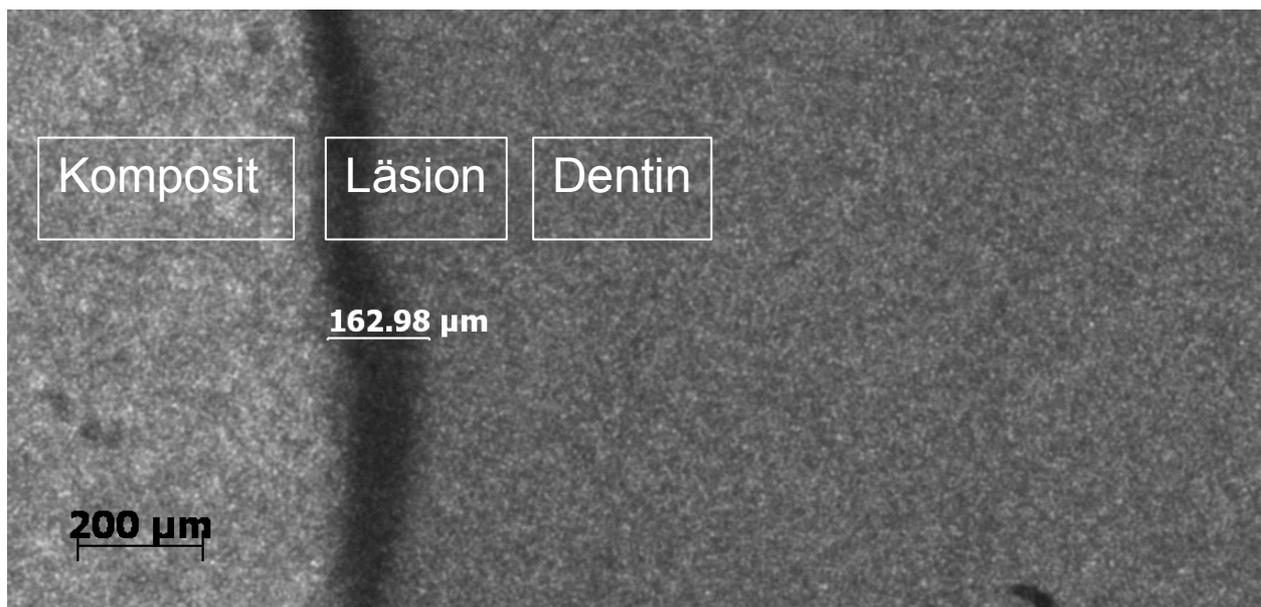


Abb. 11 – Mikroradiographie

Die Proben wurden in 150 – 200 µm dicke Scheiben geschnitten und auf eine Stärke von  $100 \pm 10$  µm planparallel geschliffen. Zusammen mit einem Stufenkeil wurden die Proben dann auf dem Probenhalter befestigt und mit Röntgenstrahlung bestrahlt. Die Mikroradiographie zeigt links das Komposit (hellgrau), in der Mitte die Läsion (dunkelgrau) und rechts das Dentin (mittelgrau).

### 3.10.3 Auswertung der Mikroradiographie

Die entwickelten Aufnahmen wurden mit Hilfe eines Durchlichtmikroskopes (Axioplan, Zeiss) fünffach vergrößert. Die an das Mikroskop angeschlossene Kamera (XC77E, Sony, Tokyo, Japan) digitalisierte und überspielte die Bilder auf den Computer. Die Bilder wurden hinsichtlich des Mineralverlustes ( $\mu\text{m} \times \text{Vol. \%}$ ) und der Tiefe ( $\mu\text{m}$ ) der Läsion mit dem Programm TMR 2008 (UMCG, Groningen, Niederlande) ausgewertet (Abb. 12). Der Mineralgehalt wird als Funktion der Tiefe berechnet und grafisch in Form eines Mikroradiogramms dargestellt. Die Läsionstiefe wird definiert als die Strecke zwischen der Probenoberfläche und dem Punkt der Probe, an dem der Mineralgehalt wieder 95 % des durchschnittlichen Mineralgehalts des gesunden Dentins aufweist. Der durchschnittliche Mineralgehalt des gesunden Dentins wird auf 48 Vol. % festgesetzt.

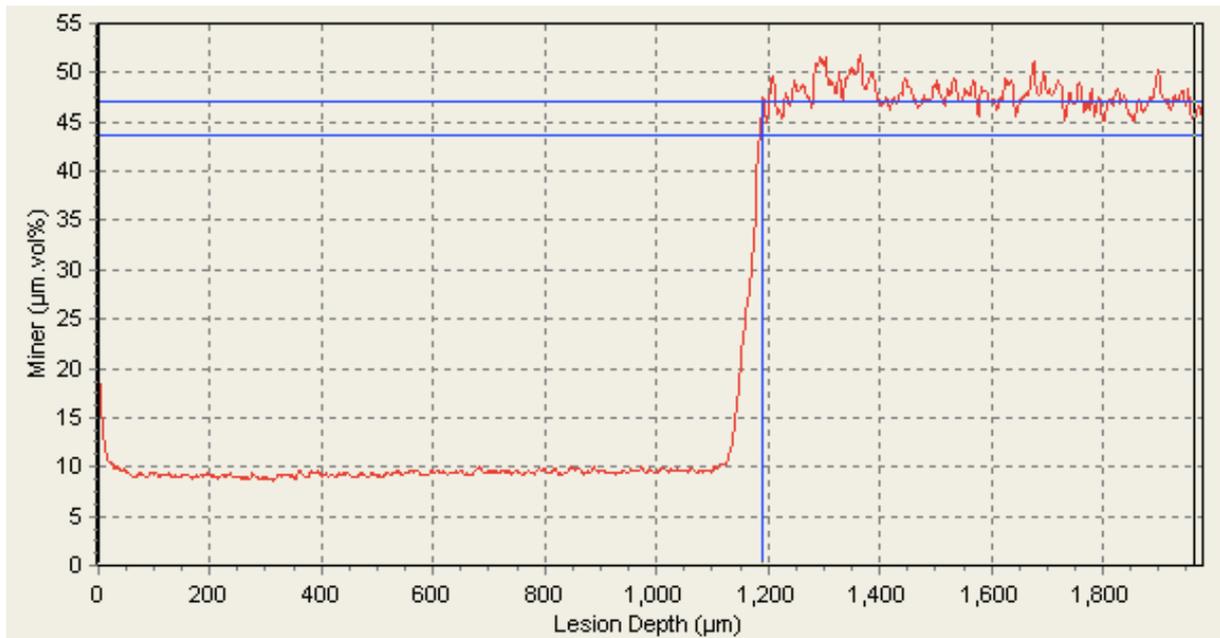


Abb. 12 - Mikroradiogramm eines Probenzahnes mit einer tiefen Läsion.

Dargestellt sind auf der x-Achse die Läsionstiefe in  $\mu\text{m}$  und auf der y-Achse der Mineralgehalt in  $\mu\text{m} \times \text{Vol. \%}$ .

## **4 Ergebnisse**

### **4.1 Tiefe der belassenen entmineralisierten Läsion**

Die transversale Mikroradiographie ergab für die flachen Läsionen für die Läsionstiefe einen Mittelwert (SD) von 64 (18)  $\mu\text{m}$  und für den Mineralverlust einen Mittelwert (SD) von 1.279 (797)  $\mu\text{m} \times \text{Vol. \%}$ . Die entsprechenden Werte für die tiefen Läsionen waren 771 (176)  $\mu\text{m}$  und 27.674 (8.006)  $\mu\text{m} \times \text{Vol. \%}$ .

### **4.2 Frakturbeständigkeit**

Die Zähne mit den vollständig exkavierten tiefen Läsionen und den selektiv exkavierten tiefen Läsionen zeigten eine signifikant verringerte Frakturbeständigkeit im Vergleich zu den Zähnen mit den selektiv und vollständig exkavierten flachen Läsionen ( $p \leq 0,001$ ; t-Test). Außerdem zeigte sich ein signifikanter Unterschied im Vergleich zwischen den beiden Gruppen, bei denen nur selektiv exkaviert wurde. Dahingegen bestand kein signifikanter Unterschied zwischen Zähnen mit vollständig exkavierten und selektiv exkavierten tiefen Läsionen hinsichtlich ihrer Frakturbeständigkeit. Ebenso zeigte sich kein signifikanter Unterschied zwischen Zähnen mit vollständig exkavierten und selektiv exkavierten flachen Läsionen ( $p > 0,350$ , t-Test) (Abb. 13).

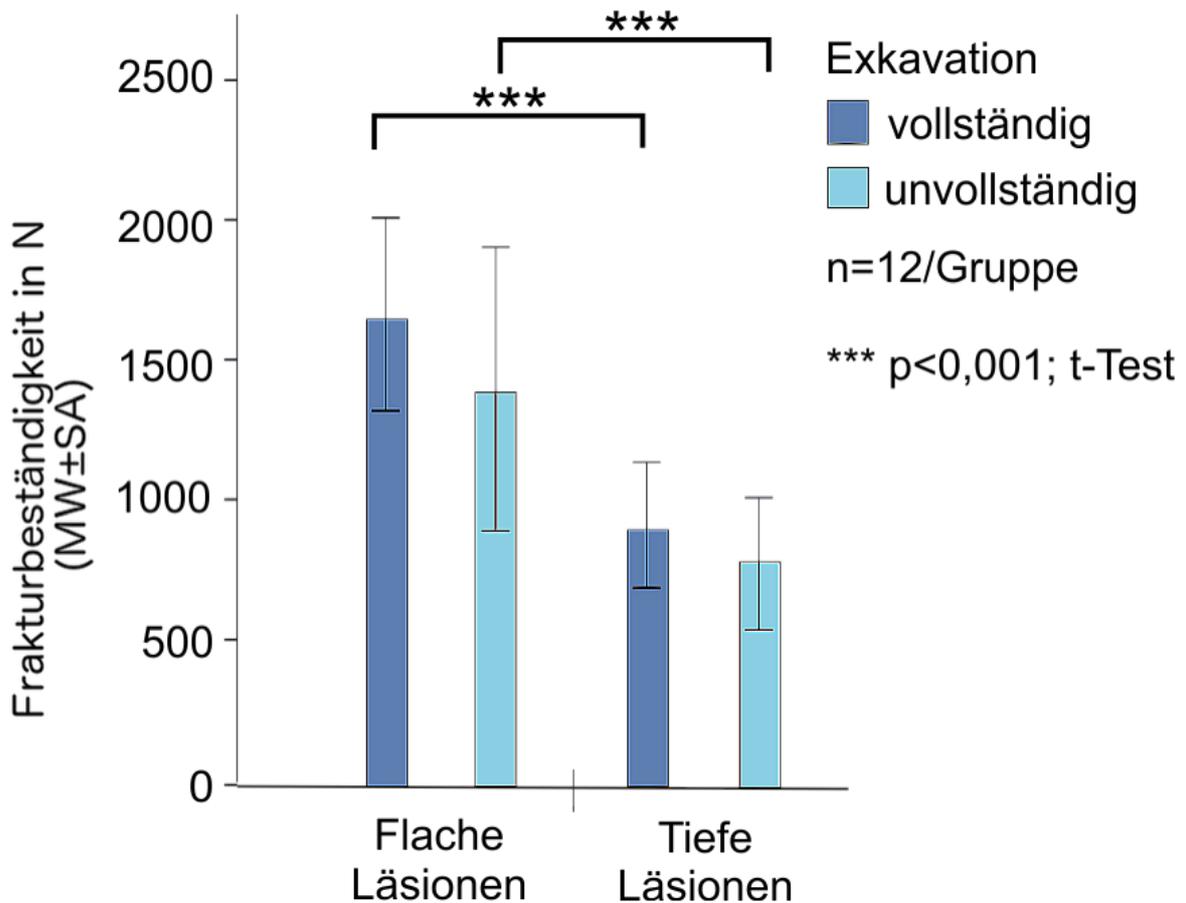


Abb. 13 – Frakturbeständigkeit.

Dargestellt ist die Frakturbeständigkeit (Mittelwert [MW] ± Standardabweichung [SA] in Newton [N]) von Zähnen mit selektiv exkavierten tiefen und flachen Läsionen (hellblau) und vollständiger Exkavation (dunkelblau) (n = 12/Gruppe). Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind durch drei Sternchen gekennzeichnet (\*\*\*)  $p \leq 0,001$ ; t-Test).

### 4.3 Frakturmodus

In beiden Versuchsgruppen mit tiefen, selektiv oder vollständig exkavierten Läsionen kam es häufig zu Frakturen der approximalen Kästen sowie Abplatzungen im restaurationsbegrenzenden Schmelz. In den Versuchsgruppen mit flachen, selektiv oder vollständig exkavierten Läsionen kam es häufig zu vertikalen oder schrägen vertikalen Frakturen (Abb. 14).

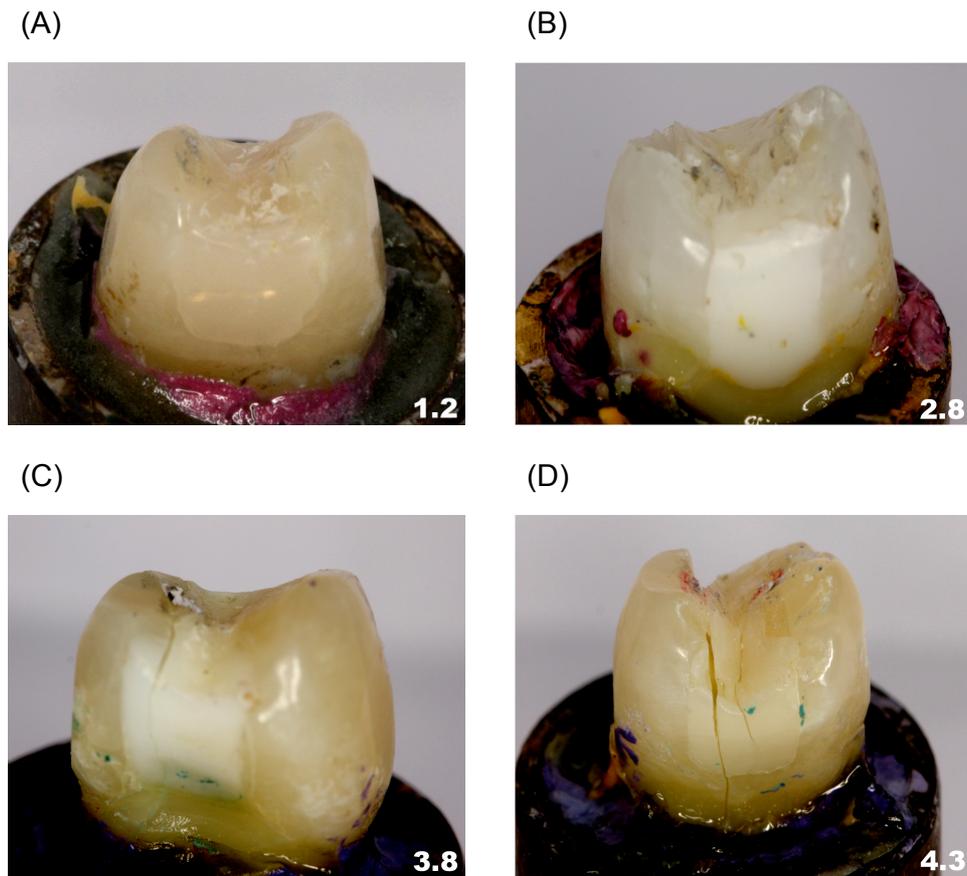


Abb. 14 – Fotografien der typischen Frakturen der jeweiligen Versuchsgruppe.

Zahn A zeigte an der palatinalen Höckerspitze eine Abplatzung des Schmelzes. Zahn B wies eine Schmelzabplatzung an der Höckerspitze direkt neben der Restauration auf. Zahn C hatte eine Querfraktur von mesial nach distal durch die Restauration und Zahn D zeigte eine Querfraktur von mesial nach distal, die durch die Restauration verlief und sich bis in die Zahnwurzel erstreckte, was dazu führte, dass der Zahn als nicht reparabel eingestuft wurde. Der Zahn wies außerdem Schmelzabplatzungen an den Höckerspitzen auf.

Eine weitere Einteilung der Zähne erfolge hinsichtlich ihrer Erhaltungsfähigkeit. Die Erhaltungsfähigkeit war nicht signifikant häufiger bei selektiv statt vollständig exkavierten Zähnen ( $p > 0,05$ , Fischer-Test). Zähne mit tiefen Läsionen zeigten hingegen signifikant mehr reparabile Frakturen als Zähne mit flachen Läsionen ( $p \leq 0,05$ ) (Tab. 3).

Tab. 3 – Analyse der Frakturmodi.

Läsionstiefe	demineralisiertes Dentin	nicht erhaltungsfähig	reparabel	Summe
tief	selektiv exkaviert (Gruppe 1)	4	8	12
	exkaviert (Gruppe 2)	5	7	12
		38%	62%	100%
flach	selektiv exkaviert (Gruppe 3)	7	5	12
	exkaviert (Gruppe 4)	10	2	12
		71%	29%	100%
Gesamt		26	22	48

#### 4.4 Höckerdehnung

In Bezug auf die Höckerdehnung zeigte die Versuchsgruppe mit vollständig exkavierten, tiefen Läsionen einen signifikanten Unterschied im Vergleich zu der Gruppe mit selektiv exkavierten tiefen Läsionen. Sowohl bei Belastungen von 200 N als auch bei Belastungen von 400 N ( $p \leq 0,05$ ) zeigten die Gruppen mit den vollständig exkavierten tiefen Läsionen niedrigere Werte als die selektiv exkavierten Probenzähne. Im Gegensatz dazu gab es keinen signifikanten Unterschied bei den Gruppen mit den flachen Läsionen, unabhängig davon, ob die Läsion selektiv oder vollständig exkaviert wurde. Die Läsionstiefe hatte keinen signifikanten Einfluss auf die Höckerdehnung ( $p > 0,05$ , Mann-Whitney-U-Test) (Abb. 15).

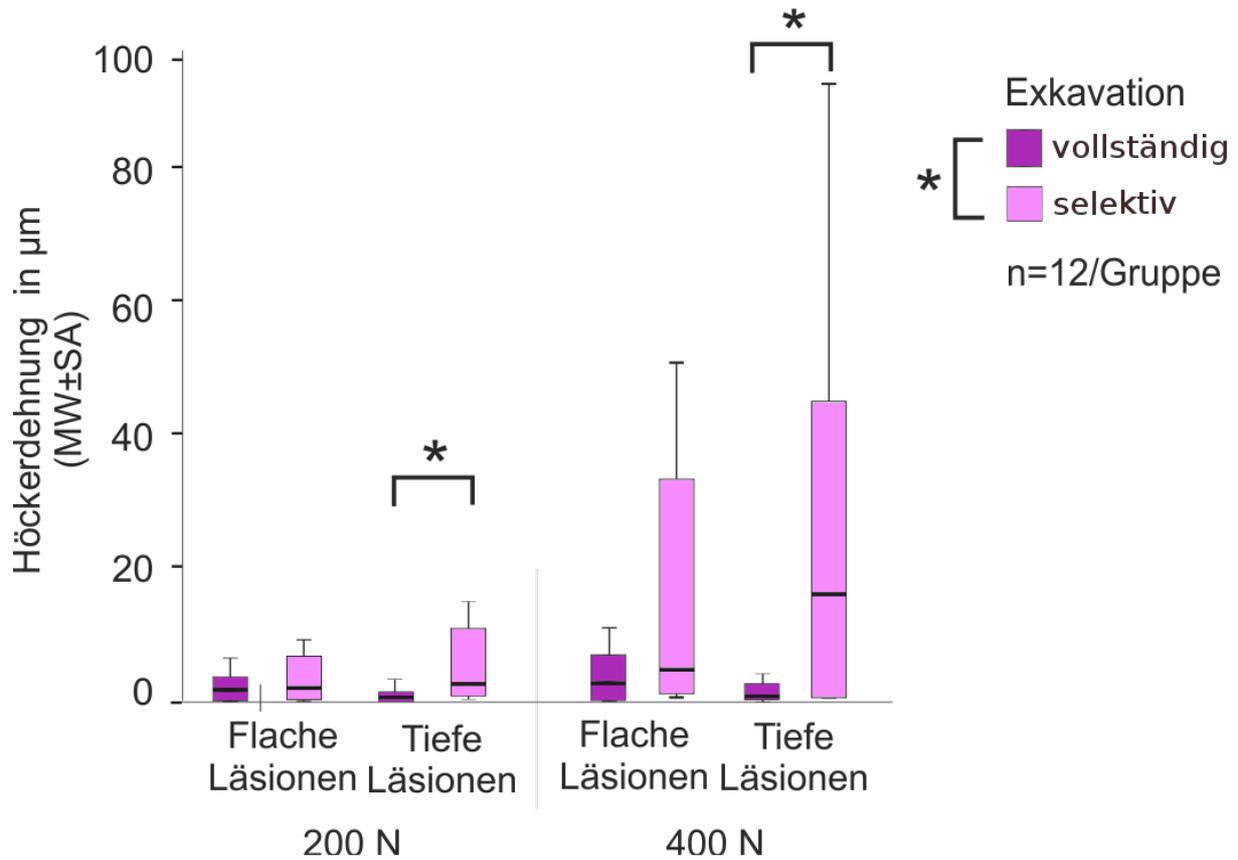


Abb. 15 – Höckerdehnung von Zähnen bei statischen Belastungen von 200 N (links) und 400 N (rechts). Dargestellt ist die Höckerdehnung bei statischer Belastung von Zähnen mit selektiv exkavierten tiefen und flachen Läsionen (rosa) und vollständiger Exkavation (magenta) (n = 12/Gruppe). Die farbigen Boxen entsprechen dem Bereich in dem die mittleren 50 % der Daten liegen. Der Querstrich in der Box stellt den Mittelwert dar. Mit den Antennen („Whiskers“) ist das Minimum und Maximum angegeben. Statistisch signifikante Unterschiede zwischen den Gruppen sind durch einen Stern angezeigt (\*  $p \leq 0,05$ ; Mann-Whitney-U-Test).

## 5 Diskussion

### 5.1 Diskussion von Material und Methoden

Für die Versuche wurden extrahierte Prämolaren aus verschiedenen Zahnarztpraxen gesammelt. Da es sich um karies- und restaurationsfreie Prämolaren handelt, stammen die meisten Zähne vermutlich von jüngeren Patienten. Hierüber gibt es jedoch keine genauen Aufzeichnungen. So können Unterschiede in der Mikro- und Makromorphologie als auch die Gruppengröße von  $n = 12$  ursächlich für die Varianz der Frakturresistenz innerhalb derselben Gruppen sein.

Nach der Extraktion und zwischen den Arbeitsschritten wurden die Probenzähne in 0,1 %igem Thymol gelagert. Thymol ist ein Phenolderivat und hat bakterizide und bakteriostatische Wirkung. Studien ergaben, dass Thymol keine negativen Auswirkungen auf die Haftung von Komposit am Schmelz hat (56). Somit scheint die Lagerung der Zähne in 0,1 %igem Thymol eine gute Möglichkeit zu sein, die Zähne vor dem Austrocknen zu schützen.

Zur besseren Handhabung wurden die Zähne mit einem Akrylharz in ein Stahlrohr eingebettet. Damit wurde die natürliche Eigenbeweglichkeit der Zähne nicht nachgestellt. Die Zähne waren lediglich durch die Elastizität des Akrylharzes beweglich. In zukünftigen Studien könnte die Simulation klinischer Bedingungen verbessert werden, indem man eine künstliche Parodontalmembran aus Kunststoff um die Zähne legt, bevor man sie einbettet (57, 58).

Im weiteren Versuchsablauf wurde eine Standardpräparation erstellt und diese dann mithilfe des Kopierschleifers auf die Probenzähne übertragen. Die Standardpräparation entsprach einer mesial-distal-okklusalen Kavität. Da alle Versuchszähne kariesfrei waren, konnte die Präparation problemlos übertragen werden. Alle Zähne wiesen nach der Präparation den gleichen Zahnhartsubstanzverlust auf, sodass eine Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse gewährleistet war. Die Präparation wies keine unterschneidigen Stellen auf. In der Praxis würde es wohl unterschneidige Bereiche geben, wenn möglichst substanzschonend präpariert werden würde. Um den Vorgang der Präparation möglichst praxisnah durchzuführen, wurde die Präparation ebenso wie beim Patienten mit mittel- und feinkörnigen Diamanten und unter Wasserkühlung durchgeführt.

Im Anschluss an die Präparation wurden an den pulpoaxialen Wänden künstliche Läsionen erzeugt. Diese Läsionslokalisation wurde gewählt, da bei Prämolaren häufig die Approximalfächen von Karies betroffen sind (59). Unsere Versuchsergebnisse lassen sich demnach nicht auf Molaren übertragen, da hier Läsionen oftmals auch an Okklusalfächen (gerade bei jungen Patienten) auftreten (60).

Die Läsionen an den Zähnen wurden künstlich mit Demineralisationslösungen erzeugt und unterscheiden sich von natürlichen Läsionen. Tiefe künstliche Läsionen zeigten einen ausgedehnten Mineralverlust im Vergleich zu natürlichen Läsionen (61). Im Vergleich zu den tiefen künstlichen Läsionen zeigten die flachen künstlichen Läsionen nur einen sehr begrenzten Mineralverlust. Das Belassen der tiefen, künstlich erzeugten Läsionen kann daher als ultra-konservative Exkavation angesehen werden (62). Im Gegensatz dazu stellt das Belassen der künstlich erzeugten Läsionen mit dem geringen Mineralverlust eine Minimalform der selektiven Exkavation dar. Im Rahmen dieses *In-vitro*-Versuchs wurde die natürliche Reaktion der Pulpa auf die entstandene bzw. versiegelte Karies nicht nachgestellt. Somit kam es nicht zur Ausbildung von Tertiärdentin als Schutzschicht für die Pulpa. In der Praxis hofft man jedoch genau auf diesen Vorgang. Da man davon ausgeht, dass kariöses Dentin weicher ist als gesundes Dentin (63), würde zusätzliches Tertiärdentin vermutlich die mechanischen Eigenschaften des Zahnes verbessern. Trotz dieser Unterschiede und Nachteile wurden die Läsionen durch künstliche Demineralisation hergestellt, da anhand dieser Methode vergleichbare und gut steuerbare Läsionen im Dentin erzeugt werden können (64, 65).

Die Varianz des gemessenen Mineralverlustes und der Läsionstiefen innerhalb desselben Demineralisationsschemas kann methodisch begründet werden: Für exakte mikroradiografische Messungen müssen Proben genau senkrecht zur Läsion präpariert werden. Dies ist in der Praxis aufgrund der unterschiedlichen Form der Zähne schwierig umzusetzen, sodass unterschiedliche Präparationswinkel zu Verzerrungen der Messergebnisse geführt haben könnten.

Nach der Herstellung der künstlichen Läsionen wurde die eine Hälfte der Probenzähne mit einem Handexkavator „komplett“ exkaviert. Als Kriterium für die vollständige Exkavation wurde dabei die Härte des Dentins verwendet, die jedoch subjektiv ist. Obwohl dieses Kriterium nur eingeschränkt zuverlässig reproduzierbar ist, wird es oft in klinischen Studien angewendet (22).

Es wurde das Etch- and Rinse-Bondingsystem Optibond FL verwendet. Dieses zeichnet sich durch hohe und zuverlässige Haftwerte aus und kommt daher häufig in Studien zur Anwendung (66). Ein Nachteil dieses Systems im Gegensatz zu anderen (z.B. selbstätzenden Systemen) ist seine Anfälligkeit für Behandlerfehler wie Überätzen und Übertrocknen. Deshalb wurden alle Arbeitsschritte genau nach Herstellerangaben und nur durch einen Behandler durchgeführt. Das Ätzelgel wurde für 15 s auf die Kavität appliziert und sorgfältig für 30 s abgesprüht. Nach dieser Zeit geht man davon aus, dass alle Präzipitate entfernt wurden. Überätzungen könnten den Verbund zwischen Dentin und Komposit negativ beeinflussen, da das Kollagennetzwerk tief demineralisiert und oft nicht vollständig durch den Primer penetriert wird. Es kommt dann zur Hydrolyse der nicht von Primer umgebenen demineralisierten Kollagenfasern. Dies könnte zu Randundichtigkeiten und Hypersensibilitäten führen (67). Nach dem weiteren Konditionieren des Zahnes mittels Primer und Bonding wurde das Komposit mittels der Inkrementtechnik eingebracht. Die einzelnen Schichten sollten dabei nicht dicker als 2 mm sein, damit das Licht zum Auspolymerisieren die gesamte Schicht durchdringen kann. Des Weiteren wurde darauf geachtet, dass die einzelnen Inkremente eine möglichst große freie Oberfläche hatten. Dadurch sollte der durch die Schrumpfung entstehende Stress so klein wie möglich gehalten und der Haftverbund zum Dentin weniger belastet werden (45).

Im Anschluss wurden die Zähne im Kausimulator belastet. Im Mund werden die Zähne im Rahmen der Mastikation, aber auch beim Schlucken und Sprechen belastet. Klinische Studien schätzen, dass Zähne im Jahr ca. 250.000 Kauzyklen ausgesetzt sind (68, 69). Um eine Belastung von fünf Jahren zu simulieren, wurden die Probenzähne für  $1,2 \times 10^6$  Kauzyklen belastet. Diese Zyklenzahl wird in vielen *In-vitro*-Studien eingesetzt (51, 58, 70). Zu beachten ist, dass im Kausimulator nichtphysiologische Kräfte, die zum Beispiel beim Bruxismus entstehen und Zähne übermäßig beanspruchen, nicht berücksichtigt werden. Um die Kaubewegung möglichst natürlich nachzustellen, wurde die Belastung mit einer Abgleitbewegung durchgeführt.

Im Patientenmund sind Zähne durch die Aufnahme von kalten und heißen Speisen ständigen Temperaturschwankungen ausgesetzt. Daher wurden die Probenzähne 10.000 Thermowechselbelastungszyklen unterworfen. Dies entspricht ungefähr der Alterung von einem Jahr (71). Bei der Thermowechselbelastung sind die Zähne einem ständigen Wechsel von heiß und kalt ausgesetzt. Da die Zähne und das Restaurationsmaterial unterschiedliche Wärmeausdehnungskoeffizienten besitzen,

entstehen durch den ständigen Temperaturwechsel Spannungen an der Grenze zwischen Zahn und Restauration. Durch diese mechanische Belastung kann es zu Haftverlusten im Randbereich kommen, die in einer Randspaltbildung resultieren (72). Es gibt allerdings auch Studien, die die Bedeutung der unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten bezweifeln (73-75).

Zur Bestimmung der Bruchfestigkeit wurden die Probenzähne in eine Material-Prüfmaschine eingespannt und dann von okklusal zentral in axialer Richtung belastet. Diese Art der Belastung wurde bereits in vielen anderen Studien verwendet (76-78) und entspricht auch der physiologischen Belastung beim Kauen, wobei der vestibuläre Höcker der unteren Prämolaren zentral in die oberen Prämolaren greift. Damit die Probenzähne nicht nur punktuell belastet werden, wurde eine Zinnfolie zwischen den Druckstempel und die Okklusalfäche gelegt, die die Kraft gleichmäßig verteilte (52). Der Nachteil solcher Bruchfestigkeitsversuche ist, dass individuelle Aspekte beim Kauen oder auch Parafunktionen nicht berücksichtigt werden. Außerdem sind unter physiologischen Bedingungen solch hohe Kräfte nur für kurze Zeit wirksam (77).

Zur Ermittlung der Auslenkung der Höcker bei Belastung wurden zusätzlich zwei Messuhren auf Höhe des Äquators von vestibulär und palatinal an den Probenzähnen positioniert. Bei Kräften von 200 N und 400 N wurden dann die Auslenkungen abgelesen. Hierbei handelt es sich um eine sehr techniksensitive Methode. Ein möglicher Fehler, der auftreten kann ist die Intrusion des Zahnes durch den Druck von okklusal, sodass die Messuhren dadurch keine sicheren Werte aufzeichnen können. Weitere Schwierigkeiten bestanden in der Positionierung der Messfühler. Gemessen werden sollte die Höckerdehnung auf Höhe des Zahnäquators. Um eine Auflagefläche für die Messfühler zu schaffen wurden zuvor kleine Flächen in Höhe des Äquators präpariert. Zur weiteren Aufklärung der mechanischen Eigenschaften selektiv exkavierter Zähne sollten Finite-Elemente oder andere interferometrische Analysen durchgeführt werden.

## 5.2 Diskussion der Ergebnisse

### 5.2.1 Frakturbeständigkeit

Unsere Versuche konnten keinen signifikanten Unterschied in der Frakturbeständigkeit von selektiv und vollständig exkavierten Zähnen nachweisen, wobei dies sowohl auf Zähne mit tiefen als auch auf Zähne mit flachen Läsionen zutraf. Jedoch zeigten Zähne mit belassenen Läsionen eine leicht reduzierte Frakturbeständigkeit (-13 %). Mit einer größeren Fallzahl (wir schätzten 86 Zähne) wären diese Unterschiede auch mit statistischer Signifikanz nachzuweisen. Unklar bleibt, ob diese Unterschiede klinisch relevant sind.

In einer anderen Studie zeigte sich im Gegensatz zu unseren Versuchen eine signifikant verringerte Frakturbeständigkeit bei selektiv im Vergleich mit vollständig exkavierten Zähnen (41). Ein wesentlicher Unterschied zwischen diesen beiden Studien ist die Lage der Läsion. In der angeführten Studie befanden sich die Läsionen okklusal, während sie sich bei unserer Studie an den pulpo-axialen Wänden befanden. In unseren Versuchen wurden Prämolaren verwendet, während in der anderen Studie Molaren eingesetzt wurden. Wir wählten für die Lage der Läsionen die pulpo-axialen Wände, da es bei Prämolaren häufiger zur Entstehung von Approximalkaries als von Okklusalkaries kommt (59). In beiden Studien wurden die Zähne von okklusal belastet. Somit gab es bei beiden Studien auch einen Unterschied hinsichtlich der Belastungsrichtung der Läsion. So erfolgte die Belastung bei Zähnen mit okklusalen Läsionen senkrecht auf das kariöse Dentin; die Restauration frakturierte demnach „in“ die Läsion hinein. In unserer Studie hingegen erfolgte die Belastung nicht senkrecht, sondern entlang der Läsionen, die sich an den pulpo-axialen Wänden befanden. Die Restauration war gegen von okklusal eintreffende Kräfte durch intaktes Dentin in den approximalen Kästen geschützt. (Abb. 16). Durch die Belastung von okklusal entstanden in unserer Studie Scherkräfte an den Flächen zwischen Läsion und Restauration, da der von okklusal ausgeübte Druck in Zugkräfte umgewandelt wird, die entlang der Pulpawände wirken. Dies führte in einigen Fällen zum Herausplatzen von Restaurationsanteilen aus den Kästen.

Abschließend lässt sich sagen, dass das Versagen der Zähne bei niedrigeren Kräften unter Umständen für ihren Erhalt von Vorteil sein kann, da eine Nachbehandlung und ein Erhalt der Zähne ermöglicht würde. Dennoch ist es ungewiss, ob Patienten kleine Abplatzungen des Zahnschmelzes oder kleine Frakturen innerhalb der Restauration

bemerken und sich daraufhin behandeln lassen würden. Denn nur dann kann der Schaden leicht behoben und verhindert werden, dass Folgeschäden entstehen.

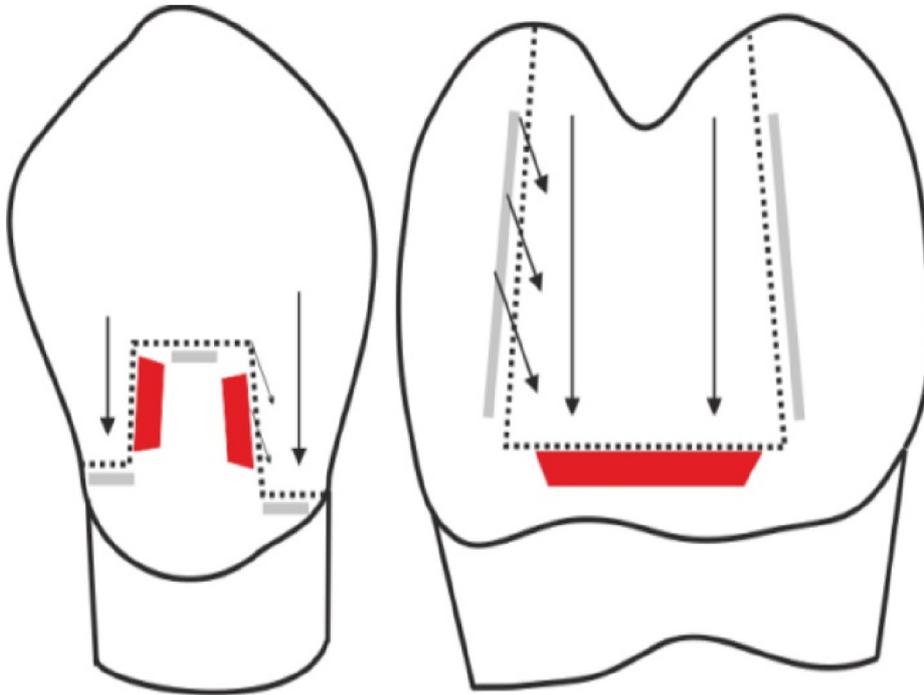


Abb. 16 - Darstellung der unterschiedlichen Auswirkung der okklusalen Belastung von Prämolaren mit approximalen und Molaren mit okkusal belassenen Läsionen. Abbildung aus (79).

Bei Prämolaren scheint die Restauration durch intaktes Dentin in den approximalen Kästen (grau) geschützt. Der Haftverbund zwischen Zahn und Läsion (rot) scheint eingeschränkt zu sein, sodass es zum Herausplatzen von Restorationsanteilen aus dem Kasten kam. Bei Molaren mit okklusaler Läsion (rot) erfolgt die Belastung direkt auf die Läsion und es kam zu Frakturen „in“ die Läsion hinein (41).

### 5.2.2 Höckerdehnung

Im Gegensatz zu der Frakturbeständigkeit war die Höckerdehnung signifikant erhöht bei Zähnen mit selektiver Exkavation im Vergleich zu den Zähnen mit vollständiger Exkavation. Ein Grund hierfür könnte die reduzierte Haftkraft des Adhäsivsystems an der demineralisierten Fläche sein. Normalerweise stabilisieren adhäsive Restaurationen Zähne mit großem Substanzdefekt (76). Es ist anzunehmen, dass bei den Probenzähnen, an deren axialen Wänden sich noch demineralisiertes Dentin befand, diese Stabilisierung fehlte. Durch den eingeschränkten Haftverbund kam es dann möglicherweise zu einer erhöhten Höckerdehnung. Durch diese Höckerdehnung könnte es im weiteren Verlauf zu Stress im Randbereich der Restauration gekommen sein und letztendlich auch dazu, dass sich der Klebeverbund zwischen Zahn und Restauration

gelöst hat. Daraus resultierende Randspalten werden als Risikofaktor für die Entstehung von Sekundärkaries gesehen. Sekundärkaries wiederum ist langfristig dann die Ursache für das Versagen von Restaurationen. In einer Studie wurde jedoch gezeigt, dass es keinen Unterschied zwischen selektiv und vollständig exkavierten Zähnen hinsichtlich der Randintegrität gibt (80).

Unabhängig davon, ob das demineralisierte Dentin belassen oder exkaviert wurde, traten bei Zähnen mit flachen Läsionen signifikant mehr fatale Frakturen auf, die zur Extraktion des Zahnes führen würden, als bei Zähnen mit tiefen Läsionen. So zeigten sich viele vertikale und vertikal-schräge Frakturen sowie tiefe Abplatzungen der Höcker bei Zähnen mit flachen Läsionen. Im Gegensatz dazu kam es bei den Zähnen mit den tiefen Läsionen unabhängig davon, ob demineralisiertes Dentin belassen oder exkaviert wurde, zu Restorationsabplatzungen im Randbereich oder an den approximalen Kästen. Bei den Zähnen mit den tiefen belassenen Läsionen ist die Restauration durch das tiefe weiche darunterliegende Dentin nicht ausreichend unterstützt und es kommt eher zum Versagen der Restauration. Ebenso kommt es bei Zähnen mit den vollständig exkavierten tiefen Läsionen zum Versagen der Restauration, da diese durch ihr großes Volumen bei der Polymerisation schrumpft. Die Zähne mit den flachen Läsionen scheinen diesen Kräften standzuhalten und erst bei signifikant höheren Belastungen zu brechen. Die Restaurationen sind hier kleiner als bei den Zähnen mit den tiefen Läsionen. Daher kommt es wohl bei der Polymerisation zu weniger Schrumpfstress und die Restauration bleibt stabiler. Daher versagen die Zähne erst bei höheren Belastungen, versagen dann aber meist innerhalb der Zahnhartsubstanz und nicht innerhalb der Restauration. Dadurch kommt es häufiger zu irreparablen Frakturen.

### **5.3 Schlussfolgerungen**

Die Versuche belegen, dass es keinen signifikanten Unterschied der Frakturbeständigkeit von Zähnen mit und ohne belassenem demineralisiertem Dentin unterhalb der Restauration gibt. Selektiv exkavierte Zähne zeigten jedoch eine tendenziell reduzierte Frakturbeständigkeit, deren klinische Relevanz jedoch unklar bleibt. Hingegen scheinen andere Faktoren, wie die Tiefe der zu behandelnden Läsionen, einen signifikanten Einfluss auf die Frakturbeständigkeit zu haben. So zeigten

Zähne mit tiefen Läsionen unabhängig davon, ob vollständig oder selektiv exkaviert wurde, eine geringere Frakturbeständigkeit als Zähne mit flachen Läsionen.

Die Studie zeigte auch, dass es bei Zähnen mit flachen Läsionen keinen Unterschied hinsichtlich der Höckerdehnung gibt, unabhängig davon, ob vollständig oder selektiv exkaviert wurde. Bei Zähnen mit selektiv exkavierten tiefen Läsionen zeigte sich eine signifikant erhöhte Höckerdehnung im Vergleich zu Zähnen mit vollständig exkavierten tiefen Läsionen. Die Auswirkung dieser erhöhten Höckerdehnung auf die Randintegrität sollte in weiterführenden Studien untersucht werden.

Innerhalb der Limitation dieser *In-vitro*-Studie lässt sich schlussfolgern, dass selektiv exkavierte Prämolaren nicht notwendigerweise geringere Frakturresistenzen aufweisen als vollständig exkavierte Prämolaren.

## 6 Literaturverzeichnis

1. Schwendicke F, Kern M, Meyer-Lueckel H, Boels A, Doerfer C, Paris S. Fracture resistance and cuspal deflection of incompletely excavated teeth. *J Dent.* 2014;42:107-13.
2. Cleaton-Jones P, Hargreaves JA, Fatti LP, Chandler HD, Grossman ES. Dental caries diagnosis calibration for clinical field surveys. *Caries Res.* 1989;23:195-9.
3. Miller WD. Textbook of conservative dentistry: 2nd ed. Leipzig: Thieme; 1889.
4. König K. Karies und Kariesprophylaxe: München: Goldmann; 1971.
5. Loesche WJ. Role of *Streptococcus mutans* in human dental decay. *Microbiol Rev.* 1986;50:353-80.
6. Marsh PD, Martin M. *Orale Mikrobiologie.* Marsh PD, Martin M, editors. Stuttgart, Deutschland: Georg Thieme Verlag; 2003. 223 p.
7. Fejerskov O. Changing paradigms in concepts on dental caries: consequences for oral health care. *Caries Res.* 2004;38:182-91.
8. Marsh PD. Microbial ecology of dental plaque and its significance in health and disease. *Adv Dent Res.* 1994;8:263-71.
9. Fejerskov M. Risk assessment in dental caries; in J. Bader, (ed), *Risk assessment in dentistry* 1990. 215-17 p.
10. ten Cate JM, Featherstone JD. Mechanistic aspects of the interactions between fluoride and dental enamel. *Crit Rev Oral Biol Med.* 1991;2:283-96.
11. Featherstone JD. Prevention and reversal of dental caries: role of low level fluoride. *Community Dent Oral Epidemiol.* 1999;27:31-40.
12. Meyer-Lueckel H, Bitter K, Paris S. Randomized controlled clinical trial on proximal caries infiltration: three-year follow-up. *Caries Res.* 2012;46:544-8.
13. Paris S, Meyer-Lueckel H, Kielbassa AM. Resin infiltration of natural caries lesions. *J Dent Res.* 2007;86:662-6.
14. Yengopal V, Mickenautsch S, Bezerra AC, Leal SC. Caries-preventive effect of glass ionomer and resin-based fissure sealants on permanent teeth: a meta analysis. *J Oral Sci.* 2009;51:373-82.
15. Mickenautsch S, Yengopal V. Validity of sealant retention as surrogate for caries prevention - a systematic review. *PLoS One.* 2013;8:e77103.
16. Carvalho JC. Caries process on occlusal surfaces: evolving evidence and understanding. *Caries Res.* 2014;48:339-46.
17. Bjorndal L, Larsen T, Thylstrup A. A clinical and microbiological study of deep carious lesions during stepwise excavation using long treatment intervals. *Caries Res.* 1997;31:411-7.
18. Bjorndal L, Larsen T. Changes in the cultivable flora in deep carious lesions following a stepwise excavation procedure. *Caries Res.* 2000;34:502-8.
19. Schwendicke F, Doerfer CE, Paris S. Incomplete caries removal: a systematic review and meta-analysis. *J Dent Res.* 2013;92:306-14.
20. Lager A, Thornqvist E, Ericson D. Cultivable bacteria in dentine after caries excavation using rose-bur or carisolv. *Caries Res.* 2003;37:206-11.
21. Shovelton DS. Studies of dentine and pulp in deep caries. *Int Dent J.* 1970;20:283-96.
22. Schwendicke F, Meyer-Lueckel H, Doerfer C, Paris S. Attitudes and behaviour regarding deep dentin caries removal: a survey among German dentists. *Caries Res.* 2013;47:566-73.

23. Fusayama T, Terachima S. Differentiation of two layers of carious dentin by staining. *J Dent Res.* 1972;51:866.
24. Ogushi K, Fusayama T. Electron microscopic structure of the two layers of carious dentin. *J Dent Res.* 1975;54:1019-26.
25. Fusayama T, Okuse K, Hosoda H. Relationship between hardness, discoloration, and microbial invasion in carious dentin. *J Dent Res.* 1966;45:1033-46.
26. Leksell E, Ridell K, Cvek M, Mejare I. Pulp exposure after stepwise versus direct complete excavation of deep carious lesions in young posterior permanent teeth. *Endod Dent Traumatol.* 1996;12:192-6.
27. Reeh ES, Messer HH, Douglas WH. Reduction in tooth stiffness as a result of endodontic and restorative procedures. *J Endod.* 1989;15:512-6.
28. Randow K, Glantz PO. On cantilever loading of vital and non-vital teeth. An experimental clinical study. *Acta Odontol Scand.* 1986;44:271-7.
29. Kreulen CM, de Soet JJ, Weerheijm KL, van Amerongen WE. In vivo cariostatic effect of resin modified glass ionomer cement and amalgam on dentine. *Caries Res.* 1997;31:384-9.
30. Maltz M, de Oliveira EF, Fontanella V, Bianchi R. A clinical, microbiologic, and radiographic study of deep caries lesions after incomplete caries removal. *Quintessence Int.* 2002;33:151-9.
31. Bjorndal L, Thylstrup A. A practice-based study on stepwise excavation of deep carious lesions in permanent teeth: a 1-year follow-up study. *Community Dent Oral Epidemiol.* 1998;26:122-8.
32. Weerheijm KL, Kreulen CM, de Soet JJ, Groen HJ, van Amerongen WE. Bacterial counts in carious dentine under restorations: 2-year in vivo effects. *Caries Res.* 1999;33:130-4.
33. Paddick JS, Brailsford SR, Kidd EA, Beighton D. Phenotypic and genotypic selection of microbiota surviving under dental restorations. *Appl Environ Microbiol.* 2005;71:2467-72.
34. Bakhshandeh A, Qvist V, Ekstrand KR. Sealing occlusal caries lesions in adults referred for restorative treatment: 2-3 years of follow-up. *Clin Oral Investig.* 2012;16:521-9.
35. Hesse D, Bonifacio CC, Mendes FM, Braga MM, Imparato JC, Raggio DP. Sealing versus partial caries removal in primary molars: a randomized clinical trial. *BMC Oral Health.* 2014;14:58.
36. 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;24:211-4.
37. Bjorndal L, Reit C, Bruun G, Markvart M, Kjaeldgaard M, Nasman P, Thordrup M, Dige I, Nyvad B, Fransson H, Lager A, Ericson D, Petersson K, Olsson J, Santimano EM, Wennstrom A, Winkel P, Gluud C. Treatment of deep caries lesions in adults: randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. *Eur J Oral Sci.* 2010;118:290-7.
38. 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.
39. Schwendicke F, Meyer-Lueckel H, Doerfer C, Paris S. Failure of incompletely excavated teeth--a systematic review. *J Dent.* 2013;41:569-80.
40. Yoshiyama M, Tay FR, Doi J, Nishitani Y, Yamada T, Ito K, Carvalho RM, Nakajima M, Pashley DH. Bonding of self-etch and total-etch adhesives to carious dentin. *J Dent Res.* 2002;81:556-60.

41. 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.
42. Ismail AI, Sohn W, Tellez M, Amaya A, Sen A, Hasson H, Pitts NB. The International Caries Detection and Assessment System (ICDAS): an integrated system for measuring dental caries. *Community Dent Oral Epidemiol.* 2007;35:170-8.
43. Mertz-Fairhurst EJ, Curtis JW, Ergle JW, Rueggeberg FA, Adair SM. Ultraconservative and cariostatic sealed restorations: results at year 10. *J Am Dent Assoc.* 1998;129:55-66.
44. Segura A, Donly KJ. In vitro posterior composite polymerization recovery following hygroscopic expansion. *J Oral Rehabil.* 1993;20:495-9.
45. Feilzer AJ, De Gee AJ, Davidson CL. Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res.* 1987;66:1636-9.
46. Rueggeberg FA, Margeson DH. The effect of oxygen inhibition on an unfilled/filled composite system. *J Dent Res.* 1990;69:1652-8.
47. Barreto MS, Moraes Rdo A, Rosa RA, Moreira CH, So MV, Bier CA. Vertical root fractures and dentin defects: effects of root canal preparation, filling, and mechanical cycling. *J Endod.* 2012;38:1135-9.
48. Lodovici E, Reis A, Geraldeli S, Ferracane JL, Ballester RY, Rodrigues Filho LE. Does adhesive thickness affect resin-dentin bond strength after thermal/load cycling? *Oper Dent.* 2009;34:58-64.
49. Lehmann F, Eickemeyer G, Rammelsberg P. Fracture resistance of metal-free composite crowns-effects of fiber reinforcement, thermal cycling, and cementation technique. *J Prosthet Dent.* 2004;92:258-64.
50. Rosentritt M, Behr M, Gebhard R, Handel G. Influence of stress simulation parameters on the fracture strength of all-ceramic fixed-partial dentures. *Dent Mater.* 2006;22:176-82.
51. Kern M, Strub JR, Lu XY. Wear of composite resin veneering materials in a dual-axis chewing simulator. *J Oral Rehabil.* 1999;26:372-8.
52. Heydecke G, Butz F, Strub JR. Fracture strength and survival rate of endodontically treated maxillary incisors with approximal cavities after restoration with different post and core systems: an in-vitro study. *J Dent.* 2001;29:427-33.
53. Steiner M, Mitsias ME, Ludwig K, Kern M. In vitro evaluation of a mechanical testing chewing simulator. *Dent Mater.* 2009;25:494-9.
54. Shahin R, Kern M. Effect of air-abrasion on the retention of zirconia ceramic crowns luted with different cements before and after artificial aging. *Dent Mater.* 2010;26:922-8.
55. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics.* 1977;33:159-74.
56. Williams VD, Svare CW. The effect of five-year storage prior to bonding on enamel/composite bond strength. *J Dent Res.* 1985;64:151-4.
57. 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.
58. Kern M, Douglas WH, Fechtig T, Strub JR, DeLong R. Fracture strength of all-porcelain, resin-bonded bridges after testing in an artificial oral environment. *J Dent.* 1993;21:117-21.
59. Mejare I, Kallest I C, Stenlund H. Incidence and progression of approximal caries from 11 to 22 years of age in Sweden: A prospective radiographic study. *Caries Res.* 1999;33:93-100.

60. Broadbent JM, Foster Page LA, Thomson WM, Poulton R. Permanent dentition caries through the first half of life. *Br Dent J.* 2013;215:E12.
61. 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;49:259-65.
62. Ricketts D, Lamont T, Innes NP, Kidd E, Clarkson JE. Operative caries management in adults and children. *Cochrane Database Syst Rev.* 2013;3:CD003808.
63. Zheng L, Hilton JF, Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GW. Dentin caries activity status related to hardness and elasticity. *Eur J Oral Sci.* 2003;111:243-52.
64. Moron BM, Comar LP, Wiegand A, Buchalla W, Yu H, Buzalaf MA, Magalhaes AC. Different protocols to produce artificial dentine carious lesions in vitro and in situ: hardness and mineral content correlation. *Caries Res.* 2013;47:162-70.
65. Marquezan M, Correa FN, Sanabe ME, Rodrigues Filho LE, Hebling J, Guedes-Pinto AC, Mendes FM. Artificial methods of dentine caries induction: A hardness and morphological comparative study. *Arch Oral Biol.* 2009;54:1111-7.
66. Asmussen E, Peutzfeldt A. Short- and long-term bonding efficacy of a self-etching, one-step adhesive. *J Adhes Dent.* 2003;5:41-5.
67. 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.
68. DeLong R, Pintado M, Douglas WH. Measurement of change in surface contour by computer graphics. *Dent Mater.* 1985;1:27-30.
69. 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.
70. Strub JR, Beschnidt SM. Fracture strength of 5 different all-ceramic crown systems. *Int J Prosthodont.* 1998;11:602-9.
71. Gale MS, Darvell BW. Thermal cycling procedures for laboratory testing of dental restorations. *J Dent.* 1999;27:89-99.
72. Bullard RH, Leinfelder KF, Russell CM. Effect of coefficient of thermal expansion on microleakage. *J Am Dent Assoc.* 1988;116:871-4.
73. Rossomando KJ, Wendt SL. Thermocycling and dwell times in microleakage evaluation for bonded restorations. *Dent Mater.* 1995;11:47-51.
74. Wendt SL, McInnes PM, Dickinson GL. The effect of thermocycling in microleakage analysis. *Dent Mater.* 1992;8:181-4.
75. Pazinato FB, Campos BB, Costa LC, Atta MT. Effect of the number of thermocycles on microleakage of resin composite restorations. *Pesqui Odontol Bras.* 2003;17:337-41.
76. Bremer BD, Geurtsen W. Molar fracture resistance after adhesive restoration with ceramic inlays or resin-based composites. *Am J Dent.* 2001;14:216-20.
77. Esquivel-Upshaw JF, Anusavice KJ, Yang MC, Lee RB. Fracture resistance of all-ceramic and metal-ceramic inlays. *Int J Prosthodont.* 2001;14:109-14.
78. Brunton PA, Cattell P, Burke FJ, Wilson NH. Fracture resistance of teeth restored with onlays of three contemporary tooth-colored resin-bonded restorative materials. *J Prosthet Dent.* 1999;82:167-71.
79. Schwendicke F. *Selektive Kariesentfernung: Evidenz und Praxis – Chancen und Hürden [Habilitationsschrift].* Berlin: Medizinische Fakultät Charité - Universitätsmedizin Berlin; 2015.
80. Schwendicke F, Kern M, Blunck U, Dorfer C, Drenck J, Paris S. Marginal integrity and secondary caries of selectively excavated teeth in vitro. *J Dent.* 2014;42:1261-8.

## 7 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Annika Boels, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Untersuchung der Höckerdehnung und Frakturbeständigkeit an selektiv exkavierten Prämolaren“ 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](http://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

**Anteilserklärung an etwaigen erfolgten Publikationen**

Annika Boels hatte folgenden Anteil an den folgenden Publikationen:

Publikation 1:

Schwendicke, F., Kern, M., Meyer-Lueckel H., Boels, A., Doerfer, C., Paris, S., *Fracture resistance and cuspal deflection of incompletely excavated teeth*. J Dent, 2014. 42(2): p. 107-13.

Beitrag im Einzelnen (bitte kurz ausführen):

- Entwicklung und Durchführung des Versuchs
- Auswertung und Interpretation der Ergebnisse
- Mit-Verfassen des Manuskriptes

---

Unterschrift, Datum und Stempel des betreuenden Hochschullehrers

---

Unterschrift der Doktorandin

## **8 Lebenslauf**

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

## 9 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt PD Dr. Falk Schwendicke und Prof. Dr. Sebastian Paris aus der Abteilung für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin (Charité - Universitätsmedizin Berlin) für die Vergabe des interessanten Themas und PD Dr. F. Schwendicke für die engagierte Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung dieser Studie.

Mein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr. C. Dörfer, der als Direktor der Klinik für Zahnerhaltungskunde und Parodontologie (UKSH Kiel) das Umfeld für diese wissenschaftliche Arbeit zur Verfügung gestellt hat.

Herrn Prof. Dr. M. Kern danke ich dafür, dass ich die Gerätschaften der Klinik für zahnärztliche Prothetik, Propädeutik und Werkstoffkunde (UKSH Kiel) für die Durchführung meiner Versuche verwenden durfte. Ebenso danke ich Dr. Sebastian Wille, Rüdiger Möller und Frank Lehmann für die technische Begleitung des Projekts.

Frau Regina Marquardt danke ich herzlich für die Unterstützung bei der Herstellung der Proben für die transversale Mikroskopie.

Ein ganz besonderer Dank geht an meine Eltern, die mir das Studium der Zahnmedizin ermöglichten und mir auch während der Anfertigung der Doktorarbeit immerzu unterstützend und liebevoll zur Seite standen.

Abschließend möchte ich meinen Freunden und Kollegen für ihre Unterstützung danken. Vielen Dank: Katharina, Karolin, Carolin, Julia, Gunnar.

Schließlich möchte ich mich noch bei meinem Freund Kai bedanken, der mich immerzu motiviert und unterstützt hat. Danke!