

Aus dem
CharitéCentrum für Zahn- Mund- und Kieferheilkunde
Klinik für Zahnerhaltung und Präventivzahnmedizin
Direktor: Prof. Dr. Sebastian Paris

Habilitationsschrift

Selektive Kariesentfernung: Evidenz und Praxis – Chancen und Hürden

zur Erlangung der Lehrbefähigung
für das Fach Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde

vorgelegt dem Fakultätsrat der Medizinische Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Dr. med. dent. Falk Schwendicke

Eingereicht: Dezember 2014
Dekanin: Professor Dr. med. A. Grütters-Kieslich
1. Gutachter/in: Prof. Dr. med. dent. Reinhard HICKEL
2. Gutachter/in: Prof. Dr. med. dent. Elmar Hellwig

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
1.1. Kariesentfernung – Kariesmanagement	3
1.2. Therapieoptionen für tiefe Läsionen	5
1.3. Selektive Kariesentfernung.....	7
1.4. Fragestellungen.....	9
2. Eigene Arbeiten	11
2.1. Wirksamkeit unvollständiger Kariesentfernung: Eine systematische Übersicht und Meta-Analyse	11
2.2. Kostenwirksamkeit verschiedener Methoden zur Entfernung tiefer Karies.....	22
2.3. Entfernung tiefer Karies in der Praxis	31
2.4. Mechanische Eigenschaften unvollständig exkavierter Zähne <i>in vitro</i>	41
2.5. Integrität von und Kariesentwicklung an Restaurationsrändern bei selektiv und vollständig exkavierten Zähnen <i>in vitro</i>	50
2.6. Röntgenopake Markierung von Residualläsionen nach selektiver Exkavation	59
3. Diskussion	66
3.1. Evidenz und Praxis.....	66
3.2. Entfernung tiefer Karies – Chancen und Hürden	66
3.3. Ergebnisse der Studien	67
3.4. Ausblick.....	73
4. Zusammenfassung	75
5. Literaturangaben	77
Danksagung	89
Erklärung	90

1. Einleitung

1.1. Kariesentfernung – Kariesmanagement

Während der Rückgang der Karieserfahrung bei 12-Jährigen oftmals als Beleg für eine allgemein rückläufige Kariesprävalenz sowie einen generellen Erfolg zahnärztlicher Präventionsbemühungen angeführt wird (Eßer, 2013), wird dieser positive Trend nicht bei allen Bevölkerungsgruppen gleichermaßen beobachtet (Micheelis und Schiffner, 2006; Schiffner et al., 2009). Die zunehmende Polarisierung der Kariesverteilung (Marthaler et al., 1996; Marthaler, 2004; Micheelis und Schiffner, 2006; Pitts et al., 2002) führt zu einer Konzentration der Mehrzahl der kariösen, restaurierten oder fehlenden Zähne in wenigen, sozio-demografisch, -ökonomisch und geografisch benachteiligten Gruppen (Geyer et al., 2010; Pitts et al., 2011; Schwendicke et al., 2014e). Auch die Prävalenz tiefer unbehandelter Läsionen ist in diesen Bevölkerungsgruppen weiterhin hoch (Ridell et al., 2008). Der Behandlung gerade dieser Läsionen kommt in Anbetracht ihrer Prävalenz und Ungleichverteilung, vor allem aber vor dem Hintergrund der durch solche Läsionen beeinträchtigten Lebensqualität eine klinische, soziale und volkswirtschaftliche Bedeutung zu (Amorim et al., 2012; Decerle et al., 2013; Kramer et al., 2013; Leal et al., 2012; Levine et al., 2002; Monse et al., 2012).

Klassischerweise wird bei der Therapie kariöser Läsionen eine vollständige Entfernung allen infizierten und demineralisierten Dentins angestrebt, um anschließend eine Restauration des Zahnes mittels alloplastischer Materialien durchzuführen. Die Notwendigkeit einer solchen vollständigen Kariesentfernung wird jedoch zunehmend bezweifelt. So wurde gezeigt, dass eine vollständige Entfernung aller Mikroorganismen sowohl unter Zuhilfenahme klassischer Exkavationskriterien als auch etwaiger diagnostischer Hilfsmittel bei der Beurteilung des Exkavationsprozesses nicht möglich ist (Lager et al., 2003; Lennon et al., 2007; Lennon et al., 2009; Shovelton, 1970). Zudem wird der Sinn einer solchen angestrebten kompletten Beseitigung aller Bakterien hinterfragt: So wird Karies nicht mehr länger als Infektionserkrankung im Sinne der spezifischen Plaquehypothese (Keyes, 1960) verstanden, bei der ein bestimmter krankheitsverursachender Erreger vollständig zu entfernen ist, um eine Heilung herbeizuführen. Vielmehr wird angenommen, dass die Entstehung eines aktiven kariogenen (pathologischen) Biofilms das Resultat veränderter ökologischer Bedingungen, z. B. aufgrund einer häufigen Zufuhr fermentierbarer Kohlenhydrate, ist. Basierend auf dieser ökologischen Plaquehypothese (Marsh, 2006) ist nicht die Entfernung der Läsion als Symptom der Erkrankung, sondern die Kontrolle dieser Läsion bzw. der Biofilmaktivität das therapeutische Ziel. Eine reine Entfernung und der anschließende Ersatz des zuvor entfernten Gewebes hat demnach eher palliativen Charakter („Amputation“) und sollte nicht

als kausale Behandlung verstanden werden.

Gerade für nicht-kavitierte Läsionen sind zahlreiche Behandlungsstrategien erprobt und etabliert worden, die bewusst auf eine Entfernung der Läsion verzichten (Tellez et al., 2012): Diese non- oder mikro-invasiven Behandlungen zielen wie beschrieben auf die Kontrolle oder Beseitigung der für den Kariesprozess notwendigen Faktoren statt einer Entfernung der Läsion ab (Abb. 1). Eingebettet in ein solches kausales Therapiekonzept kommt der Kariesexkavation weniger eine „heilende“ als eine prozedurale Bedeutung zu: Exkaviert wird, um anschließend erfolgreich eine restaurative Therapie durchführen zu können, deren Ziel wiederum ist, die Biofilmkontrolle auf der Zahnoberfläche (wieder) zu gewährleisten (Schwendicke und Paris, 2014).

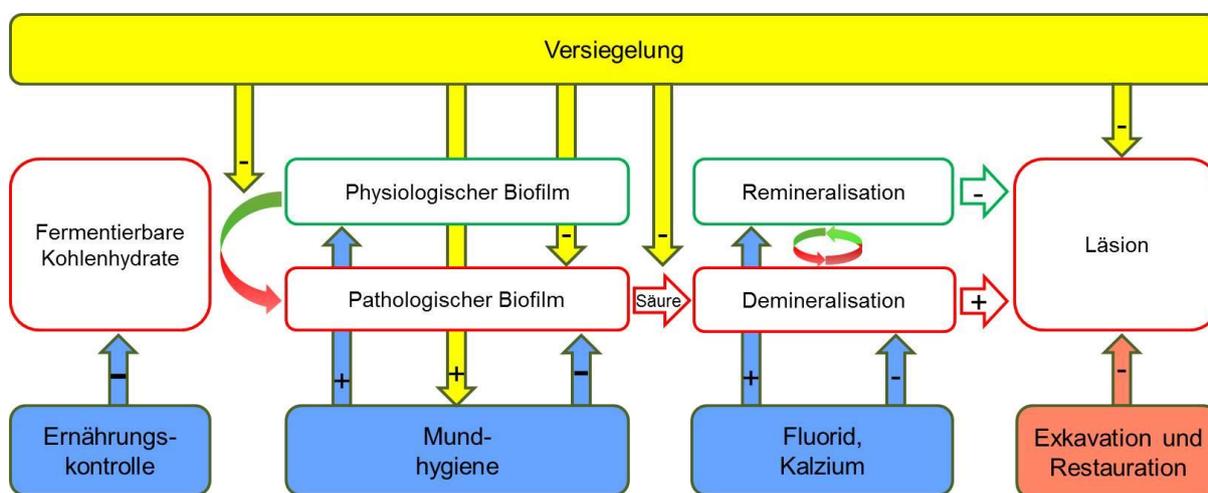


Abbildung 1: Entstehung einer kariösen Läsion und Therapieansätze. Durch übermäßige Zufuhr fermentierbarer Kohlenhydrate kommt es zur Umwandlung eines physiologischen in einen pathologischen Biofilm. Die darin vorherrschenden azidogenen und azidurischen Bakterien verstoffwechseln Nahrungskohlenhydrate zu organischen Säuren (Laktat, Butyrat, Azetat), wodurch Zahnhartsubstanz demineralisiert wird. Das Symptom dieser Demineralisation ist die kariöse Läsion. Non-invasive Therapieansätze (blau) zielen auf die Kontrolle der Kohlenhydratzufuhr (Ernährungsberatung), die Entfernung oder Maturationsbehinderung des Biofilms (Mundhygienemaßnahmen) oder die Demineralisationsbehinderung bzw. Remineralisationsförderung (z. B. mittels Fluoriden) ab. Mikro-invasive Strategien (gelb) umfassen präventive oder therapeutische Versiegelung oder Kariesinfiltration, wobei sowohl die Anlagerung und Maturation des Biofilms, die Demineralisation durch Säuren als auch die Kohlenhydratzufuhr zum Biofilm kontrolliert werden. Diese Maßnahmen werden als „mikro-invasiv“ bezeichnet, da bei der Behandlung der Oberfläche mittels Säuren geringe Mengen Zahnhartsubstanz entfernt werden. Für kavitierte Läsionen wird oftmals invasiv-restaurativ vorgegangen; dem Exkavationsprozess kommt dabei eine „vorbereitende“ Rolle für die anschließende Restauration zu (rot). Abbildung modifiziert nach Paris et al. (2012).

Mikro-invasive Maßnahmen nutzen dabei das Prinzip der Versiegelung, das erst mit dem Einzug adhäsiver Verfahren ermöglicht worden ist (Buonocore, 1970; Handelman et al., 1973). Dabei können sowohl intakte Zahnhartsubstanz (präventive Versiegelung) als auch

nicht-kavitierte und kavitierte Läsionen versiegelt werden (therapeutische oder Kariesversiegelung). Versiegelungen können dabei ganz unterschiedliche Wirkmechanismen haben, z. B. morphologische Veränderungen der Okklusalfäche, Diffusionsbarriere gegen Säuren oder Unterbrechung der Kohlenhydratzufuhr versiegelter Mikroorganismen (Abb. 2). Letzteres Prinzip erlaubt auch die Inaktivierung kavittierter kariöser Läsionen (Bjorndal et al., 1997; Bjorndal und Larsen, 2000; Handelman et al., 1973; Handelman et al., 1976; Handelman, 1982; van Amerongen et al., 2008).

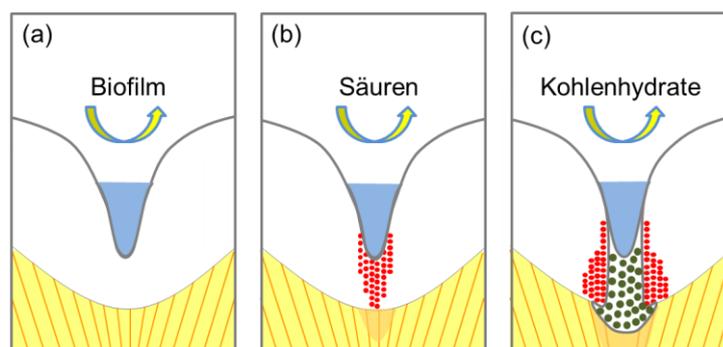


Abbildung 2: Wirkungsmechanismen von Versiegelungen. (a) Die prophylaktische (Fissuren-) Versiegelung wandelt plaqueretentive Areale, z. B. tiefe Fissuren oder Grübchen, in reinigungsfähige Bereiche um; die Ausbildung eines pathologischen Biofilms wird erschwert. Gleichzeitig wird die Zahnhartsubstanz vor Säuren aus dem bakteriellen Stoffwechsel geschützt (b). Letzterer Mechanismus ist vermutlich therapeutisch entscheidender (Carvalho, 2014; Mickenautsch and Yengopal, 2013; Yengopal et al., 2009). Das Prinzip der Versiegelung als Diffusionsbarriere gegen Säuren wird auch bei der Versiegelung von Schmelzkaries (rot) oder der Kariesinfiltration (Paris et al., 2007) genutzt. (c) Vor allem bei der Versiegelung kavittierter Läsionen wirkt die Diffusionsbarriere weniger gegen Säuren als gegen Nahrungskohlenhydrate: Die Nährstoffzufuhr der versiegelten Bakterien (dunkelgrün) wird unterbrochen und die versiegelte Läsion inaktiviert. Die Trennung zwischen den verschiedenen Wirkmechanismen ist ein theoretisches Konstrukt und klinisch nicht möglich, da verschiedene Wirkungen parallel zueinander auftreten.

Während prinzipiell auch die Arretierung kavittierter Läsionen mittels non- oder mikro-invasiver Maßnahmen möglich ist (Bakhshandeh et al., 2012; Gruythuysen, 2010; Hesse et al., 2014; Innes et al., 2011; Leal et al., 2013), wird die Exkavation gerade für tiefe Läsionen oftmals als notwendig erachtet, um die Menge des kariösen Dentins zu reduzieren und die Dichtigkeit und mechanische Stabilität der Versiegelung durch eine vorherige Hartgewebspräparation zu verbessern (Kidd, 2004; Ratledge et al., 2001). Eine zentrale Frage bleibt, wieviel kariöses Dentin während der Exkavation belassen werden kann.

1.2. Therapieoptionen für tiefe Läsionen

Gerade für tiefe Läsionen könnte der Verzicht auf eine vollständige Entfernung infizierter bzw. demineralisierter Zahnhartsubstanz vorteilhaft sein, da bei letzterer Behandlung oft eine Exposition der Pulpa erfolgt (Ricketts et al., 2013). Eine solche Exposition wird im bleibenden

Gebiss überwiegend mittels einer direkten Überkappung, also dem Abdecken des exponierten Pulpagewebes durch ein Medikament (z. B. Kalziumhydroxid), therapiert (Schwendicke et al., 2013d). Zahlreiche Studien zeigen jedoch, dass die Erfolgsraten direkter Überkappungen von Pulpen, die bei der Kariesexkavation eröffnet wurden, langfristig mäßig bis schlecht sind und die überwiegende Zahl der Zähne 5-10 Jahre nach der zur Exposition führenden Kariesentfernung wurzelkanalbehandelt oder extrahiert werden müssen (Aguilar und Linsuwanont, 2011; Schwendicke und Stolpe, 2014). Eine solche Pulpaexposition zu vermeiden, bedeutet demnach, Zähne und ihre Pulpaintegrität länger erhalten zu können, mögliche Schmerzen zu verhindern und Kosten für Nachbehandlungen zu reduzieren (Schwendicke et al., 2013e).

Man unterscheidet daher Ansätze einer ‚vollständigen‘ von denen einer ‚unvollständigen‘ Kariesexkavation (Tab. 1): Die (‚einzeitig‘) vollständige Kariesexkavation (engl. ‚*one-step complete excavation*‘) ist die beschriebene klassische Form der Kariesentfernung, die insbesondere bei tiefen Läsionen jedoch oft dazu führt, dass die Pulpa exponiert oder geschädigt wird (Dogan et al., 2013; Ricketts et al., 2013). Bei der schrittweisen (‚zweizeitigen‘) Kariesexkavation (engl. ‚*two-step excavation*‘) wird in einer ersten Sitzung nur peripher eine vollständige Exkavation angestrebt. In pulpanahen Bereichen wird bewusst erweichtes (kariöses) Dentin belassen und die Kavität zunächst temporär verschlossen. Hierdurch soll die Bildung von Reizdentin angeregt und eine Remineralisation des belassenen kariösen Dentins ermöglicht werden (Bjørndal et al., 1997; Bjørndal et al., 2010; Hayashi et al., 2011). Nach 3 bis 6 Monaten wird die Kavität erneut eröffnet und verbliebenes kariöses Gewebe (vollständig) entfernt, bis hartes, trockenes Dentin verbleibt. Klinische und mikrobiologische bzw. röntgenologische Untersuchungen konnten zeigen, dass belassenes pulpanahes kariöses Dentin zwischen den Behandlungsschritten härter wird und bakteriell inaktiviert bzw. remineralisiert (Alves et al., 2010; Bjørndal und Larsen, 2000; Bjørndal et al., 1997; Chibinski et al., 2013; Maltz et al., 2012). Dementsprechend wird im zweiten Behandlungsschritt in vielen Fällen nur wenig oder gar kein weiteres Dentin entfernt, auch um das Risiko der Pulpaschädigung zu reduzieren. Daher wird heute angezweifelt, ob der temporäre Verschluss der Kavität überhaupt notwendig ist oder die partiell exkavierte Kavität bereits in der ersten Sitzung definitiv versorgt werden kann (Kidd, 2004; Ricketts, 2001; Schwendicke und Paris, 2014). Dies ist das Ziel der selektiven (‚einzeitig-unvollständigen‘, ‚partiellen‘) Kariesexkavation (engl. ‚*one-step incomplete excavation*‘), bei der kariöses Hartgewebe nur peripher vollständig entfernt und in Pulpanähe (teilweise) belassen wird, wobei die Kavität dann sofort mit einer definitiven Restaurationen versorgt wird (Schwendicke et al., 2013a; Schwendicke und Paris, 2014). Eine solche ‚selektive Exkavation‘ wird, wenn nur direkt über der Pulpa eine dünne Schicht kariöses Dentin

belassen wird, auch als indirekte Überkappung bezeichnet (engl. ‚*indirect pulp treatment*‘) (Langeland und Langeland, 1968). Eine letzte, jedoch für kavitierte Läsionen nur wenig untersuchte Behandlungsmethode ist die reine Kariesversiegelung (engl. ‚*null-step excavation*‘ oder ‚*caries sealing*‘), bei der kariöses Dentin vollständig belassen und adhäsiv oder mittels Stahlkronen versiegelt wird (Bakhshandeh et al., 2012; Hesse et al., 2014; Innes et al., 2007; Innes et al., 2011).

Tabelle 1: Exkavationsmethoden für kavitierte kariöse Läsionen (Schwendicke und Paris, 2014).

,Vollständige‘ Entfernung kariösen Dentins		,Unvollständige‘ Entfernung kariösen Dentins		Keine Entfernung kariösen Dentins
Einzeitiges Vorgehen	Zweizeitiges Vorgehen	Einzeitiges Vorgehen	Einzeitiges Vorgehen	
Vollständige Exkavation 	Schrittweise Exkavation 	Selektive Exkavation 	Kariesversiegelung 	

Während bei der einzeitig-vollständigen Exkavation versucht wird, jegliches infiziertes und demineralisiertes Dentin auszuräumen, wird bei der schrittweisen (zweizeitigen) Exkavation pulpanahes kariöses Dentin zunächst belassen und eine Entfernung diesen Dentins erst in einem späteren Schritt angestrebt (gestrichelte Linie). Da bei diesem zweiten Exkavationsschritt das belassene kariöse Dentin oftmals hart und trocken ist, also Anzeichen einer Inaktivierung zeigt, wird im zweiten Schritt oft nur wenig oder gar nicht mehr exkaviert. Bei der selektiven (einzeitig-unvollständigen) Exkavation wird pulpanahes kariöses Dentin bewusst unter einer definitiven Restauration belassen. Bei der Kariesversiegelung, z. B. mittels Komposit oder wie hier mittels präformierter Stahlkronen, wird alles kariöse Dentin belassen und auf eine Exkavation vollständig verzichtet. Für kavitierte Läsionen ist diese Therapie bisher nur im Milchgebiss etabliert.

1.3. Selektive Kariesentfernung

Wie beschrieben, wird bei der selektiven Kariesentfernung kariöses Dentin peripher vollständig entfernt, in Pulpanähe belassen und die resultierende Kavität anschließend adhäsiv restauriert (Maltz et al., 2011). Klinisch ist dabei oftmals nur schwer zu quantifizieren, wieviel bzw. was für kariöses Dentin belassen wurde: Eine Unterscheidung zwischen infiziertem (engl. ‚*infected*‘), äußerem kariösen Dentin einerseits und gesundem oder zumindest remineralisierbarem (engl. ‚*affected*‘), innerem kariösen Dentin andererseits (Fusayama et al., 1966) ist schon aufgrund des graduellen Übergangs zwischen beiden Zonen nur schwer möglich (Abb. 3). Zudem erlauben subjektive Exkavationskriterien wie Härte, Farbe oder Feuchtigkeit des Dentins eine nur bedingt genaue und reproduzierbare

Beschreibung des Exkavationsergebnisses (Schwendicke et al., 2014e). Andere Verfahren, wie die Fluoreszenz-assistierte Exkavation, die chemo-mechanische Exkavation oder die Kariesentfernung mittels Polymerbohrern sind zwar objektiver, erlauben aber auch keine kontinuierliche Messung der Exkavation, so dass unklar bleibt, ob nur infiziertes oder auch bzw. wieviel remineralisierbares Dentin entfernt wird (Lennon, 2003; Lennon et al., 2006; Lennon et al., 2007; Lennon et al., 2009; Pugach et al., 2009; Schwendicke et al., 2014e).

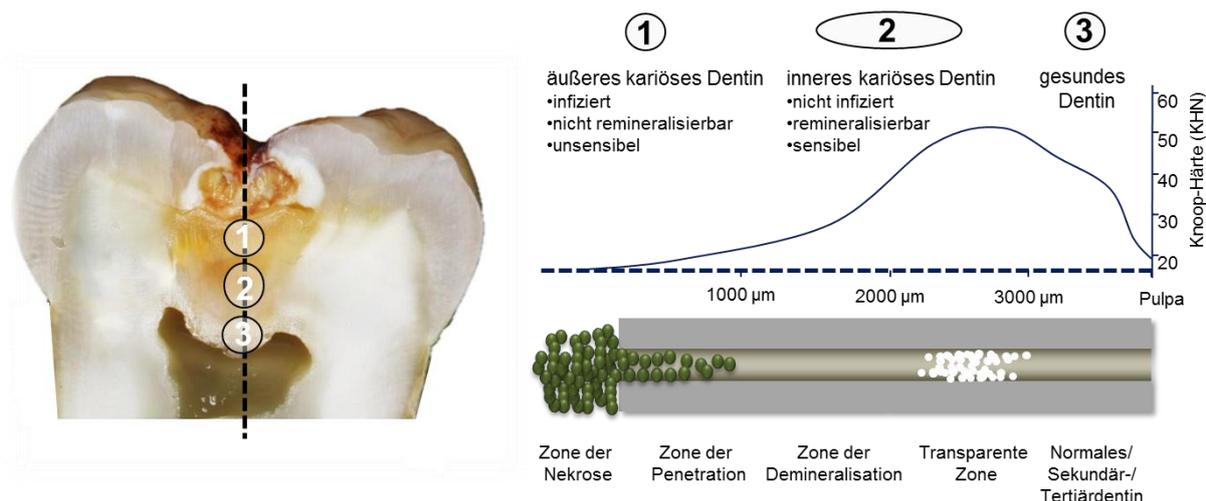


Abbildung 3: Histologischer Aufbau tiefer Dentinläsionen (modifiziert nach Ogawa et al. 1983). Dentinläsionen (links) lassen sich histologisch in verschiedene Zonen einteilen, wobei das äußere kariöse (engl. *„infected“*) Dentin (-1-) vom inneren kariösen Dentin (engl. *„affected“*, -2-) unterschieden wird. Der Mineralgehalt und die Härte des Dentins nehmen entlang der Läsion, ausgehend von der Zonen der Nekrose und Penetration, zu. Letztere beiden Zonen sind durch bakterielle Infektion gekennzeichnet (grün), wobei in der Zone der Nekrose das Dentin bereits proteolytisch zersetzt ist (engl. *„decomposed“*). Nach innen schließen sich die Zone der Demineralisation (engl. *„demineralised“*) und die transparente Zone an. Letztere zeichnet sich durch intratubuläre Akkumulation von Mineralien aus. In unmittelbarer Nähe zur Pulpa nimmt die Härte des Dentins wieder ab, da Tertiärdentin bzw. „Reizdentin“ gebildet wurde; vor allem letzteres ist weniger organisiert und hart als „gesundes“, regulär gebildetes Dentin. Eine zuverlässige, klinische Abgrenzung zwischen den Zonen ist mit den zur Zeit zur Verfügung stehenden Mitteln nicht möglich (Schwendicke et al., 2014e).

Daher ist bisher unklar, wie stark „selektiv“ exkaviert werden sollte bzw. welche Auswirkungen das Zurücklassen bestimmter Kariesmengen oder –qualitäten auf die Eigenschaften unvollständig exkavierter Zähne hat: So wird beispielsweise befürchtet, dass belassenes kariöses Dentin aufgrund seiner geringen Härte und seiner im Vergleich zu gesundem Dentin geringfügigeren mechanischen Unterstützung der Restauration zu mehr Restorationskomplifikationen, beispielweise Frakturen, führt (Hevinga et al., 2010). Auch wird angeführt, dass die Haftkräfte konventioneller Adhäsivsysteme an demineralisiertem und infiziertem Dentin reduziert sind (Yoshiyama et al., 2002). Dies könnte zu einem insgesamt geschwächten Haftverbund zwischen Zahn und Restauration führen und zusammen mit den beschriebenen mechanischen Einschränkungen die Randintegrität selektiv exkavierter Zähne nachteilig beeinflussen (Mertz-Fairhurst et al., 1998). Ein

eingeschränkter Haftverbund und eine geringe Randintegrität könnte langfristig das Restaurationsüberleben kompromittieren, aber auch ein Voranschreiten der versiegelten Läsion ermöglichen, da Nahrungskohlenhydrate bis in die Läsion penetrieren und kariogene Bakterien reaktiviert werden könnten (Hevinga et al., 2007). Eine solche Läsion wäre zudem weder klinisch noch radiografisch beurteilbar, da absichtlich belassene, arretierte Läsionen im Röntgenbild nicht von übersehenen aktiven Läsionen unterschieden werden können.

1.4. Fragestellungen

Bei der Behandlung tiefer pulpanaher Läsionen könnte eine selektive Exkavation vorteilhaft gegenüber einer angestrebt vollständigen oder schrittweisen Exkavation sein, da so möglicherweise pulpale Komplikationen und Folgebehandlungen vermieden würden. Hierdurch könnten Zähne länger bei insgesamt geringeren Kosten erhalten werden als bei der alternativen Exkavationsstrategien. Ausgehend von den theoretischen Chancen, die sich aus der selektiven Exkavation ergeben, sollten in der vorliegenden Arbeit folgende Fragen untersucht werden:

1. Wie wirksam ist die selektive Kariesexkavation im Vergleich mit anderen Strategien zur Kariesentfernung?
2. Welche Auswirkungen hat die selektive Kariesexkavation im Vergleich mit anderen Strategien auf den langfristigen Erhalt von Zähnen, und wie kostenwirksam sind die einzelnen Behandlungen?

In einem zweiten Schritt sollte analysiert werden, welche Exkavationsstrategie Zahnärzte bevorzugen und anwenden. Darüber hinaus sollten Gründe für mögliche Präferenzen identifiziert werden. Anschließend sollten die aufgeworfenen möglichen Vorbehalte gegen eine selektive Kariesentfernung systematisch laborexperimentell überprüft werden. Dazu sollte zunächst ein Protokoll zur Erzeugung künstlicher Residualläsionen *in vitro* validiert werden. Dieses sollte dann eingesetzt werden, um folgende Fragen zu beantworten:

3. Beeinflusst belassenes kariöses Dentin die Stabilität von Zahn und Restauration, und gibt es einen Zusammenhang zwischen der Tiefe bzw. Qualität der zurückgelassenen Läsion und der Frakturresistenz des Zahnes?
4. Weisen Restaurationen in selektiv im Vergleich mit vollständig exkavierten Zähnen eine verringerte Randintegrität, erhöhte Mikroleakage und höhere Anfälligkeit für Sekundärkaries auf?
5. Kann kariöses Dentin nach der selektiven Exkavation und vor der Restauration so behandelt werden, dass belassene Läsionen röntgenologisch nicht mehr detektierbar sind, jedoch eine radiografische Unterscheidung zwischen arretierten und aktiven

Läsionen möglich ist?

Die gewonnenen Erkenntnisse sollten geeignet sein, einerseits die Chancen einer selektiven Exkavation zu definieren, und andererseits mögliche Hürden bei der Umsetzung dieser Technik in der Praxis zu überprüfen.

2. Eigene Arbeiten

2.1. Wirksamkeit unvollständiger Kariesentfernung: Eine systematische Übersicht und Meta-Analyse

Schwendicke, F., Dörfer, C., Paris, S.: Incomplete caries removal: A systematic review and meta-analysis. Journal of Dental Research 92 (4) 2013: 306 – 314.

Das Ziel einer vollständigen Entfernung tiefer kariöser Läsionen wird zunehmend in Frage gestellt (Kidd, 2004). Eine dichte Versiegelung verbleibender Bakterien sollte ausreichen, um die Aktivität der belassenen Läsionen zu kontrollieren. Eine solche Inaktivierung versiegelter Läsionen konnte jedoch klinisch nicht immer bestätigt werden (Weerheijm et al., 1992), und laborexperimentelle Studien weisen auf mögliche Risiken, z. B. Restaurationsfrakturen, nach selektiver Exkavation hin (Hevinga et al., 2010). Die Ziele der Studie waren daher, die klinische Evidenz zur Wirksamkeit der verschiedenen qualitativ und quantitativ zu bewerten und die Aussagekraft der aufgefundenen Daten abzuschätzen.

Dazu wurden systematisch elektronische und Handsuchen durchgeführt. Randomisierte klinisch-kontrollierte Studien zur Behandlung von Dentinprimärkaries mittels vollständiger und schrittweiser oder selektiver Exkavation wurden eingeschlossen. Das Risiko der Pulpaexposition, post-operativer pulpaler Komplikationen (Schmerzen, Pulpitis, Vitalitätsverlust) und das Gesamtrisiko pulpaler und nicht pulpaler Komplikationen (Restaurationsversagen, Zahnfrakturen) wurden untersucht. Effektschätzer wurden mittels Random-Effects-Meta-Analyse kalkuliert und die Qualität der eingeschlossenen Studien und die sich ergebenden Evidenzstärken beurteilt (Atkins et al., 2004; Higgins und Green, 2011). Von 364 untersuchten Studien wurden 10 Studien (1257 Patienten, 1628 behandelte Zähne) eingeschlossen. Das Risiko der Pulpaexposition war signifikant geringer, wenn schrittweise (OR [95% Konfidenzintervall]: 0,35 [0,22-0,56]) bzw. selektiv (OR: 0,20 [0,06-0,61]) statt vollständig exkaviert wurde. Die Aussagekraft der zugrundeliegenden Daten wurde als moderat eingestuft. Für das Risiko post-operativer pulpaler Komplikationen für Zähne ohne vorherige Exposition konnte kein signifikanter Unterschied zwischen vollständig und unvollständig exkavierten Zähnen gezeigt werden, es gab jedoch einen Trend zu weniger Komplikationen nach unvollständiger Kariesentfernung (OR=0,58 [0,31-1,10]). Das Gesamtrisiko pulpaler und nicht pulpaler Komplikationen für Zähne ohne vorherige Pulpaexposition war nicht signifikant verschieden zwischen den Exkavationsgruppen (OR=0,97 [0,64-1,46]). Die Evidenzqualität für letztere Schätzer wurde als niedrig bzw. sehr niedrig bewertet. Den gezeigten Vorteilen der schrittweisen oder selektiven im Vergleich mit einer angestrebten vollständigen Exkavation stehen die begrenzte Qualität und die relativ kurze Nachbeobachtungsdauer der eingeschlossenen Studien gegenüber.

Schwendicke, F., Dörfer, C., Paris, S.: Incomplete caries removal: A systematic review and meta-analysis. Journal of Dental Research 92 (4) 2013: 306 – 314. <http://dx.doi.org/10.1177/0022034513477425>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

2.2. Kostenwirksamkeit verschiedener Methoden zur Entfernung tiefer Karies

Schwendicke, F., Stolpe, M., Meyer-Lueckel, H., Paris, S., Dörfer, C.: Cost-effectiveness of one- and two-step incomplete and complete excavation. Journal of Dental Research 92(10) 2013: 880-887.

Eine Einschränkung vieler Wirksamkeitsstudien zur Kariesentfernung ist ihre geringe Nachbeobachtungsdauer (Schwendicke et al., 2013c), wodurch Abschätzungen zu Langzeitfolgen verschiedener Therapien erschwert sind. Da lange Studiendauern in klinischen Untersuchungen generell nur selten realisiert werden können, werden oftmals Modellierungen eingesetzt, um vorhandene Daten zu extrapolieren (Stevens et al., 2000). Ein weiterer Nachteil vieler klinischer Studien ist der Fokus auf Wirksamkeit (Williamson et al., 2012), wobei z. B. patienten-zentrierte Ergebnisse oder Kosten-Aspekte wenig beleuchtet werden (Vernazza et al., 2012), obwohl diese für zahlreiche Entscheidungsprozesse relevant sind (Cooper et al., 2004; Manchikanti, 2008). In der vorliegenden Studie sollten verschiedene Exkavationsstrategien tiefer Karies auf ihre Lebenszeit-Wirksamkeit (Zahnerhalt) und Gesamtbehandlungskosten hin untersucht werden.

Dazu wurde mittels eines Markov-Modells ein initial vitaler, asymptomatischer Molar mit tiefer Karies in einem 15-jährigen Jungen über die Lebenszeit des Patienten nachverfolgt. Übergangswahrscheinlichkeiten wurden systematischen Literaturanalysen entnommen und zeitabhängig modelliert. Zur Kostenschätzung wurden die Gebührenkataloge für gesetzlich und privat Versicherte in Deutschland herangezogen. Kosten wurden mit 3% jährlich diskontiert (IQWiG, 2009). Das Modell wurde mittels Monte-Carlo-Mikrosimulationen analysiert und die Effekte etwaiger Unsicherheiten und Heterogenitäten mittels probabilistischen und univariaten Sensitivitätsanalysen kontrolliert (Briggs et al., 2002a; Briggs et al., 2002b; Glick et al., 2001; Koerkamp et al., 2011).

Auf der Grundlage vorhandener Daten wurden selektiv exkavierte Zähne länger erhalten (53,5 Jahre) als schrittweise (52,5 Jahre) oder vollständig exkavierte Molaren (49,5 Jahre), wobei die Lebenszeit-Behandlungskosten geringer waren, wenn selektiv (265 Euro) statt schrittweise (360 Euro) oder vollständig (398 Euro) exkaviert wurde. Diese Dominanz der selektiven Exkavation wurde in >70% der Simulationen bestätigt. Die begrenzte Nachbeobachtungsdauer und Qualität der zugrundeliegenden Studien schränkt die Aussagekraft der gewonnenen Daten ein. Basierend auf den durchgeführten Sensitivitätsanalysen und unter Berücksichtigung der Höhe der Kosten-Wirksamkeits-Abstände ist eine drastische Änderung der Kosten-Wirksamkeits-Beziehungen der verschiedenen Exkavationsstrategien unwahrscheinlich.

Schwendicke, F., Stolpe, M., Meyer-Lueckel, H., Paris, S., Dörfer, C.: Cost-effectiveness of one- and two-step incomplete and complete excavation. Journal of Dental Research 92(10) 2013: 880-887. <http://dx.doi.org/10.1177/0022034513500792>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

2.3. Entfernung tiefer Karies in der Praxis

Schwendicke, F., Meyer-Lueckel, H., Dörfer, C., Paris, S.: Attitudes and Behaviour regarding Deep Dentin Caries Removal – a Survey among German dentists. Caries Research 47 2013: 566-573.

In Pulpanähe selektiv zu exkavieren, senkt das Risiko von Pulpaexpositionen und postoperativen Komplikationen (Ricketts et al., 2013; Schwendicke et al., 2013a). Inwieweit eine selektive Exkavation auch von in Deutschland tätigen praktischen Zahnärzten durchgeführt wird, ist nicht bekannt. Andernorts wurde gezeigt, dass der zahnmedizinische Alltag nicht ausschließlich an klinischer Evidenz, sondern an praktischen, wirtschaftlichen und politischen Gegebenheiten und Zwängen orientiert ist (Brennan and Spencer, 2003; 2007; Chestnutt et al., 2000; Clovis et al., 2012; Ferracane et al., 2011; Jurgensen et al., 2012; Michalaki et al., 2010; Oen et al., 2007; Primosch and Barr, 2001). Zudem sind Wissen, Einstellungen und Behandlungsverhalten möglicherweise abhängig vom Alter oder Geschlecht des Zahnarztes sowie dem Praxisumfeld (Domejean-Orliaguet et al., 2009; Doméjean-Orliaguet et al., 2004). Die vorliegende Studie untersuchte daher, wie Zahnärzte in Deutschland tiefe Karies behandeln, und analysierte das Wissen und die zugrundeliegenden Einstellungen bzw. Überzeugungen der Zahnärzte.

Dazu wurde eine postalische Befragung aller praktisch tätigen Zahnärzte in Schleswig-Holstein (n=2346) mittels eines zuvor validierten Fragebogens durchgeführt. Die Stichprobe (n=821, Rücklaufquote 35%) war demografisch repräsentativ für die Gesamtheit der Zahnärzte. Basierend auf einer ergänzend durchgeführten Befragung von 200 Non-Respondern scheinen die Auswirkungen eines möglichen Selektions-Bias gering zu sein.

Die Mehrheit der Zahnärzte gab an, klassische subjektive Kriterien (Härte, Farbe, Feuchtigkeit) zur Beurteilung des Exkavationsergebnisses zu nutzen. 50% der Zahnärzte würden einen asymptomatischen vitalen Zahn trotz drohender Pulpaeröffnung vollständig exkavieren. Für 50% wäre eine unvollständige Exkavation zwar eine theoretische Option, überwiegend würde dann aber schrittweise, nicht selektiv exkaviert. Eine Pulpaexposition würden 75% der Zahnärzte mittels direkter Überkappung therapieren. Behandlungsentscheidungen wurden nicht nur von etwaigen Erfolgsaussichten bestimmt; auch die Sorge, belassene Karies könnte voranschreiten oder die Pulpa schädigen, bestimmte den Therapieentscheid. Zudem räumte die Mehrzahl der Zahnärzte ein, dass rechtliche Rahmenbedingungen (z. B. Gewährleistungspflicht für Restaurationen) einen Anreiz zu eher invasiven Verfahren setzen würden. Schließlich wurde auch die Unsicherheit bei der röntgenologischen Beurteilung belassener kariöser Läsionen bemängelt, und immerhin 14% der Zahnärzte gaben an, auch asymptomatische Zähne erneut zu behandeln,

wenn eine Radioluzenz im Sinne einer belassenen Läsion unter einer Restauration radiografisch detektiert würde.

Ausgehend von der Studie identifizierten wir mehrere Hürden, die eine Anwendung der selektiven Kariesexkavation in der Praxis behindern:

1. Zahnärzte fürchten, belassene Karies könnte voranschreiten und die Pulpa schädigen.
2. Zahnärzte fürchten, belassene Karies könnte die Wahrscheinlichkeit eines Restorationsversagens erhöhen.
3. Belassene Karies führt zu diagnostischen Unsicherheiten, weil arretierte Läsionen nicht von übersehenen aktiven Läsionen abzugrenzen sind, und absichtlich belassene Läsionen von anderen Zahnärzten als „übersehene“ Karies diagnostiziert werden könnten.

Die geäußerten Befürchtungen zu überprüfen und existierende Barrieren bei der praktischen Anwendung einer selektiven Kariesentfernung abzubauen, waren das Ziel der folgenden Studien.

Schwendicke, F., Meyer-Lueckel, H., Dörfer, C., Paris, S.: Attitudes and Behaviour regarding Deep Dentin Caries Removal – a Survey among German dentists. Caries Research 47 2013: 566-573. <http://dx.doi.org/10.1159/000351662>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

2.4. Mechanische Eigenschaften unvollständig exkavierter Zähne *in vitro*

Schwendicke, F., Kern, M., Meyer-Lueckel, H., Boels, A., Dörfer, C., Paris, S.: *Fracture resistance and cuspal deflection of incompletely excavated teeth in vitro. Journal of Dentistry* 42(2) 2014: 107-113.

Das nach selektiver Exkavation zurückbleibende kariöse, infizierte oder zumindest demineralisierte Dentin könnte durch seine ungünstigeren Eigenschaften (geringeres Elastizitätsmodul, geringere Härte, reduzierte Haftkraft konventioneller Dentaladhäsive) die Stabilität der Restauration oder des Zahnes kompromittieren. Diese Befürchtungen wurden durch eine laborexperimentelle Studie untermauert, die eine geringere Frakturresistenz von selektiv statt vollständig exkavierten Molaren zeigte (Hevinga et al., 2010). Unklar bleibt, ob solche Effekte unabhängig von der Lokalisation der Läsion (an okklusalen oder pulpoaxialen Wänden) auftreten oder ein Zusammenhang zwischen der Tiefe bzw. dem Mineralverlust der belassenen Läsionen und der Frakturresistenz des Zahnes im Sinne einer Dosis-Wirkungs-Beziehung besteht. Das Ziel der Studie war, die Frakturresistenz von selektiv oder vollständig exkavierten Zähnen mit pulpoaxial lokalisierten kariösen Läsionen zu untersuchen. Zudem sollte die Höckerdehnung bei statischer Belastung verglichen werden.

Um die Auswirkungen von Residualläsionen auf die Eigenschaften von selektiv exkavierten Zähnen zu untersuchen, wurde zunächst ein Protokoll zur Erzeugung künstlicher Läsionen, welche sowohl in ihrem Mineralgehalt bzw. -profil als auch in ihren mechanischen Eigenschaften denen natürlicher Residualläsionen entsprechen, validiert (Schwendicke et al., 2014c). Eine solche künstliche Induktion von Läsionen erlaubt die Kontrolle und Standardisierung der Läsionseigenschaften. Zur Validierung wurden natürliche Residualläsionen mikroradiografisch und mittels Nanoindentation mit künstlich induzierten Läsionen verglichen. Zur Induktion wurden chemische und bakterielle Demineralisationsmethode genutzt: 50 mM Azetatlösung (pH=4,95), 0,5 M EDTA (pH=7,0), 0,1 M Laktat-Karboxymethylzellulosegel (pH=5,0), *Streptococcus-mutans*-Biofilmmodell. Läsionen, die mittels Azetatlösung induziert worden waren, zeigten die geringsten Unterschiede im Vergleich zu natürlichen Residualläsionen.

Anschließend wurden 48 menschliche Prämolaren mittels Kopierschleifverfahren mit standardisierten dreiflächigen Kavitäten versehen und an pulpoaxialen Wänden unterschiedlich tiefe Läsionen künstlich erzeugt (Läsionstiefen [Mittelwert±Standardabweichung] $64\pm 18\ \mu\text{m}$ und $771\pm 176\ \mu\text{m}$). In der Hälfte der Zähne wurde nun das demineralisierte Dentin vollständig entfernt. Alle Zähne wurden anschließend adhäsiv restauriert. Insgesamt wurden 4 Gruppen (n=12) mit flachen oder tiefen sowie belassenen oder entfernten Läsionen untersucht. Die Zähne wurden thermomechanischen

Wechselbelastungen unterzogen und schließlich in einer Universalprüfmaschine von okklusal erst statisch, dann dynamisch belastet.

Selektiv statt vollständig exkavierte Zähne zeigten signifikant erhöhte Höckerdehnungen ($p < 0,05$; Mann-Whitney-U-Test), nicht aber verringerte Frakturresistenzen ($p > 0,05$; t-Test). Demgegenüber war die Frakturresistenz unabhängig von der Kariesexkavation signifikant niedriger in Zähnen mit tiefen als mit flachen Läsionen ($p < 0,001$).

Die Studie belegt, dass belassene künstliche Läsionen an pulpoaxialen Wänden nicht die In-vitro-Frakturresistenz von Zähnen reduzieren. Demgegenüber scheint die Tiefe der Läsion einen Einfluss auf die Frakturresistenz von selektiv und vollständig exkavierten Zähnen zu haben. Die Bedeutung der erhöhten Höckerdehnung in selektiv exkavierten Zähnen, z. B. auf die Integrität von Restaurationsrändern, ist zu klären.

Schwendicke, F., Kern, M., Meyer-Lueckel, H., Boels, A., Dörfer, C., Paris, S.: Fracture resistance and cuspal deflection of incompletely excavated teeth in vitro. Journal of Dentistry 42(2) 2014: 107-113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jdent.2013.12.003>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt

2.5. Integrität von und Kariesentwicklung an Restaurationsrändern bei selektiv und vollständig exkavierten Zähnen *in vitro*

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

Da kariöses Dentin mechanisch weniger stabil und der Haftverbund zwischen konventionellen Adhäsiven und demineralisiertem oder infiziertem Dentin reduziert ist (Hosoya, 2006; Joves et al., 2014; Yoshiyama et al., 2004), könnte die über einer belassenen Läsion platzierte Restauration eine reduzierte Integrität der Restaurationsränder aufweisen, was zur Entstehung von Sekundärkaries führen könnte (Brunthaler et al., 2003; Demarco et al., 2012; Kidd, 1990; Ozer und Thylstrup, 1995). Solche insuffizienten Restaurationen könnten zudem die Diffusion von Kohlenhydraten in die Läsion und somit deren Reaktivierung ermöglichen. Die Studie untersuchte den Einfluss belassener und entfernter, unterschiedlich tiefer kariöser Läsionen auf die Integrität des Restaurationsrandes, die Mikroleakage und die Anfälligkeit für Karies am Restaurationsrand.

Dazu wurden in 32 Prämolaren dreiflächige Kavitäten präpariert und pulpoaxial lokalisierte demineralisierte Läsionen unterschiedlicher Tiefe erzeugt. Durch Exkavation von 16 Zähnen wurden vier Gruppen mit flachen bzw. tiefen, entfernten bzw. belassenen Läsionen gebildet (n=8). Mittels Replikaten wurde die Integrität der gingivo-zervikalen Ränder, die mesial schmelz- und distal dentinbegrenzt waren, rasterelektronenmikroskopisch untersucht (Roulet et al., 1989). Die Zähne wurden in einem Biofilmmodell einem kariogenen Milieu ausgesetzt (Schwendicke et al., 2014a), um die Anfälligkeit der gingivo-zervikalen Ränder für Sekundärkaries zu überprüfen, wobei nur eine Hälfte des Randes exponiert und anschließend mittels Transversaler Mikroradiografie (TMR) untersucht wurde. Die andere Hälfte wurde zur Analyse der Mikroleakage genutzt (Mirkarimi et al., 2012).

Die Randintegrität und Mikroleakage schmelzbegrenzter Ränder war nicht signifikant verschieden zwischen den Gruppen ($p > 0,05$; Mann-Whitney-bzw. χ^2 -Test). Bakterielle Biofilme erzeugten keine messbaren Läsionen im Schmelz. Dentinbegrenzte Ränder wiesen in Zähnen mit tiefen verglichen mit flachen Läsionen signifikant mehr Spalten $> 2 \mu\text{m}$ und Fuchsinleakage auf ($p > 0,05$), wobei kein Unterschied zwischen Zähnen mit belassenen und entfernten Läsionen festzustellen war ($p > 0,05$). Der Mineralverlust in Dentinläsionen war nicht signifikant verschieden zwischen den Gruppen. Zusammenfassend hatte das angrenzende Zahnhartgewebe (Schmelz oder Dentin) und die Tiefe der zu behandelnden Läsion, nicht aber die Exkavationsmethode einen Einfluss auf die Randintegrität, die Mikroleakage und die Kariesentstehung am Restaurationsrand.

Schwendicke, F., Kern, M., Blunck, U., Dorfer, C., Drenck, J., Paris, S.: Marginal integrity and secondary caries of selectively excavated teeth in vitro. Journal of Dentistry 42(10) 2014: 1261-8. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jdent.2014.08.002>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

2.6. Röntgenopake Markierung von Residualläsionen nach selektiver Exkavation

Schwendicke, F., Meyer-Lueckel, H., Dörfer, C., Paris, S.: Radiopaque tagging of residual caries after incomplete caries removal. Journal of Dental Research 93(6) 2014: 565-570.

Eine radiografische Unterscheidung zwischen absichtlich belassenem und übersehenem kariösem Dentin oder zwischen arretierten und progredienten Läsionen ist röntgenologisch schwierig und erfordert den Vergleich standardisierter, konsekutiver Bissflügelaufnahmen, die mittels digitaler Subtraktionsradiografie ausgewertet werden (Nummikoski et al., 1992). Zudem wird radiografisch detektierbare Karies unter einer Restauration oftmals noch immer als ‚Kunstfehler‘ angesehen. Die sich ergebenden diagnostischen Unsicherheiten schmälern daher die Akzeptanz der selektiven Exkavation unter Zahnärzten. Zudem könnten auch komplikationsfreie, selektiv exkavierte Zähne durch Zahnärzte, die nicht mit selektiver Exkavation und der Behandlungsgeschichte des Zahnes vertraut sind, unnötigerweise nachbehandelt werden (Schwendicke et al., 2013d). Das Ziel der Studie war daher, ein Verfahren zur stabilen radiografischen Markierung absichtlich belassener, arretierter Läsionen vor der Restauration der Kavität zu entwickeln und experimentell zu erproben.

Dazu wurden verschiedene radioopake Substanzen auf ihren radiografischen Effekt in künstlichen Residualläsionen überprüft; die Überprüfung wurde mittels Transversaler Wellenlängenunabhängiger Mikroradiografie vorgenommen (Thomas et al., 2006). Wässrige, hochkonzentrierte (>40 Gewichtsprozent) Zinn-II-Chlorid-Lösungen zeigten die stärksten und stabilsten röntgenopaken Markierungen und wurden anschließend an natürlichen Läsionen erprobt. Die Effekte wurden radiografisch analysiert und 20 Röntgenbilder von Zähnen mit markierten und nicht markierten Läsionen einer Zufallsstichprobe von 20 Zahnärzten präsentiert. Abschließend wurde getestet, ob auch voranschreitende, aktive Läsionen stabil markiert würden. Dazu wurden demineralisierte, markierte und unmarkierte Läsionen einer zweiten Demineralisierung unterworfen und anschließend mikroradiografisch untersucht.

Die Behandlung mit Zinn-II-Chlorid-Lösung vor einer Restauration maskierte belassene Läsionen überwiegend vollständig. Markierte Läsionen wurden signifikant weniger häufig detektiert als nicht markierte Läsionen ($p < 0,001$; χ^2 -Test). Während die Markierung arretierter Läsionen stabil war, konnten in progredienten Läsionen nach weiterer zweiwöchiger Demineralisation sowohl der ursprüngliche, maskierte Läsionsanteil als auch der zusätzliche demineralisierte Bereich wieder mikroradiografisch detektiert werden.

Die beschriebene röntgenopake Markierung bewusst belassener Läsionen könnte diagnostische Unsicherheiten beseitigen und die Akzeptanz der selektiven Kariesentfernung unter Zahnärzten erhöhen.

Schwendicke, F., Meyer-Lueckel, H., Dörfer, C., Paris, S.: Radiopaque tagging of residual caries after incomplete caries removal. Journal of Dental Research 93(6) 2014: 565-570. <http://dx.doi.org/10.1177/0022034514531291>

Die folgenden Seiten werden in der elektronischen Version nicht angezeigt.

3. Diskussion

3.1. Evidenz und Praxis

Evidenzbasierte (Zahn-)Medizin wird als die Synthese „aus klinischer Expertise und einer bewussten, aktiven und bewertenden Nutzung wissenschaftlicher Daten zur Patientenversorgung“ definiert (Sackett et al., 1996). Aus der Abwägung von Wahrscheinlichkeiten (Teerawattananon und Russell, 2008) sollen bessere Behandlungsergebnisse, geringere Schadenshäufigkeiten und reduzierte Kosten erwachsen; zudem soll der Ausgang von Diagnostik und Therapie vorhersehbarer gemacht werden (Baelum, 2008; Brennan und Spencer, 2005; 2007; Domejean-Orliaguet et al., 2009; Doméjean-Orliaguet et al., 2004; Manchikanti, 2008; Schuster et al., 2005; Tellez et al., 2011; Tellez et al., 2012; Wennberg and Gittelsohn, 1973). Während die Bereitstellung solcher Wahrscheinlichkeiten ein klassisches Ziel wissenschaftlicher Studien ist, muss zur Erzeugung echten Nutzens die so gewonnene Evidenz in praktisches Handeln umgewandelt werden (Baelum, 2008; Brennan und Spencer, 2005; McNeil, 2001).

Als Instrumente einer solchen Translation von theoretischer Evidenz in die Praxis wurden u. a. Wissensvermittlung (Aus- und Fortbildung), die Anpassung organisatorischer Rahmenbedingungen, positive oder negative finanzielle Anreize, gesetzliche Vorschriften bzw. (standes-) politische Regulationen oder Patientenaufklärung beschrieben (Clarkson et al., 2008; Cleveland et al., 2012; Cook et al., 1997; Farook et al., 2012; Fiset et al., 2000; Witton und Moles, 2013; Woods et al., 2010). Oftmals müssen auch persönliche Überzeugungen, Einstellungen oder grundsätzliche Zweifel an der Validität wissenschaftlicher Daten und deren Anwendbarkeit überwunden werden (Dobrow et al., 2004; Dobrow et al., 2006; Elliott und Popay, 2000; McNeil, 2001; O'Donnell et al., 2013) (Gorissen et al., 2005; Junges et al., 2013 ; Schwendicke et al., 2013d). Um vorhandene Evidenzlücken wirksam überbrücken zu können (Elliott und Popay, 2000; Pitts et al., 2011), muss zunächst untersucht werden, von welchen spezifischen Hürden (Einstellungen bzw. Befürchtungen, Wissenslücken, Regulationen) die Translation von Evidenz in die Praxis behindert wird.

3.2. Entfernung tiefer Karies – Chancen und Hürden

Die selektive Entfernung tiefer Karies scheint vor allem durch das reduzierte Risiko einer Pulpaexposition vorteilhaft im Vergleich mit einer angestrebten vollständigen Exkavation zu sein. Die dargestellte, zunehmend belastbare Evidenz (Schwendicke et al., 2013a; Schwendicke et al., 2013c) belegt diese Vorteile. Zudem könnte selektiv statt vollständig zu exkavieren langfristig auch kostenwirksamer sein (Schwendicke et al., 2013e). Die Mehrzahl der behandelnden Zahnärzte ist jedoch grundsätzlich skeptisch gegenüber unvollständigen

Exkavationsverfahren, die oftmals als „Pfusch“ angesehen werden (FVdZ-SH, 2013; Schwendicke et al., 2013d).

Eine Ursache für diese Diskrepanz zwischen wissenschaftlichen Daten und klinisch-praktischer Realität bzw. Wahrnehmung ist das unterschiedliche Verständnis der Erkrankung „Karies“, das sich auch in einem unterschiedlichen Therapieansatz niederschlägt: Das Ziel, kariöse Läsionen vollständig zu entfernen, fußt auf der Annahme, kariöses Dentin sei klar von gesundem Gewebe abgrenzbar und eine Entfernung der auslösenden Infektionserreger nötig, um ein Voranschreiten der Läsion zu verhindern (Schwendicke et al., 2013d). Demgegenüber ist belegt, dass eine komplette Beseitigung aller Bakterien in der Kavität durch Exkavation nur selten oder nie erreicht wird (Lager et al., 2003; Shovelton, 1970) und auch nicht nötig ist, da die Aktivität kariöser Läsionen durch Versiegelung kontrolliert werden kann (Oong et al., 2008). Viele Zahnärzte verstehen den Exkavationsprozess demnach als kausalthérapeutisch, während wissenschaftlich fundierte Konzepte die Exkavation vielmehr als notwendigen Schritt ansehen, um eine Basis für die zu platzierende Restauration zu bereiten. Letztere wird ebenfalls weniger als kausale Therapie verstanden, sondern ist primär nötig, um die Reinigungsfähigkeit der Zahnoberfläche und die Funktion des Zahnes wieder herzustellen (Kidd, 2004).

Weiterhin äußerten Zahnärzte Vorbehalte gegenüber der Stabilität und dem langfristigen Erfolg von Restaurationen auf selektiv exkavierten Zähnen, wobei dieser Fokus auf die Langlebigkeit der Restauration statt des Zahnes durch in Deutschland gültige Regeln befördert wird (Schwendicke et al., 2013d). Zudem wird nicht selektiv exkaviert, weil die mit der verbleibenden Läsion verbundenen röntgenologisch-diagnostischen Unsicherheiten bisher nicht gelöst sind und Zahnärzte fürchten müssen, belassene und röntgenologisch detektierbare Läsionen würden von anderen Zahnärzten, aber auch Patienten, Versicherern oder Gutachtern als Behandlungsfehler ausgelegt.

In den beschriebenen Studien wurden Methoden entwickelt und angewendet, die eine Überprüfung der geäußerten Befürchtungen und identifizierten Hürden ermöglichten und die aufgeworfenen Einwände bzw. Probleme relativieren bzw. lösen konnten. Weiterhin initiierten die Studien (standes-)politische Diskussionsprozesse, die langfristig in einer Änderung etwaiger Regulationen oder der Erstellung von Behandlungsrichtlinien münden könnten.

3.3. Ergebnisse der Studien

Da viele der aufgeworfenen Fragen nicht ausschließlich klinisch zu beantworten sind, wurde zunächst ein Protokoll zur Induktion künstlicher Residualkaries validiert. Dazu haben wir auf bestehende Protokolle unter Nutzung von Demineralisationsgelen und -lösungen

zurückgegriffen (Kawasaki et al., 2000; Magalhaes et al., 2009; Marquezan et al., 2009; Moron et al., 2013), aber auch biofilmbasierte Verfahren genutzt (Schwendicke et al., 2014a). Der Vergleich mit natürlichen Residualläsionen wurde dabei auf zwei Ebenen geführt: Zum einen wurden Mineralverlust und Mineralprofil verglichen, zum anderen mechanische Eigenschaften untersucht. Während ersterer Parameter Relevanz für eine potenzielle Remineralisierbarkeit hat, ist letzterer Parameter für die Analyse der Frakturresistenz von Zahn und Restauration bedeutsam (Joves et al., 2014; Lynch und ten Cate, 2006). Eine Korrelation zwischen beiden Variablen kann nach neueren Erkenntnissen nicht zwingend vorausgesetzt werden (Bertassoni et al., 2009; Kinney et al., 2003; Marshall et al., 2001). Das vorgeschlagene Protokoll war in der Lage, Läsionen zu induzieren, die hinsichtlich beider Parameter natürlichen Residualläsionen ähneln. Die chemische Induktion von Läsionen erlaubte eine zuverlässige Steuerung der entstehenden Läsion, während biofilmbasierte Modelle hingegen oft weniger reproduzierbar sind; zudem zeigten die entstehenden Läsionen deutliche Unterschiede des Mineralprofils und Mineralgehaltes (Schwendicke et al., 2014c). Eine Modifizierung des Modells mit Vordemineralisierung mittels 0,5 M EDTA (pH=7,0; 24 h) und Azetatlösung (pH=5,3; 14 Tage), und anschließender Bakterieninvasion durch *Lactobacillus rhamnosus* erlaubt eine zuverlässige Induktion tiefer, mikrobiell infizierter Läsionen (Abb. 4). Dies ermöglicht beispielsweise Untersuchungen zur Wirksamkeit von Versiegelung zur Arretierung verschieden tiefer infizierter Läsionen.

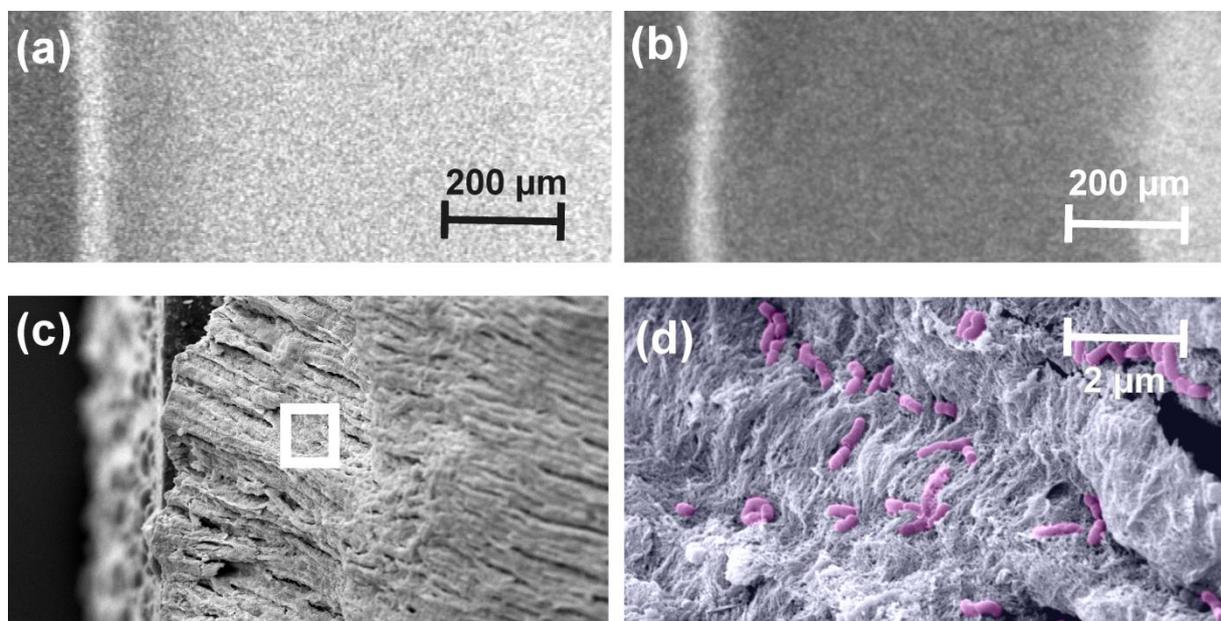
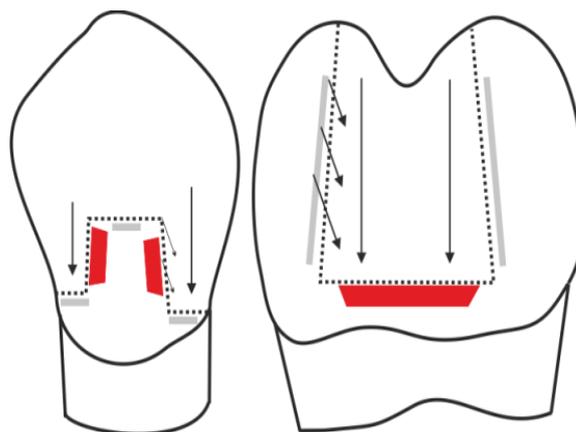


Abbildung 4: Modifiziertes mikrobielles Modell zur Erzeugung von infizierten Residualläsionen. Nach Demineralisierung mittels EDTA und Essigsäure werden demineralisierte Zahnproben (a) in dem dargestellten Biofilmmodell mit *L. rhamnosus* infiziert. Nach 14 Tagen sind ausgeprägt demineralisierte, tiefe Läsionen entstanden (b), die mikrobiell infiziert sind (c, d, Fenster: Detail in d, magenta: Laktobazillen). a, b bzw. c, d: mikroradiografische bzw. rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen.

Den Vorteilen der dargestellten In-vitro-Systeme (Steuerung des zu untersuchenden Parameters, Kontrolle der experimentellen Schwankungen, reduzierte ethische Hürden bei der Untersuchung) werden berechtigte Einwände hinsichtlich der externen Validität solcher Studien entgegengestellt (Maltz und Alves, 2013). Schlussfolgernd werden weiterhin sowohl klinische als auch laborexperimentelle Untersuchungen nötig sein, um vorhandene Risiken bzw. offene Fragen zur selektiven Exkavation abzubauen bzw. zu beantworten.

Wir nutzten die beschriebenen chemischen Demineralisationsprotokolle in Studien zur Untersuchung der mechanischen Eigenschaften von selektiv und vollständig exkavierten Zähnen. In den durchgeführten Analysen an Prämolaren wurden keine nachteiligen Effekte von unter den Restaurationen belassenen Läsionen auf die Frakturresistenz gefunden, jedoch wurde ein signifikanter Effekt der Läsionstiefe gezeigt, wobei Zähne mit tiefen kariösen Läsionen unabhängig von der Exkavationsstrategie bei geringerer Belastung als solche mit flachen Läsionen frakturierten. Die Ergebnisse der Studie stehen im Widerspruch zu publizierten Daten, die einen negativen Einfluss belassener okklusaler Läsionen auf die Frakturresistenz von Molaren *in vitro* zeigten (Hevinga et al., 2010). In unserer Studie waren die Läsionen jedoch nicht okkusal, sondern approximal lokalisiert. Diese unterschiedliche Ausrichtung der Läsionen könnte für die Differenz der Ergebnisse zwischen den Studien verantwortlich sein (Abb. 5). Zur genauen Aufklärung der Effekte verschieden tiefer Läsionen auf die mechanischen Eigenschaften selektiv exkavierter Zähne sind weitere, z. B. Finite-Elemente- oder interferometrische Analysen notwendig.

Abbildung 5: Mögliche Ursachen der Differenzen der mechanischen Eigenschaften von selektiv exkavierten Prämolaren mit approximalen und Molaren mit okklusalen Residualläsionen. Während bei Prämolaren der Haftverbund zwischen Zahn und Restauration durch die Läsion (rot) an den axialen Wänden eingeschränkt wird, ist das Dentin in den approximalen Kästen (grau) intakt und unterstützt die Restauration gegenüber axialen Belastungen (Pfeile). Demgegenüber wirken diese Kräfte bei Molaren vermutlich direkt auf die weniger belastbare Residualläsion (rot), die Restauration frakturiert unter Ausbildung von Haarlinienfrakturen (*ice cracks*) in die erweichte Läsion hinein (Hevinga et al., 2010).



Weiterhin untersuchten wir die Randintegrität von Restaurationen in selektiv und vollständig exkavierten Zähnen und die Anfälligkeit der Zähne für Karies am Restaurationsrand. Eine langfristige mangelnde Qualität zervikaler dentinbegrenzter Restaurationsränder wird als Risikofaktor für die Entstehung von Sekundärkaries benannt (Al-Negrish, 2002; Blum et al.,

2003; Braga et al., 2007; Burke et al., 1999), welche wiederum als hauptsächliche langfristige Versagensursache dentaler Restaurationen gilt (Burke et al., 1999; Chrysanthakopoulos, 2012; Demarco et al., 2012; Kopperud et al., 2012; Mjor et al., 2000). Die beschriebene, geringe Nachbeobachtungsdauer selektiv exkavierter Zähne in vielen klinischen Studien könnte demnach dazu führen, dass die Wirksamkeit dieser Therapie überschätzt wird (Schwendicke et al., 2013c). In den durchgeführten Untersuchungen wurden, analog zu den Ergebnissen der Frakturresistenz, keine Unterschiede der Randintegrität in selektiv statt vollständig exkavierten Zähnen, wohl aber zwischen Zähnen mit tiefen und flachen Läsionen gezeigt. Unter Betrachtung unserer Ergebnisse zur erhöhten Höckerdehnung in selektiv exkavierten Zähnen waren diese Resultate unerwartet: Möglicherweise kompensierten der erhöhte C-Faktor sowie das größere Volumen der Kavitäten in vollständig statt selektiv exkavierten Zähnen die Auswirkungen der Höckerdehnung (Boaro et al., 2014).

Unsere Ergebnisse zur Kariesinduktion am Restaurationsrand stimmen mit denen aus klinischen und anderen laborexperimentellen Studien überein: Der Mineralverlust ist nur bei ausgeprägten Randspalten abhängig von der Randintegrität (Cenci et al., 2009; Dérand et al., 1991; Diercke et al., 2009; Dijkman et al., 1994). Die Entstehung solcher „Sekundärkaries“ wurde in unserer Studie nur selten beobachtet, die induzierten Läsionen waren vielmehr Primärläsionen neben dem Restaurationsrand (engl. ‚*caries adjacent to restorations*‘) (Kidd, 1990), was wahrscheinlich auf die insgesamt hohen Randintegritäten in allen Gruppen zurückzuführen ist. Auch für die Mikroleakage konnten keine Unterschiede zwischen selektiv und vollständig exkavierten Gruppen gezeigt werden. Ein solche Flüssigkeitsdurchlässigkeit entlang der Grenzfläche zwischen Zahn und Restauration könnte in selektiv exkavierten Zähnen zur Reaktivierung der versiegelten Läsionen führen (Mortensen et al., 1965; Tani und Buonocore, 1969).

Während Randintegritätsuntersuchungen und Leakage-Analysen als wenig valide, jedoch sensitiv gelten, ist eine biofilmbasierte Simulation von Karies am Restaurationsrand von höherer externer Validität, aber weniger sensitiv: Die genutzten Methoden sind somit komplementär zueinander (Heintze, 2007; Heintze, 2013). Als Einwand muss die unter klinischen Bedingungen wahrscheinlich deutlich geringere initiale Restaurationsrandintegrität genannt werden. Vor allem für zervikale Ränder sind eine zuverlässige Trockenlegung und eine perfekte Adaptation des Randes nicht zwingend gegeben. Die Auswirkungen von Speichelkontaminationen während des Restaurationsvorganges oder möglicher marginaler Insuffizienzen von Restaurationen auf die Aktivität versiegelter kariöser Läsionen sind bisher unverstanden; auch hier wären laborexperimentelle Untersuchungen denkbar. Zusammenfassend zeigten unsere Untersuchungen keine nachteiligen Auswirkungen von

belassenen kariösen Läsionen auf die mechanischen oder restaurativen Eigenschaften von selektiv exkavierten Zähnen *in vitro*.

Absichtlich belassenes kariöses Dentin ist röntgenologisch nicht von übersehenen Läsionen abzugrenzen, zudem ist es unmöglich, arretierte und progrediente Läsionen zu unterscheiden. Die Anwendung des beschriebenen Röntgenopakters scheint geeignet, die mit einer selektiven Exkavation einhergehenden diagnostischen Unsicherheiten zu reduzieren. Dabei sollte bedacht werden, dass eine solche radiografische Markierung der Läsion darauf abzielt, unnötige Nachbehandlungen von selektiv exkavierten Zähnen durch nicht mit der Methode vertraute Zahnärzte zu verhindern. Dieses Ziel kann kritisch hinterfragt werden: Langfristig sollte stattdessen versucht werden, Zahnärzte über die Möglichkeiten und diagnostischen Schwierigkeiten, die aus einer selektiven Exkavation erwachsen, aufzuklären. Die demonstrierte Unterscheidung von arretierten und voranschreitenden Läsionen durch röntgenopake Markierung ist vielversprechend; eine klinische Demonstration steht jedoch aus und dürfte sich schwierig gestalten. Bei der Anwendung des Röntgenopakters bleiben zudem mögliche vor- und nachteilige Effekte ungeklärt: So sind potenzielle Wirkungen auf pulpale Zellen nicht bekannt, die Sicherheit in der Anwendung (Ätzwirkung) durch Zahnärzte nicht belegt und die ausreichende Durchdringung verschieden tiefer Läsionen unklar. Ebenso sind positive Effekte einer möglichen Inhibition dentinaler Matrix-Metallo-Proteinasen auf die langfristige Integrität des Haftverbundes (de Souza et al., 2000; Peutzfeldt et al., 2013) oder die potenziell antibakteriellen Eigenschaften der genutzten Zinnlösung unklar. Zusammenfassend kann die röntgenopake Markierung residualer Karies dazu dienen, die Akzeptanz der selektiven Exkavation unter Zahnärzten kurz- und mittelfristig zu erhöhen und diagnostische Unsicherheiten bei der radiologischen Diskrimination zwischen arretierten und progredienten Läsionen aufzuheben.

Als weitere, weniger klinisch denn (berufs-)politisch verortete Hürde sind in Deutschland geltende Regeln bei der zahnärztlichen Behandlung zu nennen, wie z. B. Gewährleistungspflicht für Restaurationen: Diese sind an sich begrüßenswert, da durch sie die Behandlungsqualität verbessert werden soll. Unter dem Druck dieser Forderungen wird jedoch oftmals ein mögliches Scheitern weniger invasiver Maßnahmen antizipiert und entsprechend früh- bzw. vorzeitig invasiv vorgegangen (Schwendicke et al., 2013d). Dies mag für bestimmte Indikationen (Behandlung von Kindern oder Behinderten in Intubationsnarkose, Behandlung vor *Radiatio* im Kopf-Hals-Bereich) sinnvoll sein, ist aber für Patienten, die regelmäßig den Zahnarzt aufsuchen, oft nicht zielführend: Durch übermäßig frühe oder invasive Interventionen werden Rückfallpositionen aufgegeben, früh Kosten generiert und eine Spirale an immer teureren und invasiveren Folgebehandlungen induziert (Brantley et al., 1995; Qvist, 2008; Schwendicke et al., 2013e).

Eine weitere Barriere bei der Umsetzung der selektiven Exkavation in der Praxis in Deutschland sind existierende Richtlinien der Gesetzlichen Krankenkassen, die eine „Kariesfreiheit“ der Kavität vor einer Restauration fordern. Diese Forderung ist auf mehreren Ebenen problematisch: Erstens setzt sie ein definiertes Messkriterium zur Prüfung der Kavität nach der Exkavation voraus, zweitens wird ein Messinstrument benötigt, das objektiv, präzise und reproduzierbar die Kariesfreiheit bestimmt, und drittens fußt sie auf einem Verständnis von Karies als eine Erkrankung, die klar als „vorhanden“ oder „nicht vorhanden“ kategorisiert werden kann: Diese Dichotomisierung wird zwar der Praktikabilität halber oft vorgenommen, ignoriert aber die beschriebene Histologie kariöser (Dentin-)Läsionen: Der in der Realität kontinuierliche Übergang zwischen „krankem“ und „gesundem“ wird in der Praxis durch (wenig valide) Messmethoden künstlich festgelegt, wobei die Sensitivität der eingesetzten Messmethode den Schwellenwert zur Unterscheidung von krank und gesund definiert. Dieses Problem könnte nur gelöst werden, wenn ein valides Kriterium und ein entsprechender, ebenfalls valider Schwellenwert bekannt wäre.

In diesem Zusammenhang ist eine Diskussion über die genutzten Begrifflichkeiten und Bezeichnungen bei der Kariesexkavation notwendig, da diese sich in der dargestellten Forderung nach Kariesfreiheit niederschlagen: Die auch in dieser Schrift teilweise genutzte Abgrenzung von vollständiger *versus* unvollständiger Exkavation ist rein theoretischer Natur, weil dafür –wie diskutiert– ein definiertes Prüfkriterium und ein entsprechendes Messinstrument, d. h. ein Goldstandard, benötigt werden. Basierend auf dem vielleicht üblichsten Kriterium – der Abwesenheit jeglicher Bakterien – sind nahezu alle Exkavationen „unvollständig“. Inwieweit dieses Kriterium sinnvoll ist, muss ebenfalls kritisch hinterfragt werden, da die Bakterienzahlen in der Kavität nach Exkavation nicht mit klinischem Erfolg oder besseren patienten-zentrierten Ergebnissen (weniger Schmerz o.ä.) korrelieren (Schwendicke et al., 2014e). Auch andere messbare Endpunkte (Fluoreszenz, Härte, enzymatische Degradierbarkeit) konnten bisher nicht mit besseren klinischen Ergebnissen assoziiert werden, zudem sind keinerlei Dosis-Wirkungs-Beziehungen und damit verbundene mögliche Grenzwerte für die Kariesexkavation beschrieben. Basierend auf diesem Mangel an messbaren, validierten Kriterien zum *Ergebnis* der Exkavation könnten prozessorientierte Bezeichnungen zur Klassifizierung der verschiedenen dargestellten Exkavationsstrategien genutzt werden, z. B. selektiv, non-selektiv, schrittweise usw., bis geklärt ist, welcher Parameter am ehesten die *relevanten* Ergebnisse des Exkavationsprozesses bestimmt und wie dieser Parameter zuverlässig, einfach und objektiv zu messen ist.

3.4. Ausblick

Die durchgeführten Arbeiten konnten einerseits die Chancen, die sich aus einer selektiven statt einer vollständigen Exkavation ergeben, darstellen. Andererseits wurden die mit einer selektiven Exkavation verbundenen Befürchtungen aufgezeigt, teilweise relativiert und Lösungen für vorhandene diagnostische Unsicherheiten entwickelt.

Weitere laborexperimentelle oder Ex-vivo-Studien könnten eingesetzt werden um zu verstehen, welche Auswirkungen die Versiegelung kariöser Läsionen auf die verbleibenden Mikroorganismen hat. So sind Umstellungen in der Stoffwechselaktivität möglich (Paddick et al., 2005), wobei unklar bleibt, ob diese dauerhaft oder reversibel sind, was Implikationen für die oben beschriebenen Anforderungen an den Langzeitcharakter der Versiegelung hat. Zudem könnte aufgeklärt werden, ob versiegelte Mikroorganismen nicht nur ihr Stoffwechsel-, sondern auch ihr Virulenzfaktorprofil umstellen, was gerade in tiefen Läsionen bedeutsam für das Verständnis pulpaler Reaktionen auf versiegelte Mikroorganismen wäre. Letztlich wären auch weitere antibakterielle Vorbehandlungen der Läsion, z.B. mittels Ozon oder photodynamischer Therapie, vor der Restauration bzw. Versiegelung zu untersuchen (Azarpazhooch and Limeback, 2008; Guglielmi et al., 2011). Die klinische Relevanz solcher Vorbehandlungen im Hinblick auf die bakterizide Wirkung der Versiegelung (Oong et al., 2008) und den dargestellten geringen Zusammenhang zwischen Bakterienzahl und Therapieerfolg sollte jedoch kritisch hinterfragt werden.

Zahlreiche aufgeworfene Fragen können nur durch klinische Studien beantwortet werden, wobei neben der vergleichenden Analyse beispielweise der schrittweisen und selektiven Exkavation (Schwendicke et al., 2014f) auch methodische Fragen beantwortet werden sollten: So ist die Messung der Kariesexkavation, d. h. die Bestimmung der Menge bzw. Charakteristik des zurückgelassenen kariösen Dentins, zurzeit nur begrenzt möglich. Existierende Methoden stützen sich u.a. auf die Fluoreszenzeigenschaften kariösen, infizierten Dentins (Lennon, 2003; Lennon et al., 2007; Lennon et al., 2009) oder den Widerstand von Dentin gegen eine Exkavation mit selbstlimitierenden Instrumenten (Lennon et al., 2009; Meller et al., 2007). Beide Methoden erlauben jedoch keine kontinuierliche Messung, sondern definieren einen Grenzwert bzw. Grenzwertkorridor, der bisher nicht validiert ist. Dabei ist – wie dargestellt – auch unklar, gegen welchen Prüfparameter eine solche Validierung stattfinden sollte: Ein Ziel künftiger Studien sollte demnach sein zu definieren, welcher Messparameter (Härte, Farbe, Feuchtigkeit, Oberflächeneigenschaften, histologische Organisation, bakterielle Infektion) am besten die Grenzen der Exkavation beschreibt. Letztere sollten dabei an Ergebnisparametern ausgerichtet werden, die von Patienten, Zahnärzten, Versicherern gemeinsam definiert und getragen werden. Zur Definierung dieser Ergebnisparameter sind entscheidungsanalytische Studien,

beispielsweise unter Einsatz von Nutzwertanalysen oder analytischen Hierarchieprozessen, denkbar (Saaty, 1990; Zangemeister, 1976).

Ausgehend davon sollte ein kontinuierliches Messinstrument *in vitro* entwickelt und validiert werden, dass dann in einer klinisch kontrollierten Studie eingesetzt wird, um den Einfluss auf die skizzierten Zielparameter zu beschreiben. In Abhängigkeit von den Ergebnissen einer solche Studie könnte dieses Instrument dann in die Praxis überführt werden; alternativ dazu ist auch denkbar, dass die Kariesexkavation in Pulpanähe auch weiterhin unter Nutzung subjektiver Kriterien (ledrig, feucht usw.) durchgeführt werden kann, da die belassene Menge kariösen Dentins in Pulpanähe keinen signifikanten Einfluss auf die Zielparameter hat.

Sollte dies der Fall sein, könnten schlussendlich auch Methoden zur reinen Versiegelung kavierter Läsionen breitere Anwendung finden (Bakhshandeh et al., 2012; Innes et al., 2011). Eine solche Versiegelung wäre, ähnlich wie die atraumatische restaurative Therapie (Frencken et al., 2012), geeignet, technische Hürden bei der Kariestherapie zu reduzieren, was gerade jenen Patienten zugutekäme, die die Mehrzahl tiefer Läsionen aufweisen (Ridell et al., 2008). Wenn tiefe Läsionen einfach, schnell und kostengünstig zu therapieren bzw. zu kontrollieren wären, könnte dies auch helfen, die Assoziation zwischen sozioökonomischen Status und Mundgesundheit zu durchbrechen (Schwendicke et al., 2014b). Bei der Behandlung tiefer Läsionen in Kindern, die bisher in vielen hoch entwickelten Ländern überhaupt nicht oder oft nur in Intubationsnarkose erfolgt (Edelstein und Chinn, 2009; Krustrup und Petersen, 2007; Levine et al., 2002; Tickle et al., 2002), sollten zukünftige Studien verschiedene pragmatische Ansätze (Kariesversiegelung, Kariesexkavation ohne anschließende Restauration) im Vergleich mit konventionellen Therapien untersuchen, da auch hier ein Bedarf für wirksame, kostengünstige und einfach anzuwendende, wenig schmerzhaft Behandlungen besteht (Santamaria et al., 2014).

4. Zusammenfassung

Das veränderte Verständnis von Karies spiegelt sich auch in einem veränderten Therapiekonzept wider: Statt einer rein symptomatischen Entfernung der kariösen Läsion wird vielmehr versucht, die Zusammensetzung und die metabolische Aktivität des dentalen Biofilms als Ursache der Erkrankung zu kontrollieren. Für tiefe Läsionen wird daher weniger auf eine vollständige Ausräumung des infizierten Dentins abgezielt, die wahrscheinlich durch Exkavation ohnehin nicht erreicht werden kann, sondern auf eine Kontrolle der Aktivität der Läsion. Dabei wird auf das Prinzip der Versiegelung der im Dentin verbleibenden Mikroorganismen zurückgegriffen: Versiegelte Bakterien sind von der Zufuhr mit Kohlenhydraten abgeschnitten, wodurch die Läsion inaktiviert wird. Der klassischen vollständigen Exkavation werden demnach Konzepte gegenübergestellt, die bewusst demineralisiertes bzw. infiziertes Dentin zeitweise oder dauerhaft unter einer Restauration belassen. Da bei letzterem Konzept in der Peripherie der Kavität andere (traditionelle) Exkavationskriterien als in Pulpanähe genutzt werden, wurde in der vorliegenden Arbeit der Begriff der selektiven Kariesexkavation zur Bezeichnung dieser Exkavationsstrategie genutzt.

Die Wirksamkeit der selektiven Kariesexkavation und die möglichen positiven Langzeitfolgen sowie das gegenüber alternativen Exkavationsstrategien vorteilhafte Kosten-Wirksamkeits-Verhältnis wurden durch die durchgeführten Studien belegt. Bisher liegen jedoch wenige Studien mit patienten-zentrierten Ergebnissen vor, und vor allem die Umsetzung in der allgemeinärztlichen Praxis ist nicht gegeben. Dafür sind Zweifel an der Arretierbarkeit kavierter Läsionen und an der Stabilität und Integrität der Restauration verantwortlich, zudem herrscht Unsicherheit über den Umgang mit der röntgenologischen Sichtbarkeit von unter einer Restauration belassenen kariösen Läsionen: Diese könnten von anderen, nicht mit dem Verfahren der selektiven Exkavation vertrauten Zahnärzten als Behandlungsfehler angesehen und unnötigerweise nachbehandelt werden; zudem ist eine Abgrenzung von arretierten und progredienten belassenen Läsionen röntgenologisch nur schwer möglich. Letztlich steht eine Therapie wie die selektive Exkavation, bei der kariöses Dentin aktiv unter einer Restauration belassen wird, in Konflikt mit den Deutschland herrschenden Regulationen, was die Umsetzung in der Praxis zusätzlich behindert.

In den durchgeführten Studien konnte gezeigt werden, dass selektiv statt vollständig exkavierte Zähne nicht zwingend mechanisch kompromittiert sind: Weder die Frakturresistenz noch die Integrität der zervikalen Restaurationsränder waren signifikant verschieden zwischen selektiv und vollständig exkavierten Zähnen *in vitro*. Dementsprechend konnten auch für die Anfälligkeit für Karies am Restaurationsrand und für

die Mikroleakage zwischen Zahn und Restauration kein Unterschied zwischen verschiedenen exkavierten Zähnen gezeigt werden. Warum das belassene demineralisierte, weichere und weniger adhäsionsfreundliche Dentin keine signifikant nachteiligen Effekte auf die besagten Parameter hatte, konnte nicht geklärt werden, und basierend auf dem laborexperimentellen Charakter der Studien sind klinische Schlüsse nur begrenzt möglich.

Weiterhin wurde ein Verfahren zur Markierung von bewusst im Rahmen einer selektiven Exkavation belassenen Läsionen entwickelt, das auf röntgenopake Lösungen auf Zinnchloridbasis zurückgreift. Eine solche Markierung war geeignet, belassene Läsionen röntgenologisch zu maskieren; zudem war *in vitro* eine Abgrenzung aktiver und inaktiver Läsionen möglich. Die klinische Erprobung und die Klärung möglicher positiver oder nachteiliger Nebenwirkungen stehen aus.

Ausgehend von den durchgeführten Studien sollten bereits angestoßene Diskussionsprozesse intensiviert werden, um sowohl emotionale als auch faktische Hürden bei der Umsetzung einer selektiven Exkavation in der zahnärztlichen Praxis abzubauen. Die Ergebnisse der dargestellten Studien sind geeignet, neue Perspektiven für laborexperimentelle und klinische Forschung aufzuzeigen und vorherrschende Therapiekonzepte kritisch gegenüber wissenschaftlicher Evidenz zu prüfen.

5. Literaturangaben

- Aguilar P, Linsuwanont P (2011). Vital Pulp Therapy in Vital Permanent Teeth with Cariously Exposed Pulp: A Systematic Review. *Journal of Endodontics* 37(5):581-587.
- Al-Negrish AR (2002). Composite resin restorations: a cross-sectional survey of placement and replacement in Jordan. *International Dental Journal* 52(6):461-468.
- Alves LS, Fontanella V, Damo AC, Ferreira de Oliveira E, Maltz M (2010). Qualitative and quantitative radiographic assessment of sealed carious dentin: a 10-year prospective study. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology* 109(1):135-141.
- Amorim R, Figueiredo M, Leal S, Mulder J, Frencken J (2012). Caries experience in a child population in a deprived area of Brazil, using ICDAS II. *Clinical Oral Investigations* 16(2):513-520.
- Atkins D, Best D, Briss PA, Eccles M, Falck-Ytter Y, Flottorp S *et al.* (2004). Grading quality of evidence and strength of recommendations. *BMJ* 328(7454):1490.
- Azarpazhooh A, Limeback H (2008). The application of ozone in dentistry: A systematic review of literature. *Journal of Dentistry* 36(2):104-116.
- Baelum V (2008). Caries management: technical solutions to biological problems or evidence-based care? *Journal of Oral Rehabilitation* 35(2):135-151.
- Bakhshandeh A, Qvist V, Ekstrand K (2012). Sealing occlusal caries lesions in adults referred for restorative treatment: 2–3 years of follow-up. *Clinical Oral Investigations* 16(2):521-529.
- Bertassoni LE, Habelitz S, Kinney JH, Marshall SJ, Marshall GW, Jr. (2009). Biomechanical perspective on the remineralization of dentin. *Caries Research* 43(1):70-77.
- Bjørndal L, Larsen T, Thylstrup A (1997). A clinical and microbiological study of deep carious lesions during stepwise excavation using long treatment intervals. *Caries Research* 31(6):411-417.
- Bjørndal L, Larsen T (2000). Changes in the cultivable flora in deep carious lesions following a stepwise excavation procedure. *Caries Research* 34(6):502-508.
- Bjørndal L, Reit C, Bruun G, Markvart M, Kjældgaard M, Näsman P *et al.* (2010). Treatment of deep caries lesions in adults: randomized clinical trials comparing stepwise vs. direct complete excavation, and direct pulp capping vs. partial pulpotomy. *European Journal of Oral Sciences* 118(3):290-297.
- Blum IR, Mjor IA, Schriever A, Heidemann D, Wilson NH (2003). Defective direct composite restorations--replace or repair? A survey of teaching in Scandinavian dental schools. *Swedish Dental Journal* 27(3):99-104.
- Boaro LC, Brandt WC, Meira JB, Rodrigues FP, Palin WM, Braga RR (2014). Experimental and FE displacement and polymerization stress of bonded restorations as a function of the C-Factor, volume and substrate stiffness. *Journal of Dentistry* 42(2):140-148.

- Braga SR, Vasconcelos BT, Macedo MR, Martins VR, Sobral MA (2007). Reasons for placement and replacement of direct restorative materials in Brazil. *Quintessence International* 38(4):e189-194.
- Brantley C, Bader J, Shugars D, Nesbit S (1995). Does the cycle of reresoration lead to larger restorations? *Journal of the American Dental Association* 126(10):1407-1413.
- Brennan DS, Spencer AJ (2003). Provision of diagnostic and preventive services in general dental practice. *Community Dental Health* 20(1):5-10.
- Brennan DS, Spencer AJ (2005). The role of dentist, practice and patient factors in the provision of dental services. *Community Dentistry and Oral Epidemiology* 33(3):181-195.
- Brennan DS, Spencer AJ (2007). Service patterns associated with coronal caries in private general dental practice. *Journal of Dentistry* 35(7):570-577.
- Briggs AH, Goeree R, Blackhouse G, O'Brien BJ (2002a). Probabilistic Analysis of Cost-Effectiveness Models: Choosing between Treatment Strategies for Gastroesophageal Reflux Disease. *Medical Decision Making* 22(4):290-308.
- Briggs AH, O'Brien BJ, Blackhouse G (2002b). Thinking outside the box: Recent Advances in the Analysis and Presentation of Uncertainty in Cost-Effectiveness Studies. *Annual Review of Public Health* 23(1):377-401.
- Brunthaler A, Konig F, Lucas T, Sperr W, Schedle A (2003). Longevity of direct resin composite restorations in posterior teeth. *Clinical Oral Investigations* 7(2):63-70.
- Buonocore M (1970). Adhesive sealing of pits and fissures for caries prevention, with use of ultraviolet light. *Journal of the American Dental Association* 80(2).
- Burke FJ, Cheung SW, Mjor IA, Wilson NH (1999). Restoration longevity and analysis of reasons for the placement and replacement of restorations provided by vocational dental practitioners and their trainers in the United Kingdom. *Quintessence international* 30(4):234-242.
- Carvalho JC (2014). Caries Process on Occlusal Surfaces: Evolving Evidence and Understanding. *Caries Research* 48(4):339-346.
- Cenci MS, Pereira-Cenci T, Cury JA, ten Cate JM (2009). Relationship between Gap Size and Dentine Secondary Caries Formation Assessed in a Microcosm Biofilm Model. *Caries Research* 43(2):97-102.
- Chestnutt IG, Binnie VI, Taylor MM (2000). Reasons for tooth extraction in Scotland. *Journal of Dentistry* 28(4):295-297.
- Chibinski AC, Reis A, Kreich EM, Tanaka JL, Wambier DS (2013). Evaluation of primary carious dentin after cavity sealing in deep lesions: a 10- to 13-month follow-up. *Pediatric Dentistry* 35(3):E107-112.
- Chrysanthakopoulos NA (2012). Placement, replacement and longevity of composite resin-based restorations in permanent teeth in Greece. *International Dental Journal* 62(3):161-166.

- Clarkson JE, Turner S, Grimshaw JM, Ramsay CR, Johnston M, Scott A *et al.* (2008). Changing Clinicians' Behavior: a Randomized Controlled Trial of Fees and Education. *Journal of Dental Research* 87(7):640-644.
- Cleveland JL, Bonito AJ, Corley TJ, Foster M, Barker L, Gordon Brown G *et al.* (2012). Advancing infection control in dental care settings: factors associated with dentists' implementation of guidelines from the Centers for Disease Control and Prevention. *Journal of the American Dental Association* 143(10):1127-1138.
- Clovis JB, Horowitz AM, Kleinman DV, Wang MQ, Massey M (2012). Maryland dental hygienists' knowledge, opinions and practices regarding dental caries prevention and early detection. *Journal of Dental Hygiene* 86(4):292-305.
- Cook DJ, Greengold NL, Ellrodt AG, Weingarten SR (1997). The relation between systematic reviews and practice guidelines. *Annals of Internal Medicine* 127(3):210-216.
- Cooper NJ, Sutton AJ, Abrams KR, Turner D, Wailoo A (2004). Comprehensive decision analytical modelling in economic evaluation: a Bayesian approach. *Health Economics* 13(3):203-226.
- de Souza AP, Gerlach RF, Line SRP (2000). Inhibition of human gingival gelatinases (MMP-2 and MMP-9) by metal salts. *Dental Materials* 16(2):103-108.
- Decerle N, Nicolas E, Hennequin M (2013). Chewing Deficiencies in Adults with Multiple Untreated Carious Lesions. *Caries Research* 47(4):330-337.
- Demarco FF, Correa MB, Cenci MS, Moraes RR, Opdam NJ (2012). Longevity of posterior composite restorations: not only a matter of materials. *Dental Materials* 28(1):87-101.
- Dérاند T, Birkhed D, Edwardsson S (1991). Secondary caries related to various marginal gaps around amalgam restorations in vitro. *Swedish Dental Journal* 15(3):133-138.
- Diercke K, Lussi A, Kersten T, Seemann R (2009). Isolated development of inner (wall) caries like lesions in a bacterial-based in vitro model. *Clinical Oral Investigations* 13(4):439-444.
- Dijkman GE, de Vries J, Arends J (1994). Secondary caries in dentine around composites: a wavelength-independent microradiographical study. *Caries Research* 28(2):87-93.
- Dobrow MJ, Goel V, Upshur RE (2004). Evidence-based health policy: context and utilisation. *Social Science & Medicine* 58(1):207-217.
- Dobrow MJ, Goel V, Lemieux-Charles L, Black NA (2006). The impact of context on evidence utilization: a framework for expert groups developing health policy recommendations. *Social Science & Medicine* 63(7):1811-1824.
- Dogan S, Duruturk L, Orhan AI, Batmaz I (2013). Determining treatability of primary teeth with pulpal exposure. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry* 37(4):345-350.
- Domejean-Orliaguet S, Leger S, Auclair C, Gerbaud L, Tubert-Jeannin S (2009). Caries management decision: influence of dentist and patient factors in the provision of dental services. *Journal of Dentistry* 37(11):827-834.

- Doméjean-Orliaguet S, Tubert-Jeannin S, Riordan PJ, Espelid I, Tveit AB (2004). French dentists' restorative treatment decisions. *Oral Health & Preventive Dentistry* 2(2):125-131.
- Edelstein BL, Chinn CH (2009). Update on disparities in oral health and access to dental care for America's children. *Academic Pediatrics* 9(6):415-419.
- Elliott H, Popay J (2000). How are policy makers using evidence? Models of research utilisation and local NHS policy making. *Journal of Epidemiology and Community Health* 54(6):461-468.
- Eßer W (2013). Die Parodontitis haben wir nicht im Griff. *Der Spiegel* <http://www.spiegel.de/gesundheit/diagnose/vorstandsvorsitzender-der-kzbv-parodontitis-nicht-im-griff-a-934139.html> (10.06.2014).
- Farook SA, Davis AK, Khawaja N, Sheikh AM (2012). NICE guideline and current practice of antibiotic prophylaxis for high risk cardiac patients (HRCP) among dental trainers and trainees in the United Kingdom (UK). *British Dental Journal* 213(4):E6.
- Ferracane J, Hilton T, Korpak A, Gillette J, McIntyre PS, Berg J *et al.* (2011). Use of caries prevention services in the Northwest PRECEDENT dental network. *Community Dentistry & Oral Epidemiology* 39(1):69-78.
- Fiset L, Grembowski D, Del Aguila M (2000). Third-party reimbursement and use of fluoride varnish in adults among general dentists in Washington State. *Journal of the American Dental Association* 131(7):961-968.
- Frencken J, Leal S, de Lima Navarro M (2012). 25 years Atraumatic Restorative Treatment (ART) approach: a contemporary overview. *Clinical Oral Investigations* 16:1337 - 1346.
- Fusayama T, Okuse K, Hosoda H (1966). Relationship between Hardness, Discoloration, and Microbial Invasion in Carious Dentin. *Journal of Dental Research* 45(4):1033-1046.
- FVdZ-SH (2013). IfW: Pfuschen, um Geld zu sparen? . http://www.fvdz-sh.de/freifax/Freifax_Screen_31.pdf.
- Geyer S, Schneller T, Micheelis W (2010). Social gradients and cumulative effects of income and education on dental health in the Fourth German Oral Health Study. *Community Dentistry and Oral Epidemiology* 38(2):120-128.
- Glick HA, Briggs AH, Polsky D (2001). Quantifying stochastic uncertainty and presenting results of cost-effectiveness analyses. *Expert Review of Pharmacoeconomics & Outcomes Research* 1(1):25-36.
- Gorissen WH, Schulpen TW, Kerkhoff AH, van Heffen O (2005). Bridging the gap between doctors and policymakers: the use of scientific knowledge in local school health care policy in The Netherlands. *European Journal of Public Health* 15(2):133-139.
- Gruythuysen R (2010). Non-Restorative Cavity Treatment. Managing rather than masking caries activity. *Nederlands tijdschrift voor tandheelkunde* 117(3):173-180.
- Guglielmi Cde A, Simionato MR, Ramalho KM, Imperato JC, Pinheiro SL, Luz MA (2011).

- Clinical use of photodynamic antimicrobial chemotherapy for the treatment of deep carious lesions. *Journal of Biomedical Optics* 16(8):088003.
- Handelman SL, Buonocore MG, Schoute PC (1973). Progress report on the effect of a fissure sealant on bacteria in dental caries. *Journal of the American Dental Association* 87(6):1189-1191.
- Handelman SL, Washburn F, Wopperer P (1976). Two-year report of sealant effect on bacteria in dental caries. *Journal of the American Dental Association* 93(5):967-970.
- Handelman SL (1982). Effect of sealant placement on occlusal caries progression. *Clinic Preventative Dentistry* 4(5):11-16.
- Hayashi M, Fujitani M, Yamaki C, Momoi Y (2011). Ways of enhancing pulp preservation by stepwise excavation—A systematic review. *Journal of Dentistry* 39(2):95-107.
- Heintze SD (2007). Systematic reviews: I. The correlation between laboratory tests on marginal quality and bond strength. II. The correlation between marginal quality and clinical outcome. *Journal of Adhesive Dentistry* 9 Suppl 1:77-106.
- Heintze SD (2013). Clinical relevance of tests on bond strength, microleakage and marginal adaptation. *Dental Materials* 29(1):59-84.
- Hesse D, Bonifacio CC, Mendes FM, Braga MM, Imperato JC, Raggio DP (2014). Sealing versus partial caries removal in primary molars: a randomized clinical trial. *BMC Oral Health* 14:58.
- Hevinga MA, Opdam NJ, Frencken JE, Bronkhorst EM, Truin GJ (2007). Microleakage and sealant penetration in contaminated carious fissures. *Journal of Dentistry* 35(12):909-914.
- Hevinga MA, Opdam NJ, Frencken JE, Truin GJ, Huysmans MC (2010). Does incomplete caries removal reduce strength of restored teeth? *Journal of Dental Research* 89(11):1270-1275.
- Higgins JPT, Green S (Hrsg.) (2011). *Cochrane Handbook for Systematic Reviews of Interventions*. Version 5.10 (updated March 2011): The Cochrane Collaboration.
- Hosoya Y (2006). Hardness and elasticity of bonded carious and sound primary tooth dentin. *Journal of Dentistry* 34(2):164-171.
- Innes N, Evans D, Stirrups D (2007). The Hall Technique; a randomized controlled clinical trial of a novel method of managing carious primary molars in general dental practice: acceptability of the technique and outcomes at 23 months. *BMC Oral Health* 7(1):18.
- Innes NP, Evans DJ, Stirrups DR (2011). Sealing caries in primary molars: randomized control trial, 5-year results. *Journal of Dental Research* 90(12):1405-1410.
- IQWiG (2009). Würdigung der Empfehlung des Wissenschaftlichen Beirats des IQWiG zur „Methodik für die Bewertung von Verhältnissen zwischen Nutzen und Kosten im System der deutschen gesetzlichen Krankenversicherung. www.iqwig.de (15.7.2013).
- Joves GJ, Inoue G, Sadr A, Nikaido T, Tagami J (2014). Nanoindentation hardness of

- intertubular dentin in sound, demineralized and natural caries-affected dentin. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 32(0):39-45.
- Junges R, Zitzmann NU, Walter C, Rosing CK (2013). Dental care providers' decision making regarding maintenance of compromised teeth and implant therapy indication: an analysis of gender and enrollment in teaching positions. *Clinical Oral Implants Research* 25(9):1027-1033.
- Jurgensen N, Petersen PE, Ogawa H, Matsumoto S (2012). Translating science into action: periodontal health through public health approaches. *Periodontology 2000* 60(1):173-187.
- Kawasaki K, Ruben J, Tsuda H, Huysmans MC, Takagi O (2000). Relationship between mineral distributions in dentine lesions and subsequent remineralization in vitro. *Caries Research* 34(5):395-403.
- Keyes PH (1960). The infectious and transmissible nature of experimental dental caries. Findings and implications. *Archives of Oral Biology* 1:304-320.
- Kidd EA (2004). How 'clean' must a cavity be before restoration? *Caries Research* 38(3):305-313.
- Kidd EAM (1990). Caries Diagnosis Within Restored Teeth. *Advances in Dental Research* 4(1):10-13.
- Kinney JH, Habelitz S, Marshall SJ, Marshall GW (2003). The Importance of Intrafibrillar Mineralization of Collagen on the Mechanical Properties of Dentin. *Journal of Dental Research* 82(12):957-961.
- Koerkamp BG, Stijnen T, Weinstein MC, Hunink MGM (2011). The Combined Analysis of Uncertainty and Patient Heterogeneity in Medical Decision Models. *Medical Decision Making* 31(4):650-661.
- Kopperud SE, Tveit AB, Gaarden T, Sandvik L, Espelid I (2012). Longevity of posterior dental restorations and reasons for failure. *European Journal of Oral Sciences* 120(6):539-548.
- Kramer PF, Feldens CA, Ferreira SH, Bervian J, Rodrigues PH, Peres MA (2013). Exploring the impact of oral diseases and disorders on quality of life of preschool children. *Community Dentistry and Oral Epidemiology* 41(4):327-335.
- Krustrup U, Petersen PE (2007). Dental caries prevalence among adults in Denmark--the impact of socio-demographic factors and use of oral health services. *Community Dental Health* 24(4):225-232.
- Lager A, Thornqvist E, Ericson D (2003). Cultivable Bacteria in Dentine after Caries Excavation Using Rose-Bur or Carisolv. *Caries Research* 37(3):206-211.
- Langeland K, Langeland L (1968). Indirect capping and the treatment of deep carious lesions. *International Dental Journal* 18(2):362-380.
- Leal SC, Bronkhorst EM, Fan M, Frencken JE (2012). Untreated Cavitated Dentine Lesions: Impact on Children's Quality of Life. *Caries Research* 46(2):102-106.

- Leal SC, Bronkhorst EM, Fan M, Frencken JE (2013). Effect of different protocols for treating cavities in primary molars on the quality of life of children in Brazil--1 year follow-up. *International Dental Journal* 63(6):329-335.
- Lennon AM (2003). Fluorescence-aided caries excavation (FACE) compared to conventional method. *Operative Dentistry* 28(4):341-345.
- Lennon AM, Buchalla W, Rassner B, Becker K, Attin T (2006). Efficiency of 4 caries excavation methods compared. *Operative Dentistry* 31(5):551-555.
- Lennon AM, Attin T, Buchalla W (2007). Quantity of remaining bacteria and cavity size after excavation with FACE, caries detector dye and conventional excavation in vitro. *Operative Dentistry* 32(3):236-241.
- Lennon AM, Attin T, Martens S, Buchalla W (2009). Fluorescence-aided caries excavation (FACE), caries detector, and conventional caries excavation in primary teeth. *Pediatric Dentistry* 31(4):316-319.
- Levine RS, Pitts NB, Nugent ZJ (2002). The fate of 1,587 unrestored carious deciduous teeth: a retrospective general dental practice based study from northern England. *British Dental Journal* 193(2):99-103.
- Lynch RJM, ten Cate JM (2006). The Effect of Lesion Characteristics at Baseline on Subsequent De- and Remineralisation Behaviour. *Caries Research* 40(6):530-535.
- Magalhaes AC, Moron BM, Comar LP, Wiegand A, Buchalla W, Buzalaf MA (2009). Comparison of cross-sectional hardness and transverse microradiography of artificial carious enamel lesions induced by different demineralising solutions and gels. *Caries Research* 43(6):474-483.
- Maltz M, Alves L, Jardim J, S MM, de Oliveira E (2011). Incomplete caries removal in deep lesions: a 10-year prospective study. *American Journal of Dentistry* 24(4):211-214.
- Maltz M, Henz SL, de Oliveira EF, Jardim JJ (2012). Conventional caries removal and sealed caries in permanent teeth: A microbiological evaluation *Journal of Dentistry* 40(9):776-82.
- Maltz M, Alves LS (2013). Incomplete caries removal significantly reduces the risk of pulp exposure and post-operative pulpal symptoms. *Journal of evidence-based Dental Practice* 13(3):120-122.
- Manchikanti L (2008). Evidence-based medicine, systematic reviews, and guidelines in interventional pain management, part I: introduction and general considerations. *Pain Physician* 11(2):161-186.
- Marquezan M, Correa FN, Sanabe ME, Rodrigues Filho LE, Hebling J, Guedes-Pinto AC et al. (2009). Artificial methods of dentine caries induction: A hardness and morphological comparative study. *Archives of Oral Biology* 54(12):1111-1117.
- Marsh PD (2006). Dental plaque as a biofilm and a microbial community - implications for health and disease. *BMC Oral Health* 6(S1):S14.

- Marshall GW, Habelitz S, Gallagher R, Balooch M, Balooch G, Marshall SJ (2001). Nanomechanical Properties of Hydrated Carious Human Dentin. *Journal of Dental Research* 80(8):1768-1771.
- Marthaler T, O'Mullane D, Vrbic V (1996). The prevalence of dental caries in Europe 1990-95. *Caries Research* 30:237 - 255.
- Marthaler TM (2004). Changes in Dental Caries 1953–2003. *Caries Research* 38(3):173-181.
- McNeil BJ (2001). Hidden Barriers to Improvement in the Quality of Care. *New England Journal of Medicine* 345(22):1612-1620.
- Meller C, Welk A, Zeligowski T, Splieth C (2007). Comparison of dentin caries excavation with polymer and conventional tungsten carbide burs. *Quintessence international* 38(7):565-569.
- Mertz-Fairhurst EJ, Curtis JW, Ergle JW, Rueggeberg FA, Adair SM (1998). Ultraconservative and cariostatic sealed restorations: Results at year 10. *Journal of the American Dental Association* 129(1):55-66.
- Michalaki M, Sifakaki M, Oulis CJ, Lygidakis NA (2010). Attitudes, knowledge and utilization of fissure sealants among Greek dentists: a national survey. *European Archives of Paediatric Dentistry* 11(6):287-293.
- Micheelis W, Schiffner U (2006). Vierte Deutsche Mundgesundheits-Studie (DMS IV). Köln Deutscher Ärzteverlag.
- Mickenautsch S, Yengopal V (2013). Validity of Sealant Retention as Surrogate for Caries Prevention – A Systematic Review. *PloS one* 8(10):e77103.
- Mirkarimi M, Beheshti M, Mahmoudi V (2012). Micro leakage assessment of pit and fissure sealant with previous fluoride application: An in Vitro study. *Research Journal of Medical Sciences* 6(1):22-25.
- Mjor IA, Moorhead JE, Dahl JE (2000). Reasons for replacement of restorations in permanent teeth in general dental practice. *International Dental Journal* 50(6):361-366.
- Monse B, Benzian H, Araujo J, Holmgren C, van Palenstein Helder W, Naliponguit EC *et al.* (2012). A Silent Public Health Crisis: Untreated Caries and Dental Infections Among 6- and 12-Year-Old Children in the Philippine National Oral Health Survey 2006. *Asia-Pacific Journal of Public Health* epub only.
- Moron BM, Comar LP, Wiegand A, Buchalla W, Yu H, Buzalaf MAR *et al.* (2013). Different Protocols to Produce Artificial Dentine Carious Lesions in vitro and in situ: Hardness and Mineral Content Correlation. *Caries Research* 47(2):162-170.
- Mortensen DW, Boucher NE, Jr., Ryge G (1965). A METHOD OF TESTING FOR MARGINAL LEAKAGE OF DENTAL RESTORATIONS WITH BACTERIA. *Journal of Dental Research* 44:58-63.
- Nummikoski PV, Martinez TS, Matteson SR, McDavid WD, Dove SB (1992). Digital

subtraction radiography in artificial recurrent caries detection. *Dento Maxillo Facial Radiology* 21(2):59-64.

O'Donnell JA, Modesto A, Oakley M, Polk DE, Valappil B, Spallek H (2013). Sealants and dental caries: Insight into dentists' behaviors regarding implementation of clinical practice recommendations. *Journal of the American Dental Association* 144(4):e24-e30.

Oen KT, Thompson VP, Vena D, Caufield PW, Curro F, Dasanayake A *et al.* (2007). Attitudes and expectations of treating deep caries: a PEARL Network survey. *General Dentistry* 55(3):197-203.

Ogawa K, Yamashita Y, Ichijo T, Fusayama T (1983). The ultrastructure and hardness of the transparent layer of human carious dentin. *Journal of Dental Research* 62(1):7-10.

Oong EM, Griffin SO, Kohn WG, Gooch BF, Caufield PW (2008). The Effect of Dental Sealants on Bacteria Levels in Caries Lesions. *Journal of the American Dental Association* 139(3):271-278.

Ozer L, Thylstrup A (1995). What is Known About Caries in Relation to Restorations as a Reason for Replacement? a Review. *Advances in Dental Research* 9(4):394-402.

Paddick JS, Brailsford SR, Kidd EA, Beighton D (2005). Phenotypic and genotypic selection of microbiota surviving under dental restorations. *Applied and Environmental Microbiology* 71(5):2467-2472.

Paris S, Meyer-Lueckel H, Kielbassa AM (2007). Resin Infiltration of Natural Caries Lesions. *Journal of Dental Research* 86(7):662-666.

Paris S, Ekstrand K, Meyer-Lückel H (2012). Von der Diagnose zu Therapie. In: Karies, Wissenschaft und klinische Praxis. S Paris, K Ekstrand and H Meyer-Lückel (Hrsg.). Stuttgart Thieme.

Peutzfeldt A, Koch T, Ganss C, Flury S, Lussi A (2014). Effect of tin–chloride pretreatment on bond strength of two adhesive systems to dentin. *Clinical Oral Investigations* 18(2):535-43.

Pitts N, Amaechi B, Niederman R, Acevedo AM, Vianna R, Ganss C *et al.* (2011). Global Oral Health Inequalities: Dental Caries Task Group—Research Agenda. *Advances in Dental Research* 23(2):211-220.

Pitts NB, Evans DJ, Nugent ZJ, Pine CM (2002). The dental caries experience of 12-year-old children in England and Wales. Surveys coordinated by the British Association for the Study of Community Dentistry in 2000/2001. *Community Dental Health* 19(1):46-53.

Primosch RE, Barr ES (2001). Sealant use and placement techniques among pediatric dentists. *Journal of the American Dental Association* 132(10):1442-1451.

Pugach MK, Strother J, Darling CL, Fried D, Gansky SA, Marshall SJ *et al.* (2009). Dentin Caries Zones: Mineral, Structure, and Properties. *Journal of Dental Research* 88(1):71-76.

Qvist V (2008). Longevity of restorations: the 'death spiral'. In: Dental Caries: The Disease and Its Clinical Management. O Fejerskov and EAM Kidd (Hrsg.). Oxford: Blackwell

Munksgaard, 444-455.

Ratledge DK, Kidd EA, Beighton D (2001). A clinical and microbiological study of approximal carious lesions. the relationship between cavitation, radiographic lesion depth, the site-specific gingival index and the level of infection of the dentine. *Caries Research* 35(1):3-7.

Ricketts D (2001). Restorative dentistry: Management of the deep carious lesion and the vital pulp dentine complex. *British Dental Journal* 191(11):606-610.

Ricketts D, Lamont T, Innes NP, Kidd E, Clarkson JE (2013). Operative caries management in adults and children. *Cochrane database of systematic reviews* 28(3) :CD003808.

Ridell K, Olsson H, Mejare I (2008). Unrestored dentin caries and deep dentin restorations in Swedish adolescents. *Caries Research* 42(3):164-170.

Roulet JF, Reich T, Blunck U, Noack M (1989). Quantitative margin analysis in the scanning electron microscope. *Scanning Microscopy* 3(1):147-158; discussion 158-149.

Saaty T (1990). Multicriteria decision making - the analytic hierarchy process. Planning, priority setting, resource allocation. Pittsburgh: RWS Publishing.

Sackett DL, Rosenberg WMC, Gray JAM, Haynes RB, Richardson WS (1996). Evidence based medicine: what it is and what it isn't. *BMJ* 312(7023):71-72.

Santamaria RM, Innes NP, Machiulskiene V, Evans DJ, Alkilzy M, Splieth CH (2014). Acceptability of different caries management methods for primary molars in a RCT. *International Journal of Paediatric Dentistry* epub only: doi: 10.1111/ipd.12097.

Schiffner U, Hoffmann T, Kerschbaum T, Micheelis W (2009). Oral health in German children, adolescents, adults and senior citizens in 2005. *Community Dental Health* 26(1):18-22.

Schuster MA, McGlynn EA, Brook RH (2005). How Good Is the Quality of Health Care in the United States? *Milbank Quarterly* 83(4):843-895.

Schwendicke F, Dörfer CE, Paris S (2013a). Incomplete Caries Removal: A Systematic Review and Meta-analysis. *Journal of Dental Research* 92(4):306-314.

Schwendicke F, Kern M, Meyer-Lueckel H, Boels A, Doerfer C, Paris S (2013b). Fracture resistance and cuspal deflection of incompletely excavated teeth *J Dentistry* 42(2):107-113.

Schwendicke F, Meyer-Lückel H, Dorfer C, Paris S (2013c). Failure of incompletely excavated teeth - a systematic review. *Journal of Dentistry* 41(7):569-580.

Schwendicke F, Meyer-Lueckel H, Dörfer CE, Paris S (2013d). Attitudes and Behaviour regarding Deep Dentin Caries Removal – a Survey among German dentists. *Caries Research* 47: 566-573.

Schwendicke F, Stolpe M, Meyer-Lueckel H, Paris S, Dörfer CE (2013e). Cost-effectiveness of One- and Two-step Incomplete and Complete Excavations. *Journal of Dental Research* 90(10):880-887.

Schwendicke F, Dorfer C, Kneist S, Meyer-Lueckel H, Paris S (2014a). Cariogenic Effects of Probiotic *Lactobacillus rhamnosus* GG in a Dental Biofilm Model. *Caries Research*

48(3):186-192.

Schwendicke F, Dörfer C, Schlattmann P, Foster Page L, Thomson M, Paris S (2014b). Socioeconomic inequality and caries: A systematic review and meta-analysis. *Journal Dental Research* epub ahead pii: 0022034514557546.

Schwendicke F, Eggers K, Meyer-Lueckel H, Dörfer C, Kovalev A, Gorb S *et al.* (2014c). In vitro induction of residual caries lesions: Comparative mineral loss and nano-hardness analysis. *Caries Research* (in revision).

Schwendicke F, Meyer-Lueckel H, Schulz M, Dörfer CE, Paris S (2014d). Radiopaque Tagging Masks Caries Lesions following Incomplete Excavation in vitro. *Journal of Dental Research* 93(6):565-750.

Schwendicke F, Paris S (2014). Kariesexkavation: Ein systematischer Überblick. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 69(8):456-466.

Schwendicke F, Paris S, Tu Y (2014e). Effects of using different criteria and methods for caries removal: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. *Journal of Dentistry* (accepted).

Schwendicke F, Schweigel H, Petrou M, Santamaria M, Hopfenmüller W, Finke CH *et al.* (2014f). Selective or Stepwise removal of Deep Caries in Deciduous Molars: A multi-center randomized controlled trial *Trials* (accepted).

Schwendicke F, Stolpe M (2014). Direct pulp capping following a carious exposure versus root canal treatment: A cost-effectiveness analysis. *Journal of Endodontics* doi 10.1016/j.joen.2014.07.028.

Shovelton DS (1970). Studies of dentine and pulp in deep caries. *International Dental Journal* 20(2):283-296.

Stevens R, Adler A, Gray A, Briggs A, Holman R (2000). Life-expectancy projection by modelling and computer simulation (UKPDS 46). *Diabetes Research and Clinical Practice* 50 Suppl 3:S5-13.

Tani Y, Buonocore MG (1969). Marginal leakage and penetration of basic fuchsin dye in anterior restorative materials. *Journal of the American Dental Association* 78(3):542-548.

Teerawattananon Y, Russell S (2008). The greatest happiness of the greatest number? Policy actors' perspectives on the limits of economic evaluation as a tool for informing health care coverage decisions in Thailand. *BMC Health Services Research* 8:197.

Tellez M, Gray SL, Gray S, Lim S, Ismail AI (2011). Sealants and dental caries. *Journal of the American Dental Association* 142(9):1033-1040.

Tellez M, Gomez J, Kaur S, Pretty IA, Ellwood R, Ismail AI (2012). Non-surgical management methods of noncavitated carious lesions. *Community Dentistry and Oral Epidemiology* 41(1):79-96.

Thomas RZ, Ruben JL, de Vries J, ten Bosch JJ, Huysmans MCDNJM (2006). Transversal

- Wavelength-Independent Microradiography, a Method for Monitoring Caries Lesions over Time, Validated with Transversal Microradiography. *Caries Research* 40(4):281-291.
- Tickle M, Milsom K, King D, Kearney-Mitchell P, Blinkhorn A (2002). The fate of the carious primary teeth of children who regularly attend the general dental service. *British Dental Journal* 192(4):219-223.
- van Amerongen JP, van Amerongen WEW, T.F., Opdam NJM, Roeters FJM, Bittermann D, Kidd EAM (2008). Restoring the tooth: 'the seal is the deal'. In: Dental Caries The disease and its clinical management. O Fejerskov and EAM Kidd (Hrsg). Oxford: Blackwell Munksgaard, 386-426.
- Vernazza C, Heasman P, Gaunt F, Pennington M (2012). How to measure the cost-effectiveness of periodontal treatments. *Periodontology 2000* 60(1):138-146.
- Weerheijm KL, de Soet JJ, van Amerongen WE, de Graaff J (1992). Sealing of occlusal hidden caries lesions: an alternative for curative treatment? *Journal of Dentistry for Children* 59(4):263-268.
- Wennberg J, Gittelsohn (1973). Small area variations in health care delivery. *Science* 182(4117):1102-1108.
- Williamson P, Altman D, Blazeby J, Clarke M, Devane D, Gargon E *et al.* (2012). Developing core outcome sets for clinical trials: issues to consider. *Trials* 13(1):132.
- Witton RV, Moles DR (2013). Barriers and facilitators that influence the delivery of prevention guidance in health service dental practice: a questionnaire study of practising dentists in Southwest England. *Community Dental Health* 30(2):71-76.
- Woods N, Considine J, Lucey S, Whelton H, Nyhan T (2010). The influence of economic incentives on treatment patterns in a third-party funded dental service. *Community Dental Health* 27(1):18-22.
- Yengopal V, Mickenautsch S, Bezerra AC, Leal SC (2009). Caries-preventive effect of glass ionomer and resin-based fissure sealants on permanent teeth: a meta analysis. *Journal of Oral Science* 51(3):373-382.
- Yoshiyama M, Tay FR, Doi J, Nishitani Y, Yamada T, Itou K *et al.* (2002). Bonding of Self-etch and Total-etch Adhesives to Carious Dentin. *Journal of Dental Research* 81(8):556-560.
- Yoshiyama M, Doi J, Nishitani Y, Itota T, Tay FR, Carvalho RM *et al.* (2004). Bonding ability of adhesive resins to caries-affected and caries-infected dentin. *Journal of Applied Oral Science* 12(3):171-176.
- Zangemeister C (1976). Nutzwertanalyse in der Systemtechnik - Eine Methodik zur multidimensionalen Bewertung und Auswahl von Projektalternativen. München: Wittemann.

Danksagung

Meiner Dissertationsschrift hatte ich das zu einem solchen Prozess (und dem Thema der Arbeit) passende Motto vorangestellt:

The road to wisdom?

Well, it's plain and simple to express:

Err and err and err again,

but less and less and less.

(zitiert in Daniel C. Dennett:

Darwin's dangerous idea - Evolution and the meanings of life)

Dafür, dass der Weg zu der vorliegenden Schrift doch vergleichsweise geradlinig durchschritten werden konnte, danke ich insbesondere meinem Freund und Kollegen, Prof. Sebastian Paris, der mich in den letzten Jahren engagiert und vertrauensvoll unterstützt und somit entscheidend zum Werden der vorgestellten Arbeiten beigetragen hat.

Viele der vorliegenden Arbeiten wären nicht zustanden gekommen, wenn sich nicht auch andere Wissenschaftler für das dargelegte Thema und die damit verbundenen Fragestellungen begeistert hätten: Ich möchte mich daher ausdrücklich bei allen hier nicht namentlich genannten, aber in den jeweiligen Referenzen aufgeführten Kooperationspartnern für ihre konstruktive Kritik und ihre Aufopferung für die einzelnen Studien bedanken.

Vor allem aber möchte ich mich bei meiner Frau Anja, meinen Eltern und meiner gesamten Familie für ihre Unterstützung und ihr Verständnis danken: Ihr habt mich und meine Arbeit auch abends, an Wochenenden und Feiertagen ertragen, und Euch trotzdem eine positive Einstellung bewahrt; Ihr habt mit mir die Höhen und Tiefen auf dem beschriebenen Weg durchlebt. Danke!

Erklärung

§ 4 Abs. 3 (k) der HabOMed der Charité

Hiermit erkläre ich, dass

- weder früher noch gleichzeitig ein Habilitationsverfahren durchgeführt oder angemeldet wird bzw. wurde.
- die vorgelegte Habilitationsschrift ohne fremde Hilfe verfasst, die beschriebenen Ergebnisse selbst gewonnen sowie die verwendeten Hilfsmittel, die Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern / Wissenschaftlerinnen und mit technischen Hilfskräften sowie die verwendete Literatur vollständig in der Habilitationsschrift angegeben wurden.
- mir die geltende Habilitationsordnung bekannt ist.

Ich erkläre ferner, dass mir die Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis bekannt ist und ich mich zur Einhaltung dieser Satzung verpflichte.

.....
Datum

.....
Unterschrift