

Fluoreszenzunterstützte Kariesexkavation mit Polymerinstrumenten zur pulpanahen Exkavation

Inaugural-Dissertation

zur Erlangung des Doktorgrades

der Hohen Medizinischen Fakultät

der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

Bonn

Frank Farzin Falla

aus Teheran

2024

Angefertigt mit der Genehmigung
der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn

1. Gutachter*in: Prof. Dr. em. Matthias Frentzen
2. Gutachter*in: Prof. Dr. Helmut Stark

Tag der Mündlichen Prüfung: 20.11.2024

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie des Zentrums für
Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde des Universitätsklinikums Bonn

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

	Abkürzungsverzeichnis	7
1.	Einleitung	9
1.1	Einführung	9
1.2	Kariesätiologie	10
1.3	Kariesdiagnostik	13
1.3.1	Anamnese	13
1.3.2	Visuelle Inspektion	14
1.3.3	Röntgenologische Kariesdiagnostik	14
1.3.4	Klinischer Färbetest als Karies-Detektionsmaßnahme	16
1.3.5	Elektrische Widerstandsmessung	17
1.3.6	Transillumination	18
1.3.7	Fluoreszenzunterstützte Kariesdiagnostik	18
1.3.7.1	Quantitative lichtinduzierte Fluoreszenz (QLF)	20
1.3.7.2	Intraorales Fluoreszenzkamerasystem zur Kariesdetektion	20
1.3.7.3	Fluoreszenzunterstützte Kariesexkavation	22
1.4	Kariesexkavation	24
1.4.1	Kariesexkavation unter klinischen und histologischen Aspekten	25
1.4.2	Die Kariesexkavation – Metall Exkavationsinstrumente	28
1.4.3	Die Kariesexkavation – Nicht-Metall Exkavationsinstrumente	29
1.4.3.1	CeraBur®	29
1.4.3.2	Polymerbohrer	29
1.5	Ziel der Untersuchung	30
2.	Material und Methoden	32
2.1	SIROInspect®	32
2.1.1	Anwendung	33
2.2	PolyBur®	34
2.3	Untersuchungskonzept	34
2.4	Vorgehensweise	36
2.5	Datenerfassung und statistische Auswertung	40

3.	Ergebnisse	41
3.1	Ergebnisübersicht	41
3.2	Gegenüberstellung von Sonde und SIROInspect® bei der Kariesdetektion	44
3.3	Detektionsvorhersage von Sonde und SIROInspect®	45
4.	Diskussion	50
4.1	Vollständige Kariesentfernung ja oder nein?	50
4.2	Polymerbohrer (PolyBur®)	51
4.3	Sonde und SIROInspect®	52
4.4	Klinische Relevanz	53
4.5	Klinisches Resümee	56
5.	Zusammenfassung	58
6.	Anhang	60
6.1	Datenerfassung untersuchungsrelevanter Zähne	60
6.2	Fotodokumentation	64
7.	Abbildungsverzeichnis	87
8.	Tabellenverzeichnis	91
9.	Literaturverzeichnis	92
10.	Danksagung	103

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
CCD	Charge-Coupled Device
CD	Caries Aided Excavation
CE	Conventional Excavation
CS	Chemomechanical Excavation
DIFOTI	Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination
E	Energie
Ebd.	Ebenda
FACE	Fluorescence Aided Caries Excavation
FOTI	Fiber-Optic Transillumination
Hz	Hertz
ICDAS	International Caries Detection and Assessment System
KHN	Knoop Hardness Number
λ (lambda)	Wellenlänge
LED	Light-Emitting Diode
Lfd. Nr.	Fortlaufende Nummer
OPG	Orthopantomograph
OP	Operation
PZR	Professionelle Zahnreinigung
QLF	Quantitative Lichtinduzierte Fluoreszenz

SI-Einheit	Système International d'Unités
Tab.	Tabelle
UV	Ultraviolett
Vol. %	Volumenprozent
WHO	World Health Organization

Physikalische Einheiten

A	Ampere
I	Stromstärke (SI-Einheit Ampere)
μ A	Mikroampere
μ m	Mikrometer
mm	Millimeter
mSv	Millisievert
mW	Milliwatt
nm	Nanometer
R	Elektrischer Widerstand (Ohm)
S	Sekunde
U	Elektrische Spannung (SI-Einheit Volt)
V	Volt

1. Einleitung

1.1 Einführung

Die Karies ist die häufigste Erkrankung der Welt (Benzian et al., 2012). Seit der von Miller (1891) ausgerufenen Theorie über die chemoparasitäre Ätiologie der Karies hielten über die letzten Dekaden vermehrt Präventionsmaßnahmen für alle Altersgruppen (von „Karius und Baktus“ bis hin zur jährlichen kassenbezugsbesuchten Zahnreinigung) Einzug in die Zahnarztpraxen. Im gleichen Maße, in dem sich das Bild der Zahnarztpraxen verändert hat, hat sich auch das Bild der Zahnkaries über die letzten Jahre gewandelt (Institut der Deutschen Zahnärzte, 2016). Kariespräventive Maßnahmen führten zu einer Reduktion der Kariesinzidenz bei Kindern und Jugendlichen (Bille et al., 1986; Marthaler, 1996). Dabei findet sich die Karies in der Majorität in den Fissuren und Grübchen (Kühnisch et al., 2007). Eine verbesserte Mundhygiene und kariespräventive Maßnahmen ließen nicht kavitierte Okklusalläsionen zunehmen (Hannigan et al., 2000). Die frühzeitige Kariesdiagnostik ist damit eine Kernaufgabe des praktizierenden Zahnarztes, wobei das Erkennen einer bakteriellen Besiedlung in der Kavität während und nach der therapeutischen Maßnahme dementsprechend eine große Herausforderung darstellt. Optische Technologien liefern hierfür geeignete Voraussetzungen für die praktische Anwendung in der dentalen Praxis.

Die Zahnkaries ist ein chemisch parasitärer Vorgang, bestehend aus zwei deutlich ausgeprägten Stadien, der Entkalkung respektive Erweichung der Zahnhartsubstanz und der Auflösung des erweichten Rückstandes (Miller, 1891). Dabei beginnt Karies zunächst mit einer nur mikroskopisch sichtbaren Demineralisation des Zahnschmelzes. Eine Dentinläsion besteht nach Fusayama et al. (1966) aus zwei Zonen: einer äußeren Zone, in der sich demineralisiertes und bakteriell besiedeltes Dentin befindet, während in der inneren Zone vitales und remineralisiertes Dentin zu finden ist. Die innere Zone kann daher unabhängig von ihrer Verfärbung oder Härte belassen werden. Jedoch zeigte die theoretische Betrachtung von Fusayama et al. in der klinischen Praxis, dass kariöses Dentin von gesundem Dentin nicht sicher unterschieden werden kann (Anderson et al., 1985). Zahlreiche Studien haben bereits darauf hingewiesen, dass die klinisch und histologisch korrekte Diagnostik von Karies zur Entfernung der kariösen

Bereiche nicht einfach ist (Richards, 2005), da nicht kavitierte Läsionen durch gesundes Dentin maskiert sind (Heinrich-Weltzien et al., 2003). Die invasive Therapie kariöser Läsionen ist nicht immer zwingend notwendig, sondern verschiebt sich im klinischen Alltag eher als dynamischer Prozess mit minimalen Restaurationen bis hin zu nicht invasiven Therapiemaßnahmen (Haak et al., 2015; Haak und Wicht, 2004; Matthijs und Adriaens, 2002). Deshalb ist es notwendig, kariöse Läsionen frühzeitig zu erkennen und durch ein sicheres und reliables Kariesmanagement eine dem Befund angepasste Therapie einzuleiten. Voraussetzung ist hierbei der Einsatz geeigneter diagnostischer Verfahren wie z. B. die klassische Röntgendiagnostik, die elektrische Widerstandsmessung, diverse Färbemethoden oder andere optische Verfahren (Heinrich-Weltzien et al., 2003; Olmez et al., 2006).

1.2 Kariesätiologie

Der lateinische Begriff „caries“ wird mit „morsch sein“ oder „Fäulnis“ übersetzt und wurde früher für pathologische Befunde im Knochen verwendet, bei denen es zu eitrigen Zerstörungen von Knochengewebe kam und sich Einschmelzungen im Knochen bildeten. Die „Caries dentinum“ beruht auf diesem Ausdruck und beschreibt laut World Health Organization (WHO) einen lokalen pathologischen Prozess, der durch exogene Einflüsse zu einer Zerstörung des Zahnschmelzes und der Bildung einer Kavität führt (Baume, 1962). Die häufigste Diagnose bei Zahnhartsubstanzerkrankungen ist die Karies (Stößer, 2006). Sie ist die weitverbreitetste, infektiöse Zahnerkrankung, deren Hauptursache der Stoffwechsel (z. B. Milchsäure) kariogener Bakterien im Mundraum ist. Häufiger Verzehr von kohlenhydrathaltigen oder säurehaltigen Nahrungsmitteln lässt Plaque entstehen; die Grundlage für die Bildung der Karies (Pereira et al., 2009; Terror et al. 2009). König (1987) stellte die Kariesgenese anhand vier interagierender Faktoren dar (Abbildung 1).

Karies ist eine multifaktorielle Krankheit mit sich wiederholenden, gleichen Ausprägungsmerkmalen (Laurisch, 2000). Kariogene Bakterien sammeln sich in der Plaque an (Gängler et al., 2005). Präventive Maßnahmen zielen daher auf eine gute Mundhygiene, um den Bakterien die Retentionsstellen zu entziehen. Durch eine kohlenhydratreiche Ernährung wird den Bakterien genügend Grundsubstanz zur Produktion von Säure geliefert, die wiederum die Zahnhartsubstanz angreift und diese demineralisiert (Hellwig

et al., 2007). Auch die in Lebensmitteln versteckten Säuren führen zu Ätzmustern und Erosionsdefekten in der Zahnhartsubstanz, wie Abbildung 2 am Beispiel des Softgetränkes Cola zeigt.

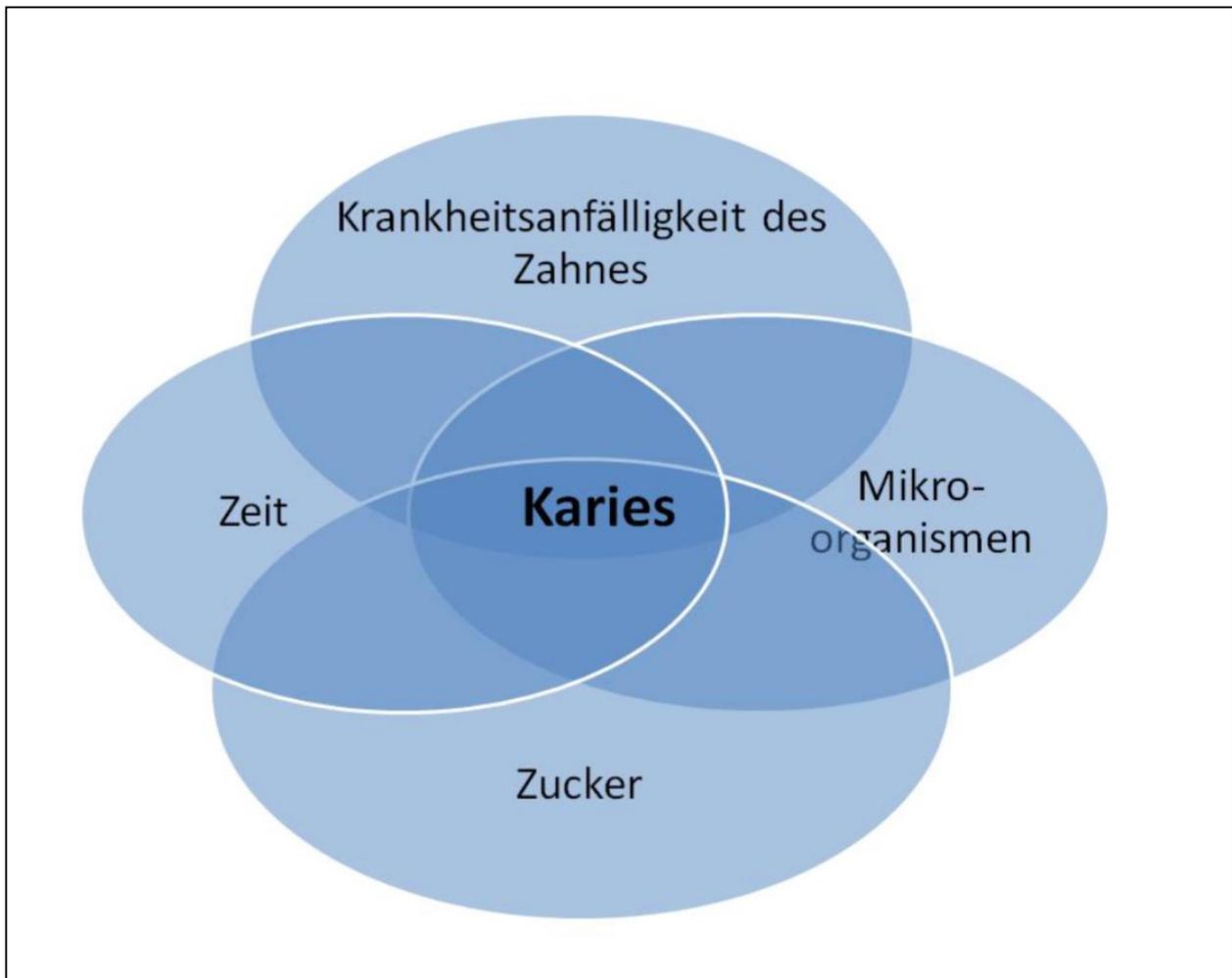


Abb. 1: Darstellung der interagierenden Faktoren als ineinandergreifende Kreise der Kariesgenese nach König (1987). Die Krankheitsanfälligkeit der Wirtszähne, die Mikroorganismen in der Plaque sowie das Substrat in Form von Kohlenhydraten entspricht den drei obligaten Faktoren nach Keyes (1962). Keyes' Modell wurde von König um den Faktor Zeit erweitert.

Der kritische pH-Wert zur Demineralisation des Zahnschmelzes liegt zwischen 5,2 und 5,7 und verhält sich proportional zum Faktor Zeit: Je länger die Säure auf die Zahnhartsubstanz einwirkt, desto größer ist die Demineralisation des Schmelzes. Für die Säurebildung verwenden die Bakterien vorwiegend kurzkettige Zuckermoleküle. Demnach sind diese als am kariogensten einzustufen, z. B. Saccharose und Glucose. Dementsprechend werden langkettige Zuckermoleküle wie z. B. Stärke erst nach der Zucker-

molekülspaltung verwertet, die eine geringere kariogene Wirkung mit sich bringt. Als nicht kariogen werden Zuckerersatzstoffe wie Aspartam, Xylit und Saccharin eingestuft (Schiffner, 1995).

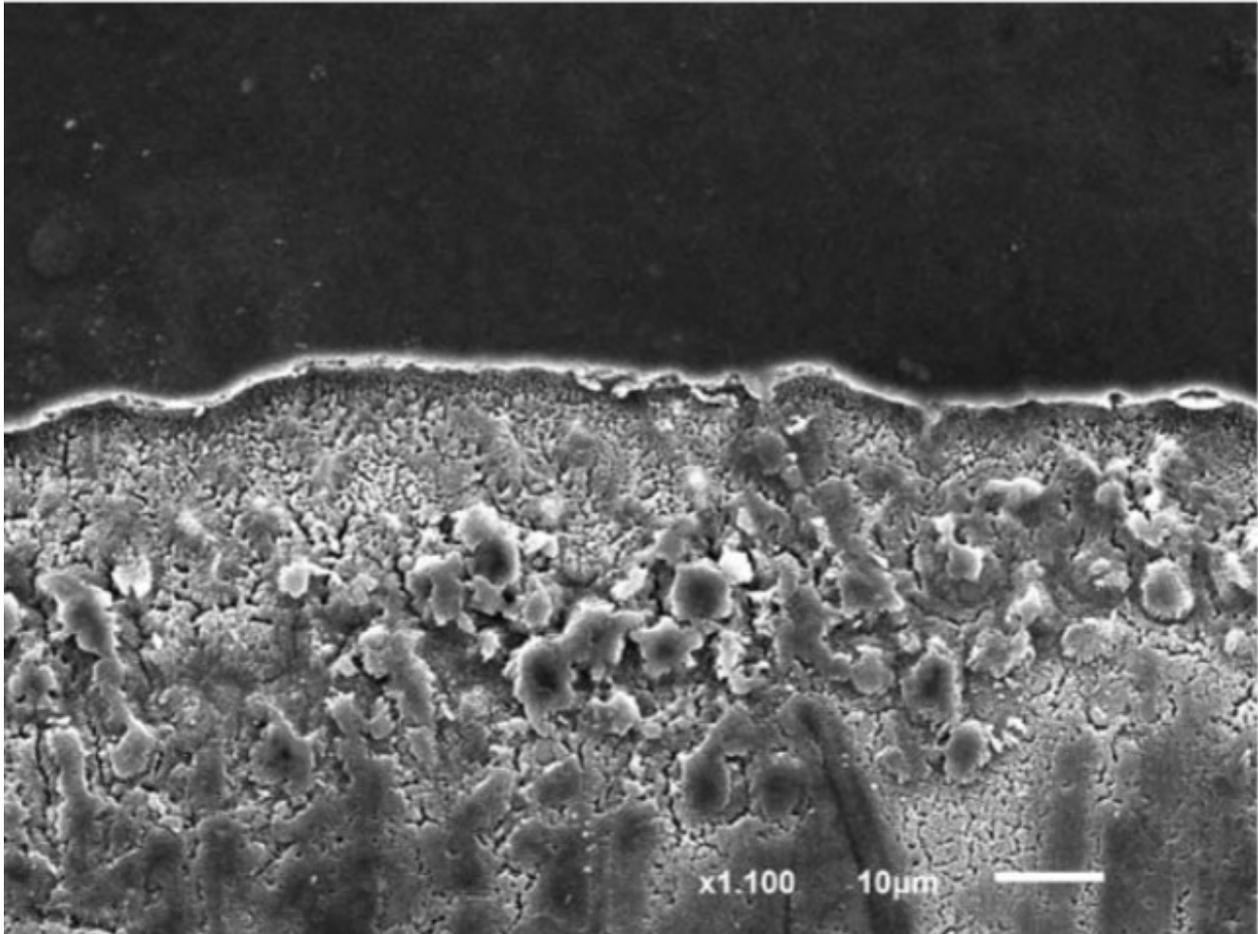


Abb. 2: Ätzmusterähnliche Strukturen einer Zahnversuchsoberfläche in-vitro nach dem Einwirken von Cola (oben Referenzfläche, unten Versuchsfläche) (Grunau et al., 2013).

Durch die enthaltenen Mineralstoffe hat der Speichel neben der bereits beschriebenen säureneutralisierenden Wirkung auch einen remineralisierenden Einfluss und eine Wegspülfunktion. Somit gilt: Je höher die Speichelflussrate, desto geringer ist das Kariesrisiko (Hellwig et al., 2007).

Die Kariesprädispositionsstellen sind als unzugängliche Stellen wie z. B. die Approximalkräume (dargestellt in Abbildung 3), freiliegende Wurzeloberflächen und tiefe Fissuren definiert. Im Rahmen der Kariesprävention nimmt daher die Reinigung dieser Areale einen besonderen Stellenwert ein (Roulett und Zimmer, 2004).

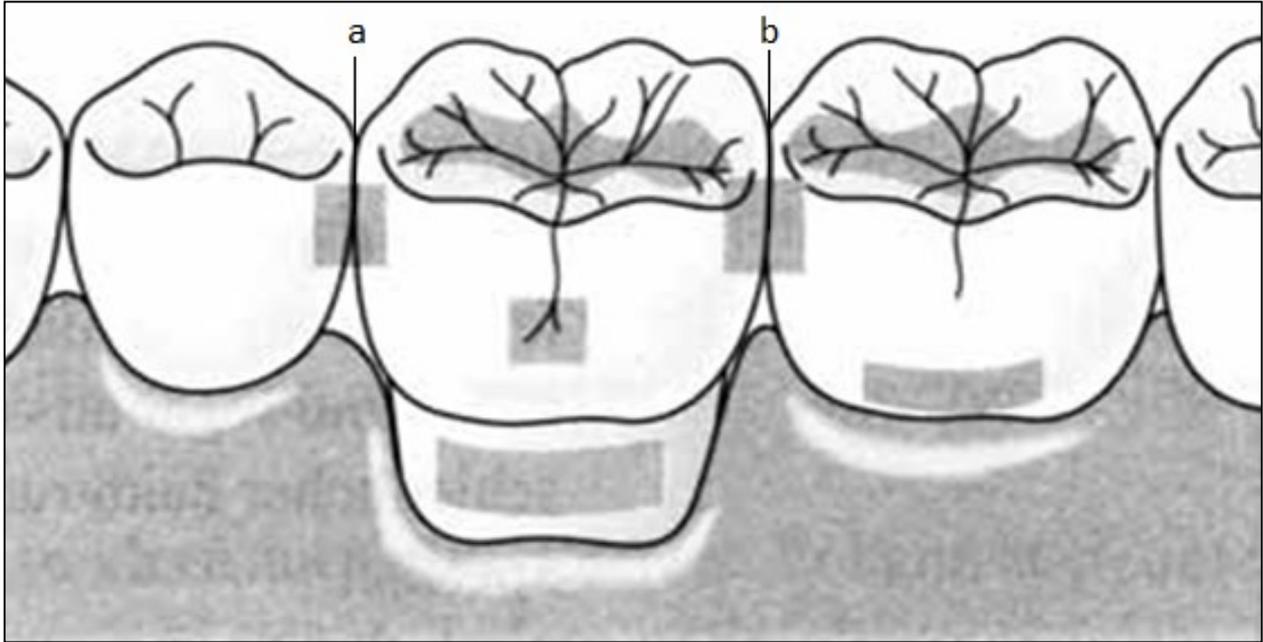


Abb. 3: Die Abbildung zeigt eine vereinfachte Darstellung von Kariesprädispositionsstellen wie z. B. die Approximalräume (a, b). Hier liegen die Zähne stark aufeinander, wobei die Räume nicht zugänglich für die konservative Reinigung mit der Zahnbürste sind. Grau hinterlegt sind zudem auch die Fissuren auf den Kauflächen der Zähne, die zu den Seiten auslaufenden Grübchen und frei liegende Zahnhälsen oder Wurzeloberflächen, die durch zu starken Auflagedruck der Zahnbürste beim Zähneputzen entstehen (Universitätsklinikum Gießen und Marburg, 2022).

1.3 Kariesdiagnostik

1.3.1 Anamnese

Die klinische Diagnostik (von griech. διά-, diá-, „durch-“ und γνώσις, gnôsis, „Erkenntnis, Urteil“) sucht den Allgemeinzustand des Patienten aus medizinischer Sicht zu erfassen und die Unwohlsein verursachende Erkrankung zu erkennen, um hieraus entsprechende therapeutische Maßnahmen ableiten zu können. Die Diagnose bedarf daher einer ausreichenden Sammlung an Informationen aus der Anamnese und einer klinischen Befunderhebung (Rieben und Kielbassa, 2007). Dazu wird in der Regel eine zahnmedizinische Anamnese durchgeführt. Dabei ist stets der Allgemeinzustand des zu behandelnden Patienten zu beachten, um gegebenenfalls Risiken erkennen bzw. ihnen vorbeugen zu können, die einen zahnärztlichen Eingriff beeinträchtigen (Wilde, 2013). Abschließend muss erfasst werden, unter welchen Beschwerden der Patient momentan leidet und welche zu einem früheren Zeitpunkt bereits behandelt wurden (Krause, 2008). Neben zahlreichen konventionellen Verfahren wie der klinischen Inspektion und der

röntgenologischen Untersuchung stehen heute auch optische Diagnosegeräte zur Verfügung.

1.3.2 Visuelle Inspektion

Die visuelle Inspektion wird mit bloßem Auge und Spiegel unter optimalen Lichtbedingungen ausgeführt. Eine Lupe zur Vergrößerung des Visus ist eine anerkannte Vorgehensweise. Offene und sichtbare Läsionen gemäß dem International Caries Detection and Assessment System (ICDAS (Ekstrand et al., 2018), 3-6) sind mit der visuellen Inspektion sicher diagnostizierbar. Unter intaktem Schmelz liegende Läsionen lassen sich mit dieser Methode allerdings nur schwierig erfassen. Heinrich et al. (1991) weisen in ihrer Studie an 186 Patienten im Alter von 12 bis 17 Jahren nach, dass nur 30 % aller Kariesläsionen mittels visueller Inspektion richtig erkannt werden. Die Reproduzierbarkeit liegt unter In-vitro-Bedingungen bei $k = 0,60$ (Peers et al., 1993).

1.3.3 Röntgenologische Kariesdiagnostik

Im Rahmen der Kariesdiagnostik werden für die Befunderhebung standardmäßig radiologische Verfahren wie die Orthopantomographie (OPG), der Einzelzahnfilm und die bilateralen Bissflügelaufnahmen eingesetzt (Ekstrand et al., 2007). Lassen sich zur Befunderhebung und Sicherung der Diagnose die Approximalkontakte der Zähne klinisch nicht beurteilen (besteht eine geschlossene Zahnreihe), so ist es obligat, entsprechende Röntgenaufnahmen anzufertigen.

Anhand der OPG wird eine strukturübergreifende Befundaufnahme durchgeführt, die dank des großen Areals eine gute Darstellung und qualitative Beurteilung der gesamten Bezahnung erlaubt. Angrenzende Nachbarschaftsstrukturen wie Augen- und Kieferhöhlen können ebenfalls befundet werden. Bei der OPG fährt das Gerät um den Kopf des Patienten, wobei die senkrecht ausgerichteten Röntgenstrahlen zu einer gekrümmten Abbildung auf einem geraden Film führen. Dabei kann es aufgrund des Verfahrens zu massiven Überlagerungen bei Zahnzwischenräumen kommen. Daher eignet sich dieses radiologische Verfahren nicht für die Kariesdiagnostik.

Der Einzelzahnfilm konzentriert sich auf einen solitären Zahn, bei dem mit einem ortho-radialen Strahlengang koronale Kariesläsionen beurteilbar werden. Mit einer Bissflügelaufnahme werden die größeren Areale einer Gesichtshälfte erfasst, was es erlaubt, die

Zahnzwischenräume im Prämolaren und Molaren zu beurteilen. In einer Vergleichsstudie von Sonnabend (1990) wurden Orthopantomogramme und Bissflügelaufnahmen miteinander verglichen und es zeigte sich, dass nur 50 % der OPG-Aufnahmen die Kariesläsionen sicher und überlagerungsfrei dargestellt werden konnten.

Wie schon in zahlreichen Untersuchungen nachgewiesen, stellt eine alleinige klinische Diagnose mittels Durchleuchtung der Approximalkontakte durch eine Faseroptik (Fiber-Optic Transillumination, FOTI) keine sichere Kariesdiagnostik dar. Daher werden in der Regel zusätzliche Bissflügelaufnahmen (Paralleltechnik) beider Kieferhälften angefertigt. Der Zentralstrahl muss dabei orthoradial durch den Interdentalraum der Zähne geführt werden, um Überlagerungen zu vermeiden (Hellwig, 1995). Aus diesem Grund werden häufig von jeder Seite Bissflügelaufnahmen angefertigt. Die Radioexposition für eine Bissflügelaufnahme ist äquivalent zur terrestrischen Strahlendosis eines Tages, wobei das Gesamtrisiko an einer durch Röntgenstrahlung ausgelösten Krebserkrankung zu erkranken mit 0,02–0,06 mSv pro 1 Mio. angefertigter Aufnahmen statistisch gewertet wird (European Commission, 2004). Überlappende Approximalflächen können auch bei der Bissflügelaufnahme zu einer falschen Interpretation führen. Dabei kann es nach Mileman et al. (1992) passieren, dass ein kariesfreier Zahn mit intakter Schmelzoberfläche behandelt wird oder dass ausgedehnte Läsionen im äußeren Dentin unterschätzt, während ausgedehnte Läsionen im inneren Schmelzbereich überschätzt werden.

Eine weitere Methode stellt die Mikroradiographie dar. Sie untersucht die Absorption der Röntgenstrahlung durch einen Zahn oder einen Knochen unter In-vitro-Bedingungen. Hierdurch können quantitative Rückschlüsse auf den Mineralgehalt von Dentin und Zahnschmelz gezogen werden. Informationen über die Läsionstiefe, Lokalisation und den Mineralverlust in Vol. % werden dabei erfasst. Sowohl die Bissflügelaufnahme als auch die Mikroradiographie können nicht alle Läsionen vollständig erfassen, sodass jedes Verfahren seine diagnostischen Einschränkungen hat. Abbildung 4 zeigt, dass Karies in Okklusalfächen aufgrund der erhöhten Schichtdicken erst bei umfangreicher Destruktion sicher erfassbar ist.

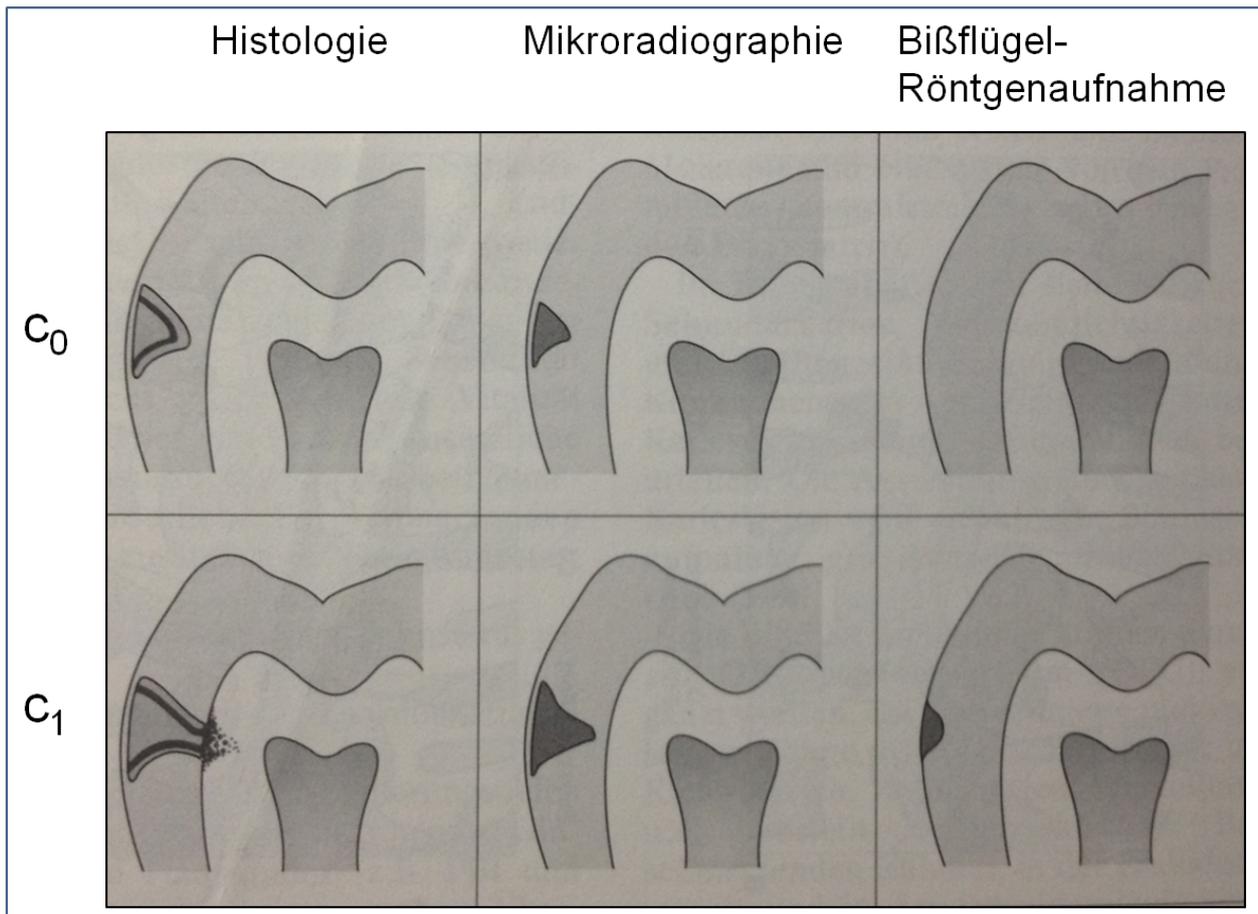


Abb. 4: Schematische Darstellung eines Vergleichs der radiologischen Methoden Mikroradiographie und Bißflügelaufnahme gegen den histologischen Befund einer Probe. Dargestellt sind kariöse Schmelzläsionen in unterschiedlichen Schweregraden; C₀ = keine Demineralisation sichtbar, C₁ = Karies in der äußeren Schmelzschicht sichtbar (Hellwig, 1995).

1.3.4 Klinischer Färbetest als Karies-Detektionsmaßnahme

Neben der klinischen und röntgenologischen Kariesdiagnostik besteht außerdem die Möglichkeit eines klinischen Färbetests. Kariesdetektoren sind Farbstofflösungen, die auf das Dentin aufgebracht werden (z. B. Erythrosin 1 % in Propylenglycol, Caries Detector®/Kuraray, Caries Marker®/Voco, Snoop®/Pulpdent, Seek®/Ultradent), wo sich am Zahn veränderte Zahnhartsubstanzen befinden. Bei den Kariesdetektoren stellt das Lösungsmittel für die Farbstoffe die wichtigere Komponente dar. Meist handelt es sich um Propylenglycol (Kielbassa, 1994). Durch die fortschreitende Demineralisation entstehen im Dentin Poren, deren Größe die Ausmaße der Dentintubuli (ca. 5 µm) überschreitet. Somit kann Propylenglycol aufgrund seiner Molekülgröße in Poren bis zu

einer bestimmten Mindestgröße eindringen und den Farbstoff mitnehmen. Die Porengröße ist daher entscheidend für die Kariesdiagnostik. Gesundes Dentin hat einen geringen Porendurchmesser (Dimensionen der Dentintubuli), wodurch der Farbstoff nicht eindringen kann. Demineralisiertes – also durch Karies erkranktes – Dentin hat einen größeren Porendurchmesser. An diesen Stellen wird der Zahn gefärbt und die veränderten Zahnhartsubstanzen visualisiert (Wilde, 2013). Nach Milton und Wirthlin (1970) binden die Farbstoffe an die organische Matrix kariöser Läsionen an, da Hydroxylapatitkristalle aufgrund der Demineralisierung fehlen.

1.3.5 Elektrische Widerstandsmessung

Als elektrischer Widerstand R (Ohm) wird nach dem Ohm'schen Gesetz das Verhältnis der Spannung U (SI-Einheit V) zur Stromstärke I (SI-Einheit A) definiert. Im zahnmedizinischen Alltag wird die elektrische Widerstandsmessung zur Bestimmung unterschiedlicher Parameter eingesetzt:

1. zur Vitalitätsprüfung (Reynolds, 1966)
2. zur Bestimmung der Länge von Wurzelkanälen (Sunada, 1962)
3. zur Bestimmung der Dentinstärke post präparationem (Gente und Wenz, 1991)

Da ein gesunder Zahnschmelz durch seinen niedrigen Wasseranteil (~12 Vol.%) (Buddecke, 1981) über eine gute elektrische Isolation verfügt, konnte Mumford (1956) einen elektrischen Widerstand von 20 Megaohm zwischen Fissuren und der Pulpa bestimmen. Durch den höheren Wasseranteil hat Dentin (~25 Vol.%) (Buddecke, 1981) eine deutlich höhere elektrische Leitfähigkeit, während kariöse Läsionen besonders niedrige Widerstandswerte aufweisen (Dibdin, 1993). Gleiches gilt für Veränderungen im Schmelz wie bei Schmelzsprüngen oder porösen Strukturen (ebd.). Die Sensitivität bei der Untersuchung von Prämolaren und Molaren auf Karies lag zwischen 0,67 und 0,96, während die Spezifität der Methode zwischen 0,58 und 0,98 lag (Rock und Kidd, 1988; Verdonschot et al., 1993). White et al. (1981) verwiesen schon früher auf den Einsatz dieser Methode im Rahmen des Kariesmonitorings. Während der Messung wird dabei der elektrische Widerstand mittels einer sinusförmigen Wechselspannung von ca. 21 Hz und einer Stromstärke von $0,3 \mu\text{A}$ zwischen der zu untersuchenden Zahnfläche und der Referenzelektrode, die der Patient in der Hand hält, gemessen. Dabei wird das Zahn-

areal luftgetrocknet. Diese Lufttrocknung kann mittels eines definierten Luftausstroms aus der Messsonde standardisiert werden. So werden falsch positiv bewertete Befunde durch einen Stromfluss verursachenden Speichelfilm vermieden.

1.3.6 Transillumination

Ein weiteres Verfahren für den Approximalbereich von Seiten- und Frontzähnen ist die bereits erwähnte Fiber-Optic Transillumination, kurz FOTI. Dabei wird der Zahn mit Licht der Wellenlänge 780 nm (Nahes Infrarot) durchstrahlt. Kariöse Bereiche werden dabei als dunkle Flecken sichtbar. Diese Verfahren beruhen auf dem physikalischen Prinzip der Lichtreflexion und der Lichtstreuung, denn poröse Bereiche weisen aufgrund des erhöhten Wasseranteils eine andere Absorption auf als gesunde Schmelz- bzw. Dentinareale. Daher wird diese Methode auch Diaphanoskopie genannt. Dieses kariesdiagnostische Verfahren ermöglicht lediglich eine visuelle Beurteilung ohne Dokumentationsmöglichkeit. Mit einer digitalen fiberoptischen Transillumination (Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination, DIFOTI) ist es mit einer Charge-Coupled-Device (CCD)-Kamera möglich, den Befund zu dokumentieren. Die Vorteile des Verfahrens liegen in der Kariesdiagnostik von Approximalflächen. Diese Methode erbringt bessere (Stookey et al., 1999), gleich gute (Peers et al., 1993) oder schlechtere (Lussi und Hotz, 1995) Ergebnisse als die Bissflügelaufnahme. Weiterhin sprechen die einfache Anwendbarkeit und die kostengünstige Anschaffung für den zahnmedizinischen Praxisalltag für dieses Verfahren.

1.3.7 Fluoreszenzunterstützte Kariesdiagnostik

Als Fluoreszenz wird das Leuchten von festen Körpern, Flüssigkeiten oder Gasen bezeichnet, die mit Licht einer bestimmten Wellenlänge $\lambda_{\text{Absorption}}$ angeregt werden. Bei dieser Art der Photolumineszenz wird nach Beginn der Anregung (Anregungslebensdauer $< 10^{-8}$ s) die absorbierte Energie E_{Anregung} in Form von Licht einer längeren und somit energieärmeren Wellenlänge $\lambda_{\text{Fluoreszenz}}$ als das absorbierte Licht wieder abgestrahlt. Dabei emittiert jeder Stoff ein charakteristisches Fluoreszenzlicht, um in seinen energetischen Grundzustand zurückzukehren (Abb. 5). Nach der Stokes'schen Regel (Stokes, 1852) entsteht bei diesem Verfahren durch die Abhängigkeit der Fluoreszenzintensität und Emissionswelle bei gleichbleibender Anregungsstrahlung ein

typisches Fluoreszenzspektrum (Slimani et al., 2016). In der fluoreszenzgestützten Kariesdiagnostik werden die Eigenschaften von Bakterien und ihrer Stoffwechselprodukte, in denen z. B. Porphyrine enthalten sind, genutzt. Porphyrine werden u.a. durch energiereiche, blauviolette Strahlung von 405 nm Wellenlänge angeregt. Um den energetischen Grundzustand zu erreichen, senden sie energieärmeres, rotes Licht aus. Buchalla et al. (2008) identifizieren insbesondere Protoporphyrin IX und Coproporphyrin I und II als für das Fluoreszenzlicht verantwortliche Porphyrine, die bereits König et al. (1998) als für die Fluoreszenz verantwortliche Stoffwechselprodukte von Bakterien erkannt haben.

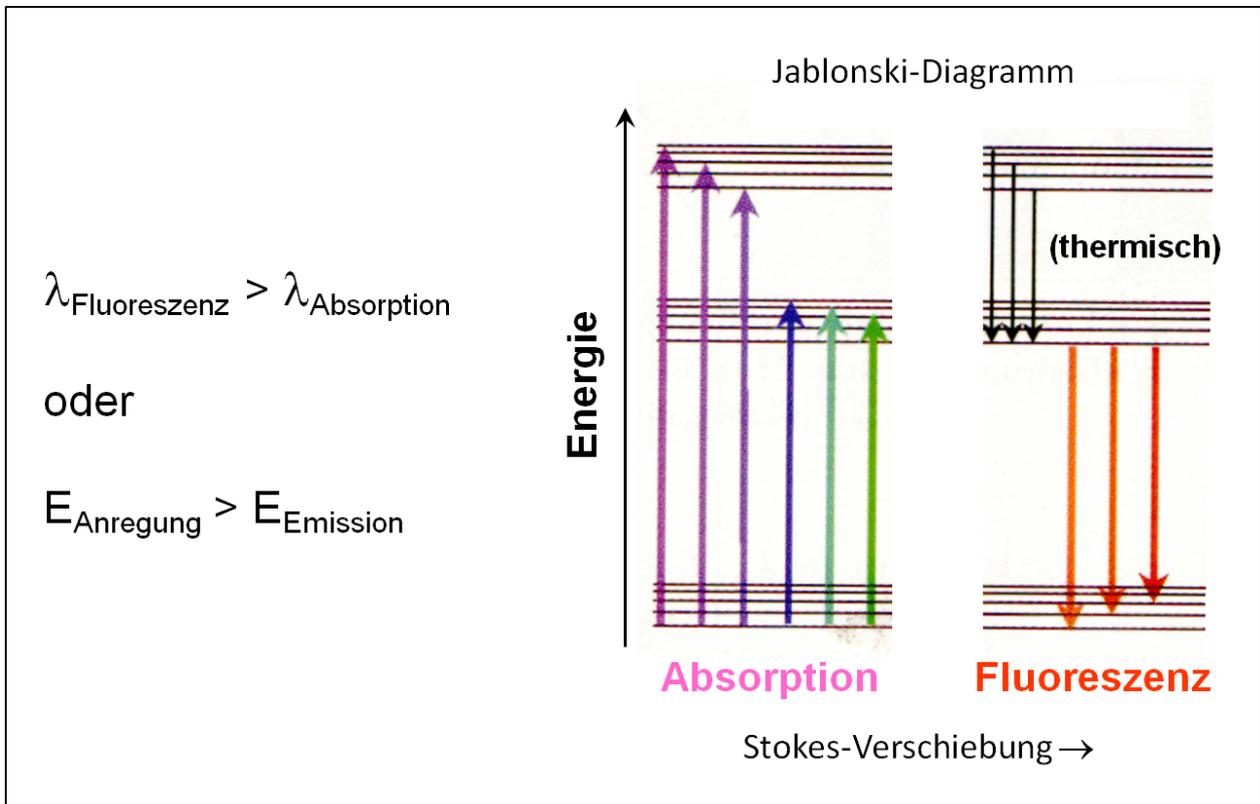


Abb. 5: Darstellung des Fluoreszenzprozesses in der Stokes-Verschiebung bei kurzwelliger Anregung $\lambda_{\text{Absorption}}$ (z. B. ultraviolett, blau, grün) und langwelliger Emission $\lambda_{\text{Fluoreszenz}}$ (rot, nahes Infrarot) (mit freundlicher Genehmigung J. Meister).

Im Gegensatz zur Porphyrinemission nach Fluoreszenzanregung liegt das Fluoreszenz-Emissionsspektrum von gesunder Zahnhartsubstanz im grünen Spektralbereich nach UV-Anregung (Benedict, 1928). Somit lässt sich eindeutig gesunde von erkrankter Zahnhartsubstanz unterscheiden.

1.3.7.1 Quantitative lichtinduzierte Fluoreszenz (QLF)

Bei der quantitativen lichtinduzierten Fluoreszenz (QLF) wird die Differenz der Wellenlängen demineralisierter und remineralisierter Zahnhartsubstanz gemessen und per Software ausgewertet. Bei dieser Methode wird die Zahnoberfläche mit Licht im Wellenlängenbereich 290 nm bis 450 nm bestrahlt und anschließend das emittierte Licht von einer Farbkamera aufgezeichnet und dokumentiert (Pereira et al., 2009). Entstehende Unterschiede in der Fluoreszenzintensität werden mit Filtern und einer Software bearbeitet, sodass sich anhand der Darstellungen der erkennbaren Veränderungen demineralisierten Schmelzes eine Aussage über das Ausmaß kariöser Läsionen treffen lässt. Zahlreiche Studien ergaben Sensitivitätswerte von 0,68 bis 0,91 und Spezifitätswerte zwischen 0,70 und 0,91 (Kühnisch et al., 2006), sodass diese Methode besonders gut für das Monitoring kariöser Ereignisse geeignet ist. Der einzige Nachteil liegt in dem nicht zu vernachlässigen Zeitaufwand für eine diagnostische Maßnahme (Ifland et al., 2004).

1.3.7.2 Intraorales Fluoreszenzkamerasystem zur Kariesdetektion

Die Nutzung intraoraler Fluoreszenzkamerasysteme wie z. B. die VistaProof® oder auch die VistaCam IX® der Firma Dürr Dental SE (Bietigheim-Bissingen) ist eine junge Methode in der Kariesdiagnostik. Im Rahmen des Kariesmanagements werden bei beiden Systemen die zu beurteilenden Zahnflächen nach einer professionellen Zahnreinigung mit der Wellenlänge von 405 nm (blauviolett) durch Leuchtdioden angeregt. Die emittierende Fluoreszenz wird von einem optischen System sensorisch erfasst und von der Herstellersoftware DBSwin® ausgewertet. Auf dem Monitor werden gesunde Bereiche mit grüner Fluoreszenz und die kariösen Läsionen mit einer erhöhten Bakterienbesiedlung mit rotem Fluoreszenzspektrum dargestellt (Thoms, 2006). Die Software rechnet die grün emittierenden Areale gegen die rot emittierenden Bereiche auf und wertet somit den Zerstörungsgrad der Zahnhartsubstanz aus (Eberhart et al., 2007). Die Sensitivitätswerte der Methode entsprechen auf D1-Niveau (Karies in der äußeren Schmelzschicht) einem Wert von 0,75 und auf D3-Niveau (Karies im Dentin) einem Wert von 0,93, während die Spezifität auf beiden Niveautiefen 0,70 bzw. 0,71 beträgt (Rodrigues et al., 2008; Jablonski-Momeni et al., 2014). Diese kariesdiagnostische Erfassung ermöglicht somit die Kavität objektiv zu erfassen und zu

beurteilen. Fissuren- und Glattflächenkaries können nach vorangegangener professioneller Zahnreinigung, Zahn für Zahn zuverlässig visualisiert werden. Abbildung 6 verdeutlicht das Funktionsprinzip der Fluoreszenzerfassung am Beispiel des VistaProof®-Systems.

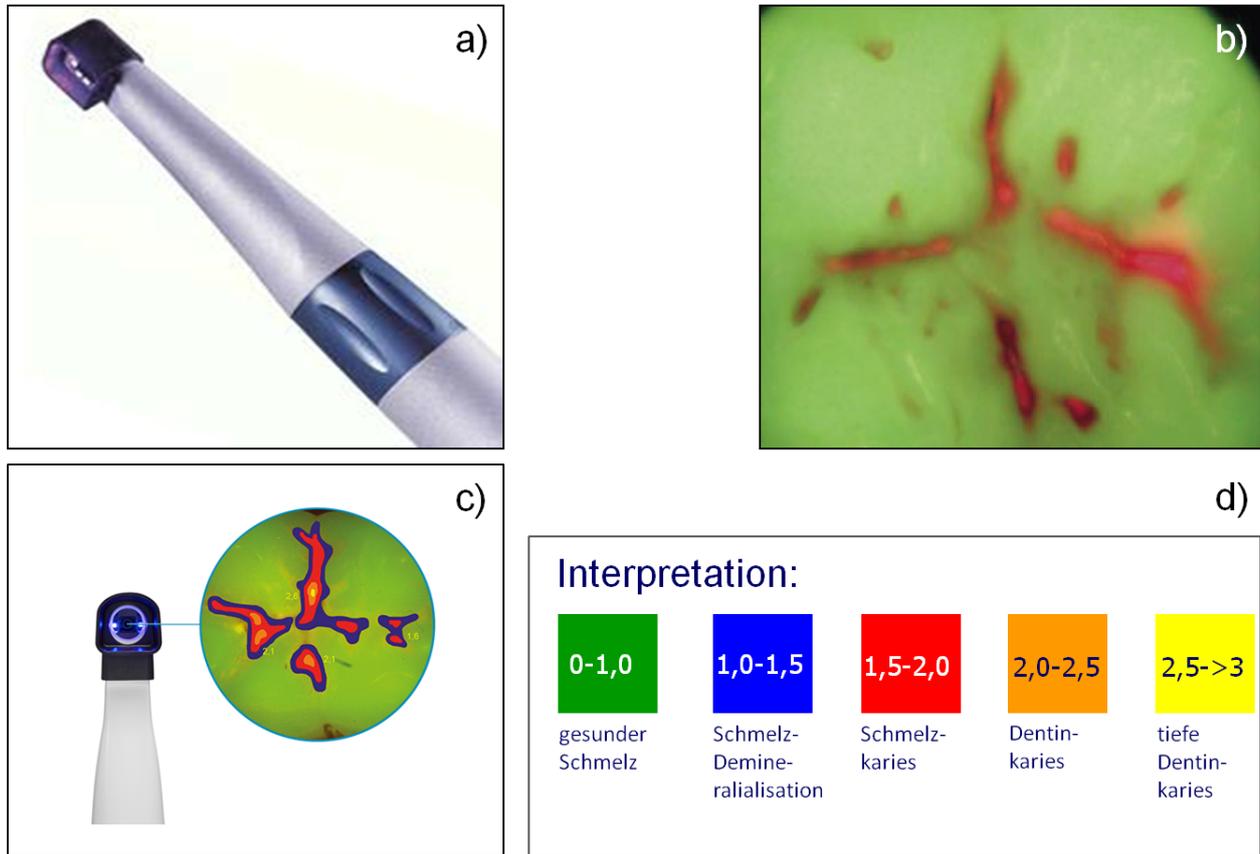


Abb. 6: Funktionsweise des intraoralen Fluoreszenzkamerasystems VistaProof®. Der Sondenkopf des Kamerasystems Abb. 6a) regt mit der Wellenlänge 405 nm die Fluoreszenz der Zahnareale an. Die visuelle Darstellung in der Fluoreszenz zeigt Abb. 6b), grün gesunde Zahnhartsubstanzen, rot kariöse Läsionen. Das mittels der DBSwin®-Software errechnete Vielfarbenbild zeigt Abb. 6c). Die Interpretation des Zerstörungsgrades in der Zahnhartsubstanz verdeutlicht Abb. 6d) (Dürr Dental SE, 2022).

In der Regel wird zunächst eine Plaquedarstellung durchgeführt, die den Status der Mundhygiene offenbart und zur professionellen Zahnreinigung (PZR) motiviert. Nach der Reinigung der Zahnoberflächen werden unsichtbare kariöse Läsionen schnell und sicher nachgewiesen. Sollte eine Behandlung nachweislich erforderlich sein, unterstützt das Kamerasystem die Kariesentfernung, indem der Verbleib von Bakterien intraoperativ im

Fluoreszenzbild geprüft werden kann. Mit dieser Anwendungsbreite ist das System eine hervorragende Ergänzung zum Röntgenbild.

1.3.7.3 Fluoreszenzunterstützte Kariesexkavation

Die klassischen Methoden der Kariesexkavation sind subjektiv und wenig selektiv. Es besteht daher immer die Gefahr, gesundes (bakterienfreies) Dentin zu entfernen oder kariöses (bakteriell infiziertes) Dentin zu belassen. Durch die spezifischen Fluoreszenzeigenschaften der infizierten Bereiche wird nun die Perspektive eröffnet, kariöses Dentin selektiv, also unter größtmöglicher Schonung des gesunden Dentins, zu entfernen. Bei der neu entwickelten Methode der fluoreszenzunterstützten Kariesexkavation (Fluorescence-Assisted Caries Excavation, FACE) wird die Zahnoberfläche während der Exkavation aus dem Winkelstück heraus mit blau/violetttem Licht beleuchtet. Beim Betrachten durch ein spezielles Filterglas fluoresziert kariöses Dentin intensiv rot und kann gut von grün fluoreszierendem, gesundem Dentin unterschieden werden (Lakowicz, 2006). Die Darstellungen in Abbildung 7 zeigen die Vorteile, die sich durch eine fluoreszenzunterstützte Kariesexkavation ergeben.

Dies ermöglicht es, kariöses Dentin unter ständiger Sichtkontrolle zu entfernen. Untersuchungen haben gezeigt, dass die Intensität des roten Fluoreszenzlichtes gut mit der Größe der bakteriellen Infektion korreliert. Lennon et al. (2002, 2006a, 2007) und Ganter et al. (2014) untersuchten ebenfalls die unterschiedlichen Karies-Detektionsmethoden und verglichen diese. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass die bestmögliche Kombination von Kariesdetektion und Exkavation die FACE sei (Lai et al., 2014). Somit kristallisiert sich FACE in den Studien um Lennon et al. sowohl als die eindeutigste und zugleich effizienteste als auch die alltags- und praxistauglichste Methode der Kariesdetektion heraus. Die Effizienz dieser Methode zeigt sich auch in einer verkürzten effektiven Behandlungsdauer (Abbildung 8).

In einer Folgestudie kamen Lennon et al. (2007) weiterhin zu dem Ergebnis, dass durch den Einsatz der fluoreszenzunterstützten Kariesdetektion die Behandlung kariöser Zähne im Verhältnis zum abgetragenen befallenen Dentin, ohne die Kavität signifikant zu vergrößern, effektiver ist als mit anderen, konventionellen Methoden.

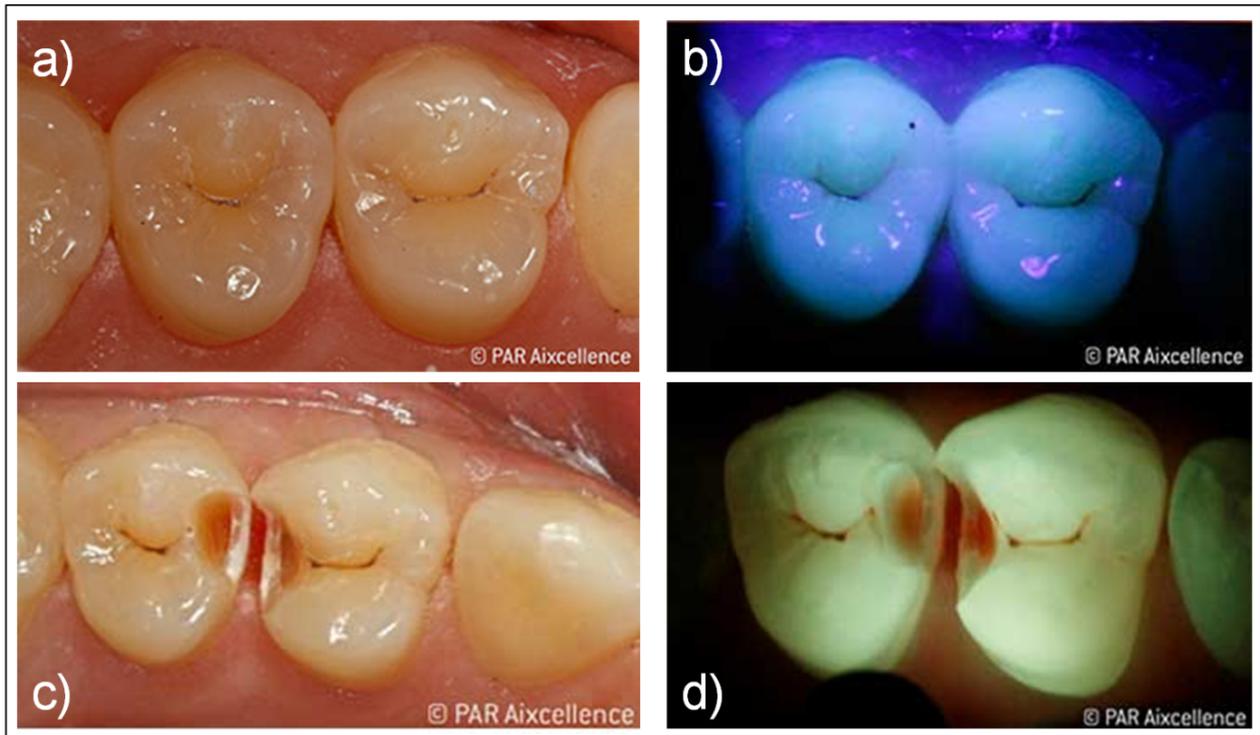


Abb. 7: Darstellung der klinischen Situation vor und nach der Kavitäteneröffnung mit FACE. Abb. 7a) zeigt die klinische Ausgangssituation ohne erkennbare Karies. Die Beleuchtung mit FACE zeigt lediglich Veränderungen in der Opazität (Abb. 7b)). Nach Kavitäteneröffnung ist die Karies visuell deutlich erkennbar (Abb. 7c)). Mittels FACE lässt sich durch die Anregung der Porphyrine der Bereich des veränderten Dentins deutlich von der gesunden Zahnhartsubstanz differenzieren (Abb. 7d)) (W&H, 2022).

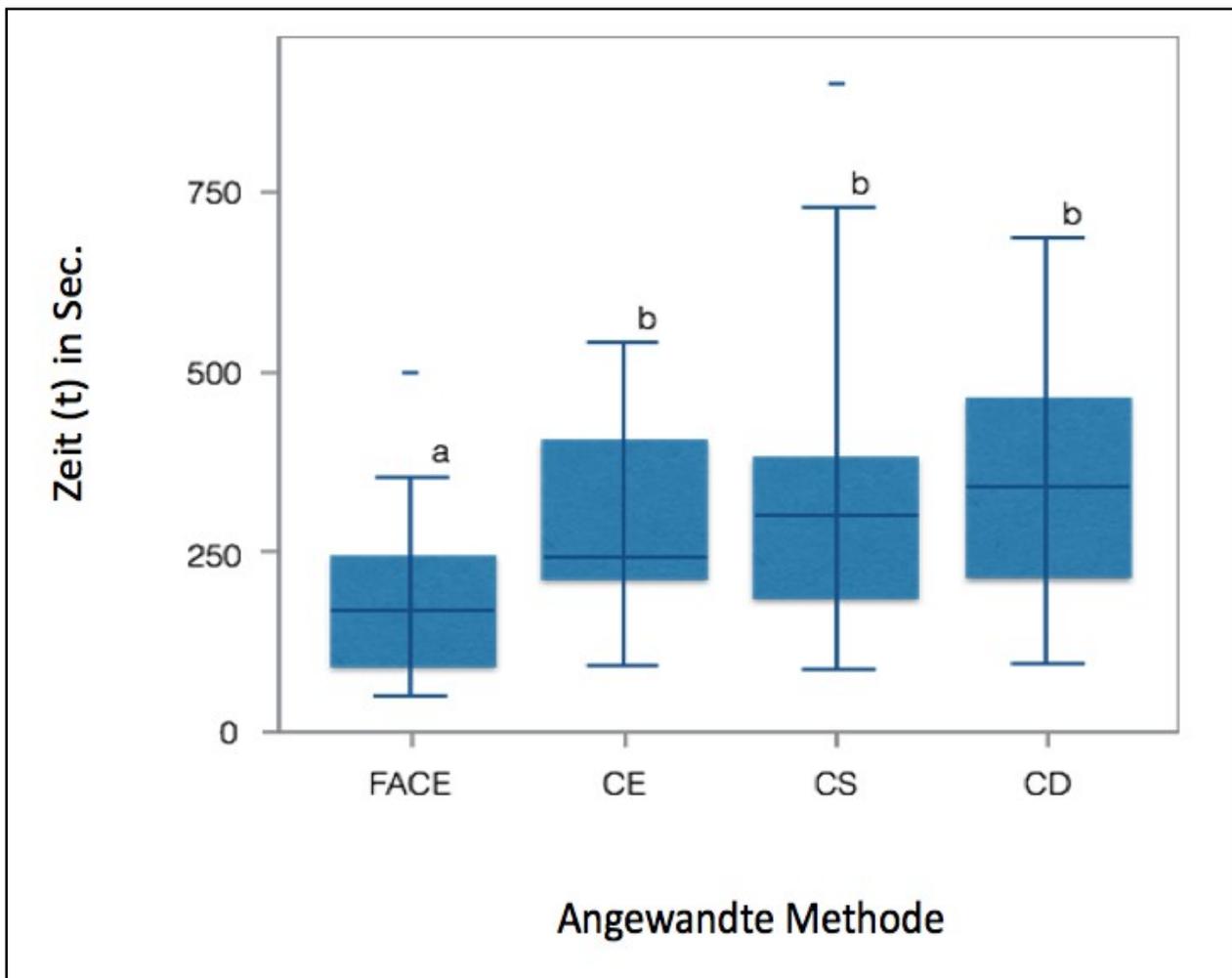


Abb. 8: Exkavationszeiten verschiedener Methoden nach Lennon et al. (2006a). Die Grafik zeigt die Behandlungsdauern der Kariesexkavation unter Zuhilfenahme der unterschiedlichen Detektionsmethoden.

FACE: Fluorescence-Aided Caries Excavation, CE: Conventional excavation, CS: Chemomechanical excavation, CD: Caries-Aided Excavation.

1.4 Kariesexkavation

Das Krankheitsbild der Karies ist heute sowohl bei den unter 12-Jährigen als auch bei den jüngeren Erwachsenen (35 – 44-Jährige) deutlich rückläufig (Institut der Deutschen Zahnärzte, 2016). Jedoch betrifft die Prävalenz tiefer kariöser Läsionen bei starker Kariesverteilung insbesondere die soziodemografisch und ökonomisch benachteiligten Bevölkerungsschichten (Decerle et al., 2013), was sowohl in einem nicht unerheblichen Maße zu einer Einschränkung der Lebensqualität als auch zu einem spürbaren volkswirtschaftlichen Schaden der Betroffenen führt (Leal et al., 2013).

Zur Restauration der Zähne mit alloplastischen Materialien wird klassischerweise eine vollständige Entfernung allen demineralisierten und mit Bakterien besiedelten Dentins angestrebt. Doch eben jene Vorgehensweise wird zunehmend von Autoren angezweifelt. So zeigten Lager et al. (2003), dass eine vollständige Exstirpation aller Bakterien unter Zuhilfenahme etablierter sowie konventioneller Nachweisverfahren nicht möglich ist. Weiterhin hat sich die Ansicht der nach Keyes (1962) installierten Plaquehypothese dahingehend geändert, dass Studien nun hinterfragen, ob das kariöse Geschehen nicht das Ergebnis einer bestimmten ökologischen Umgebung mit z. B. starker Zufuhr fermentierbarer Kohlenhydrate ist (Marsh, 2006). Nach diesem Modell wäre nicht die vollständige Eliminierung allen kariogenen Materials der primäre Endpunkt der Therapie, sondern vielmehr das Monitoring bestehender Bakterienaktivitäten und/oder Läsionen. Folglich lässt sich ein primärer Endpunkt bei der Kariesentfernung nicht eindeutig definieren (Buchalla und Lennon, 2015). So bemerken Schwendicke et al. (2018), dass es keine ausreichenden Belege dafür gibt, eine spezifische Methode zur Entfernung kariösen Gewebes zu empfehlen. Zudem muss in Pulpanähe keine harte Dentinschicht bei der Exkavation mehr erreicht werden. Stattdessen sollten die Exkavationskriterien sich an den klinischen Anforderungen und Ergebnissen orientieren (Schwendicke et al., 2015).

Somit wird dem palliativen Charakter vollständiger Dentinentfernung durch ein modernes Kariesmanagement dahingehend Rechnung getragen, indem non- und mikroinvasive Behandlungen ebenso angewandt werden wie die selektive Kariesexkavation für eine anschließende restaurative Maßnahme. Die Abstimmung mit einem optimalen Monitoring, um die Kariesläsionen bzw. den Biofilm auf der Zahnoberfläche zu kontrollieren, gewährleistet ein kausales Therapiekonzept (Schwendicke und Paris, 2014).

1.4.1 Kariesexkavation unter klinischen und histologischen Aspekten

Ein Ziel der restaurativen Zahnheilkunde besteht darin, kariöse Zahnhartsubstanzen zu beseitigen und den resultierenden Defekt mit einem möglichst randdichten Füllungs-material zu restaurieren. Dabei werden heute die Kariesaktivität, Motivierbarkeit und das Ernährungsverhalten des Patienten berücksichtigt. So werden bei Patienten mit geringer Kariesaktivität und entsprechendem kariesprophylaktischen Verhalten initiale Karies-

läsionen nicht immer mit einer Füllung versorgt, da sie remineralisieren können. Eine manifeste Karies muss jedoch vollständig entfernt und die resultierende Kavität gefüllt werden. Black (1908) teilte die Kavitäten in folgende Klassen ein:

- Klasse I: Zentrale Kavitäten im Bereich der Fissuren und Grübchen
- Klasse II: Approximale Kavitäten an Prämolaren und Molaren
- Klasse III: Approximale Kavitäten an Frontzähnen ohne Einbeziehung der Schneidekanten
- Klasse IV: Kavitäten der Frontzähne unter Einbeziehung der Schneidekante
- Klasse V: Zahnhalskavitäten

Für die Primärpräparation dieser Kavitäten galten die Präparationsregeln nach Lehmann und Hellwig (2012). Jede Kavität besitzt eine Retentions-, Umriss-, Widerstands- und Extensionsform. Diese Regeln wurden jedoch abhängig vom Restaurationstyp modifiziert, sodass auf Details bei der Ausführung dieser Präparationsgrundsätze bei den einzelnen Füllungsmaterialien eingegangen wird. In einer Sekundärpräparation werden die kariösen Zahnhartsubstanzen exkaviert, die Kavitätenränder geglättet, finiert und die Kavität gesäubert. Zur Kavitätengestaltung und zum Exkavieren werden maschinell getriebene Werkzeuge, sonoerosive und oszillierende Handinstrumente, verwendet (Lehmann und Hellwig, 2012).

Primäre Ziele der zahnärztlich-restaurativen Maßnahmen sind Kariesentfernung, Schutz vor weiterer Karies, die Erhaltung der gesunden Pulpa und die Wiederherstellung der Funktion der Zahneinheit. Schwendicke et al. (2016) konkretisieren hierbei, dass sich die erste Priorität als Erhaltung der Vitalität und der Integrität der Pulpa bei minimal invasiver Kariesentfernung darstellt.

Kariöse Zahnhartsubstanzen werden klassisch mit langsam laufenden, rotierenden Bohrern oder in Pulpanähe mit speziellen Handinstrumenten exkaviert. Hierbei ist eine relative Trockenlegung erforderlich. Wurde z. B. auf einer diagnostischen Röntgenaufnahme eine tiefe Dentinkaries festgestellt, die bis in die Nähe der Pulpa reicht, ist eine absolute Trockenlegung vorzuziehen, da die Karies vollständig entfernt werden

sollte. Reicht erweichtes Dentin bis zur Pulpa, so ist die Pulpa bereits bakteriotoxisch geschädigt. Bereits erweichtes Dentin darf daher nicht belassen werden (Rohrbach und Egli, 2005). Die finale Beurteilung einer erfolgreichen Kariesentfernung ist jedoch außerordentlich problematisch. Klinisch gilt eine Exkavation als abgeschlossen, wenn eine spitze zahnärztliche Sonde auf dem verbleibenden, harten Dentin ein klirrendes Geräusch „Cri dentaire“ („Zahnschrei“) verursacht. Oft ist dieses verbleibende Dentin verfärbt und kann durchaus noch mit kariogenen Mikroorganismen infiziert sein. Es sollte jedoch belassen werden, um die vitale Pulpa nicht zu gefährden (Rock und Kidd 1988).

Als zusätzliches Hilfsmittel zur Kariesentfernung dient eine Färbelösung (Karies-detektor), die allerdings nur infiziertes kariöses Dentin mit zerstörter Kollagenstruktur anfärbt. Das bedeutet, dass nicht kariöses Dentin nicht angefärbt wird. In diesem Fall muss so lange exkaviert werden, bis sich die Zahnhartsubstanz nicht mehr färbt und somit kein kariöses Dentin mehr angezeigt wird (Hellwig et al., 2007, Lussi und Schroeder, 1998). Nach der Exkavation wird die Kavität mit Wasser, physiologischer Kochsalzlösung oder Chlorhexidinglukonat gereinigt und anschließend getrocknet. Ist Karies bis weit in das Dentin eingedrungen, verbleibt nach der Exkavation oft nur noch eine dünne Dentinschicht über der Pulpa. Durch Aufbringen geeigneter Therapeutika kann versucht werden, eine Reizdentinbildung zu induzieren, um die Dentinbarriere über der Pulpa zu verstärken (Abbildung 9).

Neben der indirekten Überkappung wird von einer direkten Überkappung gesprochen, wenn eine Pulpa artifiziell (z. B. beim Präparieren) oder durch ein Trauma punktförmig eröffnet wird und klinisch keine Anzeichen einer Entzündung der Pulpa (Pulpitis) vorliegen. Wird die Pulpa beim Exkavieren einer tiefen Karies eröffnet, ist der Erfolg einer direkten Überkappung infrage zu stellen, da wahrscheinlich Bakterien in die Pulpa eingedrungen sind und dabei zu entzündlichen oder degenerativen Veränderungen geführt haben. Die direkte Überkappung ist eine endodontische Behandlung und wird unter absoluter Trockenlegung durchgeführt. Wie bei der indirekten Überkappung sollte auch bei einer direkten Überkappung durch Applikation von Kalziumhydroxid die Bildung einer Reizdentindecke im Bereich der geöffneten Pulpa induziert werden, um den Zahn vital zu erhalten. Sowohl bei der direkten als auch bei der indirekten Überkappung wird

nach vollständiger Kariesentfernung die Kavität mit einem Füllungsmaterial definitiv verschlossen (Lehmann et al., 2009a).

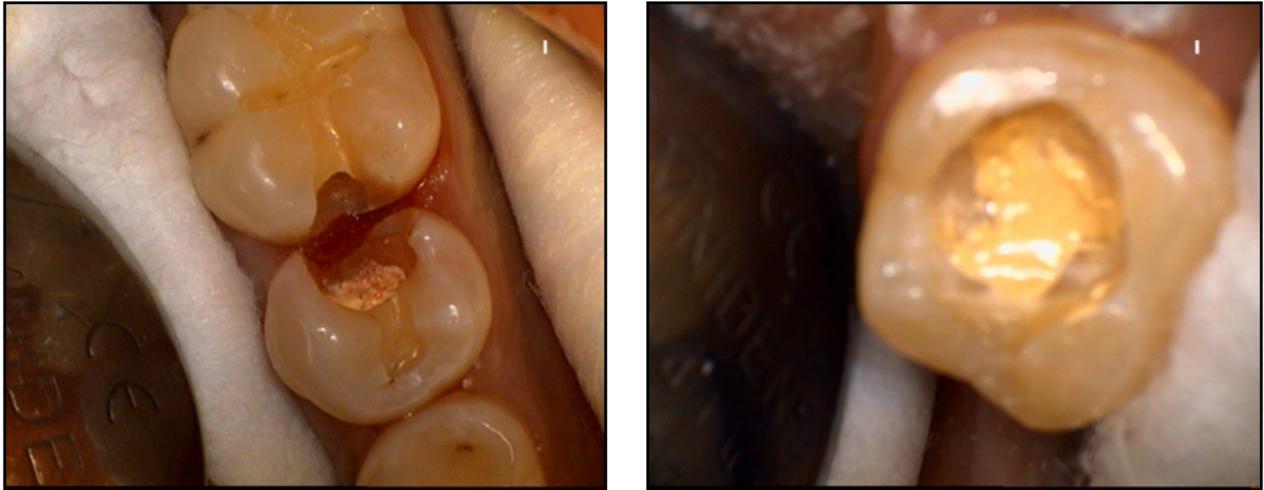


Abb. 9: Intraorale Kameraaufnahme von Zahn 37 (links) und Zahn 45 (rechts) mit indirekter Überkappung.

Durch die Präparation und Exkavation entsteht eine Dentinwunde, die mit einem geeigneten Dentinwundverband abgedeckt werden muss. Der Dentinwundverband hat die Aufgabe, die Pulpa vor chemischen, thermischen und bakteriellen Reizen zu schützen. Außerdem soll er verhindern, dass Dentinliquor aus den Dentinkanälchen ausströmt (Hellwig et al., 2007). Bei sehr tiefen Kavitäten und um bei Einlagefüllungen unter sich gehende Stellen auszublocken, kann als Dentinwundverband eine Unterfüllung verwendet werden. In allen sonstigen Fällen kann auch ausschließlich auf ein Dentinhaftmittel zurückgegriffen werden, der Dentinwundverband muss jedoch das gesamte Dentin bedecken (Lehmann et al., 2009b).

1.4.2 Die Kariesexkavation – Metall-Exkavationsinstrumente

Kariöse Läsionen können nach der konventionellen Art mit unterschiedlichen Instrumenten, sogenannten Exkavatoren, und Methoden entfernt werden. Handelt es sich bei der Behandlung um sehr weiches Dentin, um eine Kinderbehandlung oder sehr ängstliche Patienten, so kann die Läsion mit einem scharfen Löffel entfernt werden. In der Majorität der Fälle wird jedoch eine maschinelle Behandlung mit einem Rosenbohrer oder mit einem anderen, per Mikromotor betriebenen Exkavator vorgenommen. Rotierende Instrumente zu benutzen, ist für den behandelnden Arzt weniger anstren-

gend, als einen Handexkavator anzuwenden, der eine Alternative zur Behandlung in Entwicklungsländern darstellt (Yip und Samaranayake, 1998). Bei dem Rosenbohrer handelt es sich im eigentlichen Sinne um eine nach DIN 8580 genormte Fräse mit geometrischen Schneidkanten, die rund und gewendelt sind. Die Umdrehungsgeschwindigkeit beträgt dabei 500–4500 Umdrehungen pro Minute. Die Vorteile der Kariesexkavation mit Rosenbohrer liegen in der Effizienz bei niedrigem Anschaffungspreis und einer simplen Handhabbarkeit für den praktischen Zahnarzt. Nachteile des Exkavators liegen in den angstassoziierten Parametern des Geräusches, den Vibrationen und den damit einhergehenden Schmerzen. Zudem besteht die Gefahr einer Überexkavation, da der Bohrer selbst gesundes von kariösem Dentin nicht zu unterscheiden vermag (Banerjee et al., 2000). Ebenso besteht ein Risiko für eine thermische Schädigung der Pulpa durch die hohen Umdrehungszahlen.

1.4.3 Die Kariesexkavation – Nicht-Metall-Exkavationsinstrumente

1.4.3.1 CeraBur®

Der CeraBur®-Keramikbohrer (Abbildung 10a), bestehend aus Zirkoniumdioxid, wurde 2003 sowohl für die Bearbeitung von kariösem Dentin als auch zur Kariesexkavation auf dem Markt eingeführt. Aufgrund vergleichbarer Härtewerte mit herkömmlichen Hartmetall-Rosenbohrern lässt sich nach Dammaschke et al. (2008) ein vergleichbares Abtragsverhalten im Dentin erwarten, was im Gegensatz dazu eine selektive Kariesexkavation in Frage stellt. Ungeachtet vergleichbarer invasiver Abtragseigenschaften kommen Neves et al. (2011) trotzdem zu dem Schluss, den CeraBur®-Keramikbohrer als zahnhartsubstanzschonend einzustufen.

1.4.3.2 Polymerbohrer

2003 wurde an der Temple Universität in Philadelphia und von der Fa. SS White Burs die erste Generation von Polymerbohrern unter dem Produktnamen SmartPrep entwickelt und auf dem Markt eingeführt. Erste Untersuchungen von Dammaschke et al. (2006a) sowie Prabhaker und Kiran (2009) konnten hier die Vermeidung einer Überexkavation im pulpanahen Bereich klinisch nachweisen.

Der PolyBur® P1, Patent: DE1020080 10049B3, eingeführt 2011, ist wie in Abbildung 10b) dargestellt der Polymerbohrer der letzten Generation, der bei schonenden

Kariesexkavationen im Bereich der Pulpa eingesetzt werden kann. Er dient rein der kariösen Dentinentfernung und stellt hinsichtlich seiner Wirksamkeit kein Ersatz für den klassischen Rosenbohrer dar (Lohmann et al., 2019). Die Materialbeschaffung erlaubt nur den Abtrag von weichem Dentin, bei gesundem, hartem Dentin stumpft er automatisch ab und stoppt im Sinne einer Selbstlimitierung den Exkavationsprozess, womit die notwendigen 0,5–0,7 mm des pulpanahen Dentins erhalten bleiben sollen (Komet Dental, 2023). Eine Unterschreitung dieser Grenze macht eine Wurzelkanalbehandlung meistens unumgänglich.

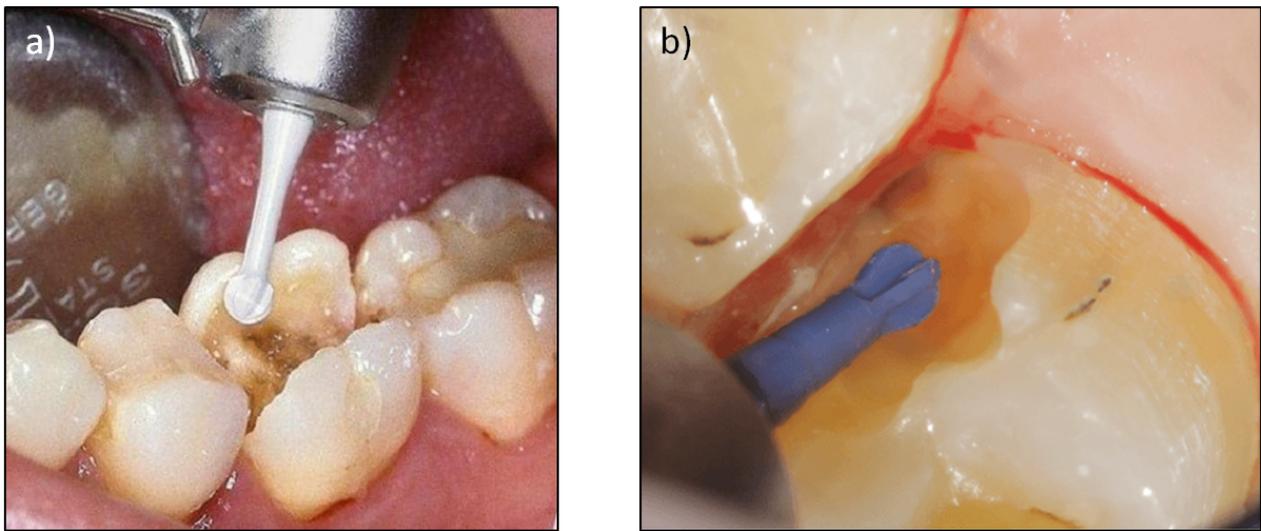


Abb. 10: Abbildung 10a) zeigt das System CeraBur®, Abbildung 10b) das System PolyBur® im Einsatz (Henry Schein, 2023).

Da die Oberfläche des Dentins nach dem Abtragen der Karies nicht der gewohnten Härte entspricht, kann die klassische Kontrolle der Dentinoberfläche anhand der Sonde nach der Behandlung zu keinem aussagekräftigen Ergebnis führen. Es kann kein eindeutiges Klirren, der sogenannte „Crie dentaire“, wahrgenommen werden. Lediglich Kratzspuren auf der Dentinoberfläche lassen sich nachweisen (Damaschke et al., 2006b).

1.5 Ziel der Untersuchung

Unter Berücksichtigung der bis hierher aufgeführten technischen Möglichkeiten war das Ziel dieser klinischen Untersuchung sowohl die Funktionalität als auch die Kombination der fluoreszenzunterstützten Kariesexkavation (FACE) bei gleichzeitigem Einsatz der

Polymer-Bohrer-Technologie im Rahmen eines optimierten Kariesmanagements in der zahnärztlichen Praxis zu überprüfen.

Als Null-Hypothesen werden folgende Annahmen definiert:

1. Mit Hilfe der FACE-Technologie als Diagnoseverfahren (SIROInspect®) lässt sich vor, während und nach der therapeutischen Maßnahme das Vorhanden- bzw. nicht-Vorhandensein kariöser Zahnhartsubstanz nachweisen.
2. Mit dem verwendeten Polymer-Bohrer-System lässt sich im pulpanahen Bereich die zu entfernende kariöse Zahnhartsubstanz vollständig entfernen.

2. Material und Methoden

Gemäß der allgemein formulierten Zielvorgabe soll das gewählte Studiendesign die Exkavationsergebnisse, die mittels FACE (Rankovic, 2021) anhand des SIROInspect® und des Polymer-Bohrsystems PolyBur® erzielt wurden, konkretisieren, sodass ein praxisrelevantes Resümee zur Funktionalität und Tauglichkeit dieser Instrumente gezogen werden kann.

Zusätzlich wurde eine visuell-taktile Sondierung mit einer zahnärztlichen Sonde durchgeführt, um die Exkavationsergebnisse hinsichtlich Kariesentfernung mittels PolyBur® und Kariesdetektion mittels SIROInspect® zu verifizieren. Bis dato stellt die Sonde die am weitesten verbreitete diagnostische Maßnahme zur Kariesdetektion dar (Lehrstandard (Haak et al., 2015), jedoch mit rückläufiger Tendenz (Neuhaus et al., 2009)) und wurde somit zum Vergleich mit herangezogen.

Alle in dieser Untersuchung verwendeten Hilfsmittel sind zugelassene Medizinprodukte, die in der Routine der Kariestherapie gemäß den Anwendungsrichtlinien (Herstellerangaben) state-of-the-art eingesetzt wurden. Die Daten wurden retrospektiv entsprechend den Vorgaben des Studiendesigns aus einem Datensatz der Praxisdokumentation entnommen.

2.1 SIROInspect®

Das SIROInspect® der Firma Dentsply Sirona (Dentsply Sirona Deutschland GmbH, Bensheim, Deutschland) basiert auf der Methode der fluoreszenzunterstützten Kariesexkavation (Fluorescence-Assisted Caries Excavation, FACE) und ist eine weitere Methode, anhand der Fluoreszenzeigenschaften der Abbauprodukte der Kariesbakterien von Karies befallenes Dentin zu identifizieren. Mittels Lichtsonde und einer Filterbrille (Abb. 11) kann die Sonde während einer Exkavation durch Differenzierung von Farben, die durch den Filter der Brille erkennbar werden, Karies oder Restkaries kenntlich machen, die durch eine normale Behandlung vom Zahnarzt eventuell nicht mehr diagnostiziert werden könnte. Die Strahlleistung der integrierten Leuchtdiode des Geräts beträgt zwischen 60 und 250 mW. Die emittierte Wellenlänge liegt bei 405 nm. Weiterhin stehen Lichtleiter mit Krümmungen von 90 ° bzw. 140 ° bei einem

Durchmesser von 5 mm zur Verfügung. Die Diagnosefilter (Brille bzw. Aufsteckfilter) blockieren die Strahlanteile unterhalb 500 nm. Das SIROInspect® dient somit als visuelle Erkennungs- bzw. Kontrollhilfe und ermöglicht den Einsatz vor, während und nach der Exkavation.

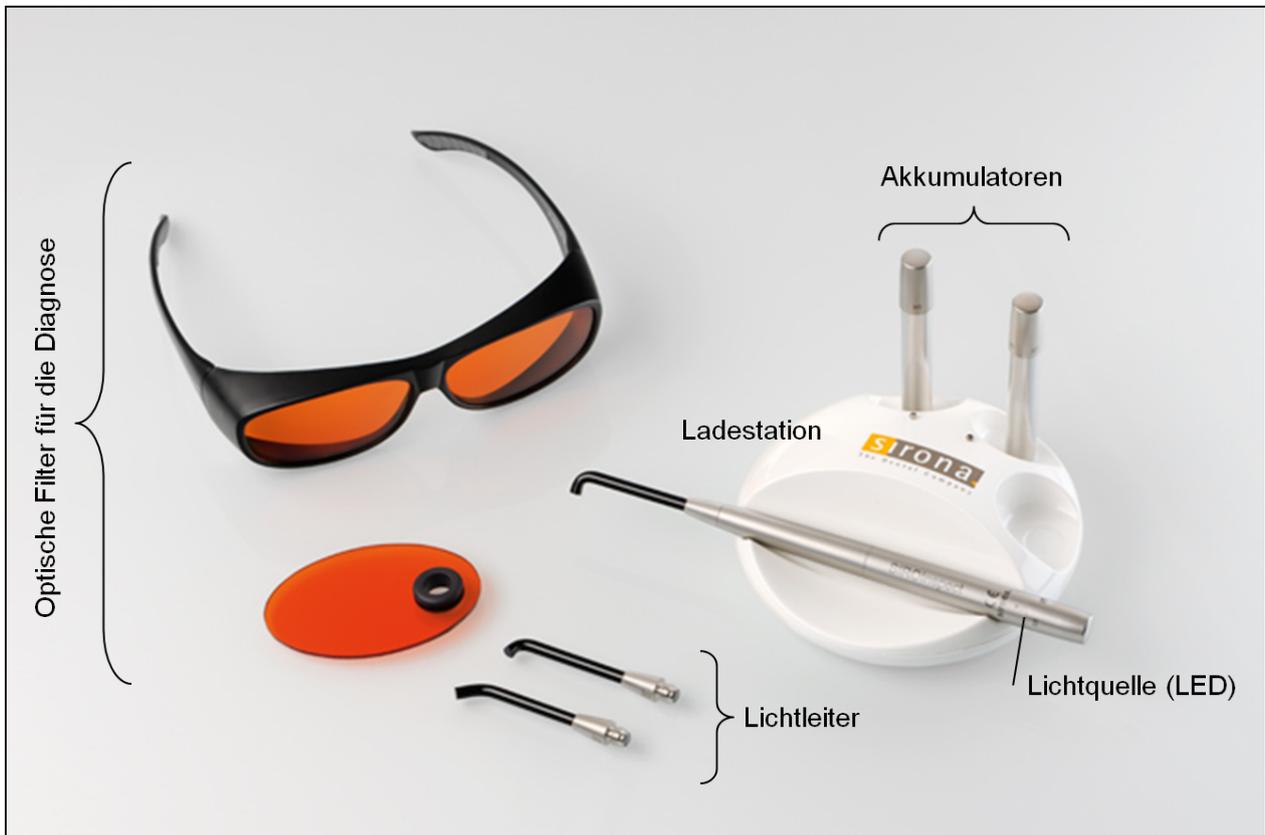


Abb. 11: Zubehör des SIROInspect®-Systems (modifiziert nach Augenstein und Frentzen, 2016).

2.1.1 Anwendung

Der von Karies befallene Zahn muss vor der Zuhilfenahme des SIROInspect®-Gerätes zunächst mit einem rotierenden Instrument (z. B. Diamantbohrer) freigelegt werden. Von Karies befallenes und gesundes Dentin lassen sich erst differenzieren, nachdem die Kavität freigelegt worden ist. Das SIROInspect®-Gerät zeigt den Zustand des Dentins durch eine Visualisierung anhand unterschiedlicher Farben an. Der zu behandelnde Zahn wird während der therapeutischen Maßnahme mit blau/violetttem Licht (405 nm) beleuchtet. Durch den Filter der Brille werden kürzere Wellenlängen (unterhalb 500 nm) herausgefiltert. Bereiche, die an der Dentinoberfläche eine längere Wellenlänge oberhalb 500 nm aufweisen, bleiben durch den Filter sichtbar und erscheinen rot, was

die fluoreszierenden kariösen Bereiche visuell erkennen lässt. Das gesunde, nicht von Karies befallene Zahnmaterial fluoresziert hingegen in einer grünen Farbe. Um eine klare Differenzierung von rot oder grün fluoreszierendem Zahnmaterial zu gewährleisten, sollten Störquellen wie z. B. die OP-Leuchte oder auch externe Lichtquellen während der Nutzung des SIROInspect®-Geräts abgeschaltet oder aus dem Strahlverlauf herausgehalten werden. Wird das Gerät in der Nähe der Pulpa angewandt, kann zusätzlich zu den beschriebenen Farben ein bräunlich fluoreszierendes Zahnmaterial gesehen werden. Da die bräunliche Fluoreszenz jedoch keiner eindeutigen Quelle zugeordnet werden kann, empfiehlt es sich in einer solchen Situation, andere Erkennungshilfen wie zum Beispiel die Sonde zu nutzen, um eine eindeutigere Therapieentscheidung zu treffen (Augenstein, 2014).

2.2 PolyBur®

Der Polybur® Exkavationsbohrer (Komet Dental, Gebr. Brasseler GmbH & Co. KG, Lemgo Deutschland, Abb. 12) ist in seiner Konstruktion vergleichbar mit einem konventionellen Rosenbohrer. Er ist in 3 unterschiedlichen Größen 014, 018 und 023 (Kopfgröße \varnothing 1/10 mm) erhältlich. Die in dieser Untersuchung durchgeführten therapeutischen Maßnahmen wurden je nach Anforderungen mit den Kopfgrößen 018 und 023 durchgeführt.



Abb. 12: Der PolyBur® Exkavationsbohrer ist gebrauchsfertig und wird nach der Behandlung entsorgt (Einweginstrument). Er wird zusätzlich im pulpanahen Bereich eingesetzt, stellt jedoch kein Ersatz für den herkömmlichen Rosenbohrer dar (ZWR, 2016).

2.3 Untersuchungskonzept

Der Untersuchung stand ein Patientenpool von 3987 Patienten zur Verfügung. Die Alters- und Geschlechtsaufteilung gibt Tabelle 1 wieder.

Tab. 1: Alters- und Geschlechtsverteilung des zur Verfügung stehenden Patientenpools.

Alter	0 bis 9	10 bis 19	20 bis 29	30 bis 39	40 bis 49	50 bis 59	60 bis 69	70 bis 79	80 bis 89	90 bis 99
männlich	50	88	166	270	416	443	313	187	29	2
weiblich	35	96	222	291	428	451	315	146	35	4
gesamt	3987									

Die graphische Darstellung der Häufigkeitsverteilung zum Alter der Patienten zeigt Abbildung 13.

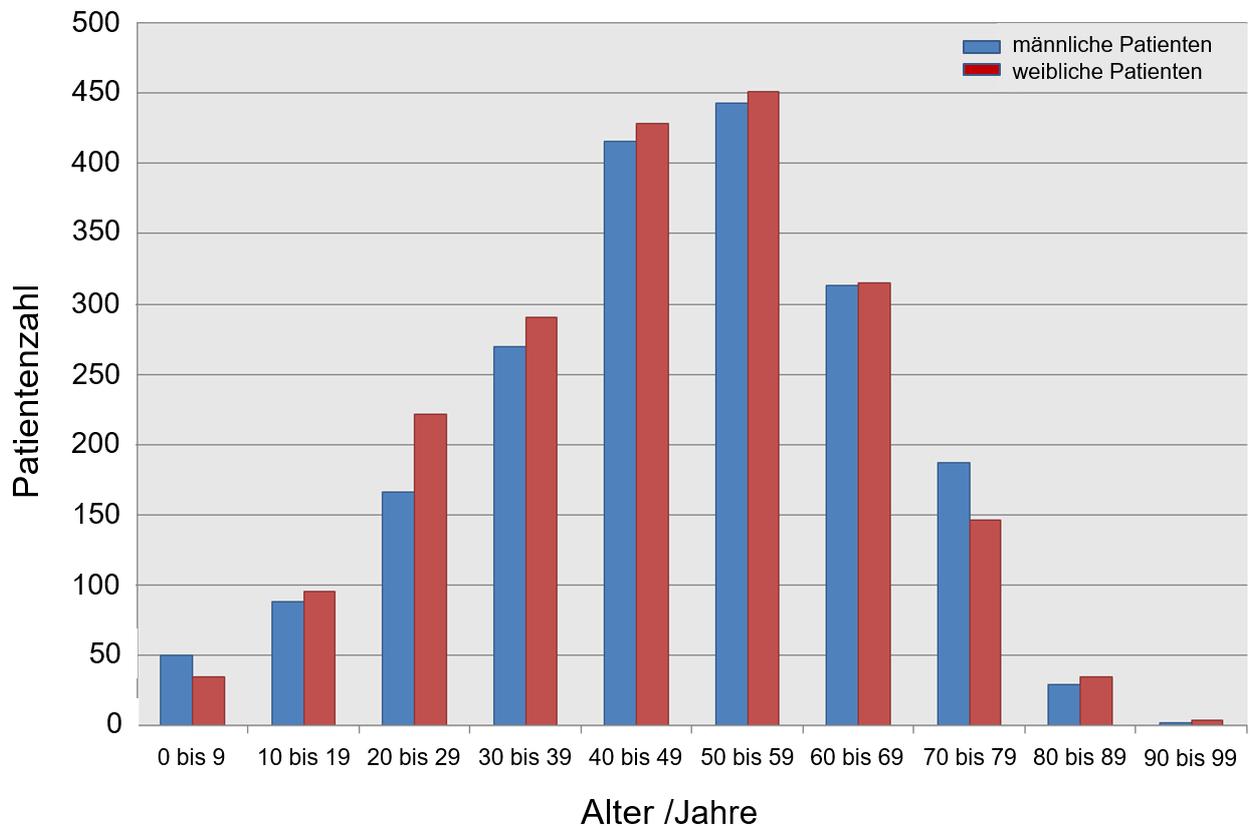


Abb. 13: Häufigkeitsverteilung zum Alter und Geschlecht der zur Verfügung stehenden Patientenclientel.

Das Durchschnittsalter des Patientenpools zu diesem Zeitpunkt lag bei 47,5 Jahren, was repräsentativ für das Alter der behandelten Patienten dieser klinischen Untersuchung stand. Als Einschlusskriterium wurden bleibende, vitale, Prämolaren und Molaren herangezogen. Somit ergaben sich als Ausschlusskriterium Milchzähne, bleibende Frontzähne, wurzelkanalbehandelte Zähne und überkronte Zähne. Ein zusätzliches Kriterium für den Ausschluss war die Notwendigkeit der indirekten Überkappung bzw. die endodontische Behandlung während oder nach der Kariesexkavation. Letztendlich wurde die Untersuchung aus dem laufenden Praxisalltag retrospektiv über 6 Monate ausgewertet. Daraus ergab sich eine Fallzahl von 67 Zähnen. Während der therapeutischen Maßnahme zeigte sich bei 7 Zähnen die Notwendigkeit einer indirekten Überkappung, was zu deren Ausschluss aus der Untersuchung führte (siehe Anhang). Letztendlich verblieben 60 Zähne (35 Patienten) bei denen die Exkavation im pulpanahen Bereich mittels PolyBur[®] durchgeführt und mit dem SIROInspect[®] der Zustand des kariesbefallenen Dentins überprüft wurde.

2.4 Vorgehensweise

Für die Darstellung der Exkavationsergebnisse wurden dieser klinischen Untersuchung definierte Kriterien und ein Ablaufplan zugrunde gelegt. Um aus den Ergebnissen dieser Studie eine klare, voneinander differenzierbare und aussagekräftige Schlussfolgerung ziehen zu können, erfolgte eine transparente und eindeutig nachvollziehbare Dokumentation der jeweiligen Behandlungsschritte. Im Verlauf der Behandlungen wurde eine dreistufige Fotodokumentation, die den kariösen Defekt in den jeweiligen Behandlungsphasen beschreibt, erstellt. Des Weiteren wurden nach jeder Behandlungsphase die Kavität mittels Sonde und SIROInspect[®] beurteilt. Die Vorgehensweisen, die dieser Studie zugrunde lagen, werden in elf Schritten detailliert aufgelistet und lassen sich in Behandlung, Fotodokumentation und Beurteilung gruppieren.

Schritt 1: Kariesdiagnostik

Im Rahmen der Befundaufnahme wurde eine klinische Kariesdiagnostik durchgeführt. Zähne mit kavittierter Karies wurden in den weiteren Ablaufplan mit einbezogen.

Schritt 2: Darstellung des kariösen Defektes

Vor der Darstellung und Fotodokumentation der Karies erfolgte je nach Bedarf eine lokale Anästhesie mit Ultracain® D-S (Sanofi-Aventis, Frankfurt am Main, Deutschland) oder Meaverin® (DeltaSelect, Dreieich, Deutschland), um einen Zugang mit dem Diamantenbohrer zu schaffen.

Schritt 3: Fotodokumentation

Nach Freilegung des kariösen Defektes, erfolgte die erste Fotodokumentation mittels intraoraler Kamera (SIROCAM 3, Sirona Dental Systems GmbH, Bensheim, Deutschland).

Schritt 4: Beurteilung mittels Sonde und SIROInspect®

Nach Freilegung des kariösen Defektes wurde dieser beurteilt. Dabei wurde evaluiert, ob ein „Crie dentaire“ bzw. eine kariestypische Fluoreszenz nachzuweisen ist oder nicht.

Die Schritte 1 bis 4 sind als therapeutisches Behandlungsschema in Abbildung 14 zusammengefasst.

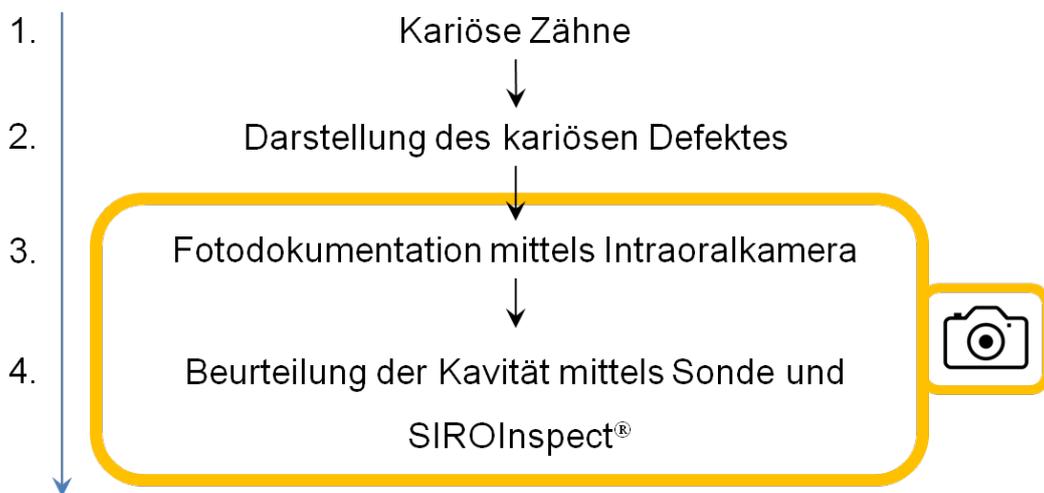


Abb. 14: Therapeutisches Behandlungsschema der Schritte 1-4 für die primäre Diagnostik und klinische Darstellung. Zunächst wurden die Zähne auf Karies diagnostisch untersucht. Liegen kariöse Läsionen vor, wurden diese Defekte dargestellt und mittels einer intraoralen Fotokamera dokumentiert. Die Beurteilung erfolgte in Schritt 4 mit dem SIROInspect® und als Kontrolle mit der Sonde.

Schritt 5: Exkavation mittels PolyBur®

An dieser Stelle wird das Polymerinstrument so lange eingesetzt, bis keine Exkavation mehr stattfindet.

Schritt 6: Fotodokumentation

Ist die Karies mittels PolyBur® erfolgreich exkaviert, erfolgt eine Fotodokumentation durch den Einsatz der intraoralen Kamera.

Schritt 7: Beurteilung der Kavität im Vergleich mittels Sonde und SIROInspect®. Um die Arbeitsweise des PolyBur® zu beurteilen, werden Sonde und SIROInspect® wiederholt eingesetzt, um eventuell vom PolyBur® nicht abgetragene Restkaries erkennbar zu machen.

Die Schritte 5 bis 7 sind als therapeutisches Behandlungsschema in Abbildung 15 grafisch dargestellt.

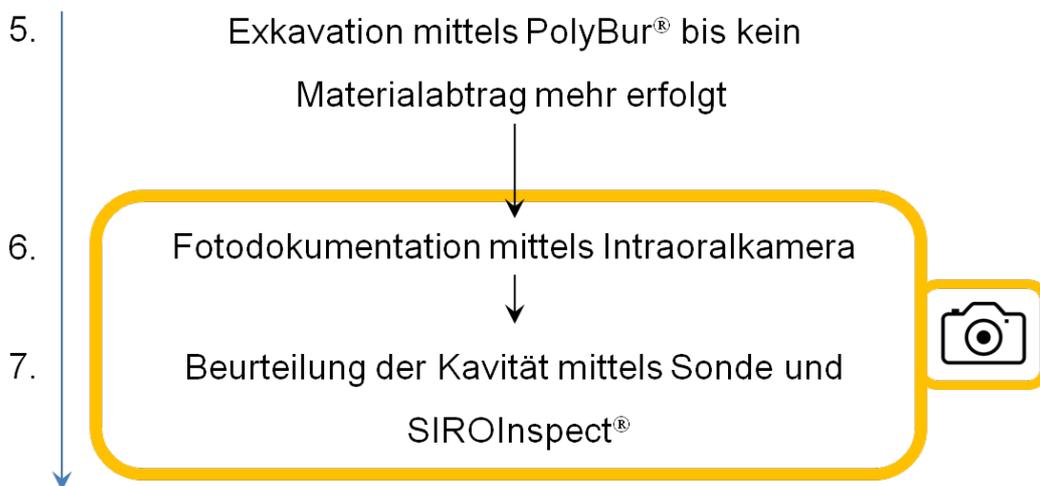


Abb. 15: Die Exkavation mit Polybur® erfolgt so lange, bis kein Material mehr abgetragen wird. Anschließend wird erneut eine Fotodokumentation mittels der intraoralen Kamera durchgeführt um den Exkavationsstatus zu dokumentieren. Abermals wird die Kavität mit SIROInspect® beurteilt und im Vergleich dazu die Sondenmessung durchgeführt.

Schritt 8: Nachexkavation

In Fällen, in denen die Sonde bzw. das SIROInspect® noch Restkaries anzeigen, wird mit einem Rosenbohrer die Restkaries bis zum primären Therapieendpunkt, der Kariesfreiheit, entfernt. Sollte an dieser Stelle die Notwendigkeit einer indirekten Überkappung gegeben sein oder die Gefahr einer Überexkavation bestehen, fällt der behandelte Zahn aus der Studie heraus.

Schritt 9: Fotodokumentation

Nach einer notwendigen Nachexkavation erfolgt wiederum die Fotodokumentation mit der Intraoralkamera.

Schritt 10: Beurteilung der Kavität mittels Sonde und SIROInspect®

Um abschließend sicherzustellen, dass keine Restkaries verblieben ist, wird die Kavität mittels SIROInspect® und Sonde erneut beurteilt.

Schritt 11: Wiederholte Nachexkavation

Wird mittels Sonde oder SIROInspect® erneut Karies detektiert, muss so lange exkaviert werden, bis die Karies vollständig entfernt wurde. Abschließend erfolgt die Füllungstherapie mittels Glasionomerzement bzw. Kompositfüllung.

Die Schritte 8 bis 11 sind als therapeutisches Behandlungsschema in Abbildung 16 grafisch wiedergegeben.

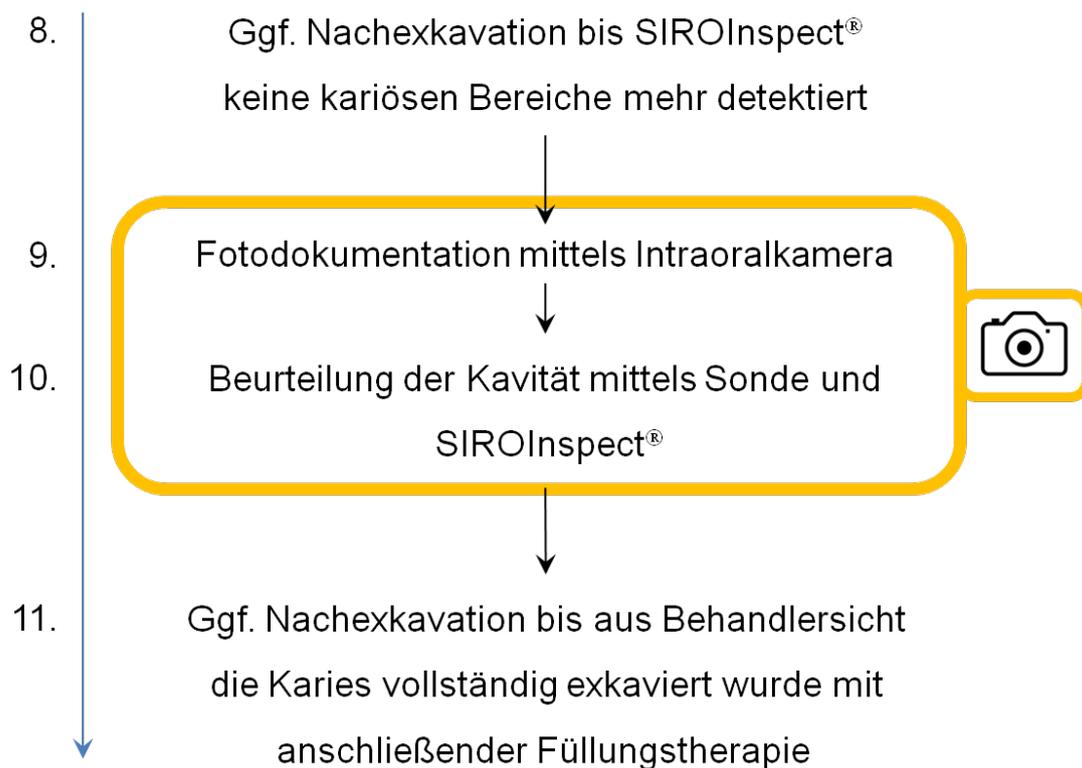


Abb. 16: Unter Umständen muss eine Nachexkavation durchgeführt werden, bis das SIROInspect® den primären Therapieendpunkt (Kariesfreiheit, d.h. keine Fluoreszenzdetektion), darstellt. Anschließend erfolgt die Fotodokumentation mittels intraoraler Kamera und im Weiteren die Beurteilung der Kavität mittels Sondenmessung im Vergleich. Ist die Kariesfreiheit aus Behandlersicht trotz SIROInspect® und Sonde immer

noch nicht gegeben muss eine weitere Nachexkavation bis zum therapeutischen Endpunkt durchgeführt werden, um die Maßnahme abzuschließen.

2.5 Datenerfassung und statistische Auswertung

Aus dem zur Verfügung stehenden Patientenpool wurden retrospektiv 60 kariöse Zähne von 35 Patienten ausgewählt. Anhand von Patientennummern können sich die Zähne eindeutig zuordnen lassen (Anhang Tab. 10). Die Datenerfassung und Auswertung erfolgte sowohl mittels Fotodokumentation als auch per Nominalskala (Kariesentfernung mittels PolyBur® +/-), basierend auf der Fluoreszenzdetektion mit SIROInspect® (richtig/falsch) im Vergleich zur Kariesdetektion mittels Sonde (richtig/falsch). Im Rahmen einer Tabellenerfassung mit Excel (Microsoft Corporation, Office 2007, Redmond, WA, USA) wurden sowohl die +/- als auch die richtig/falsch Aussagen in die Tabelle übertragen. Hierbei wurden die Schritte 1-4 mit T1 (Primärdiagnostik und klinische Darstellung der Karies), die Schritte 5-7 mit T2 (Kariesexkavationsstatus) und die Schritte 8-11 mit T3 (Nachexkavation) gekennzeichnet. Die +/- bzw. richtig/falsch Aussagen werden wie folgt definiert:

Mit Bezug auf die angewendeten Diagnoseverfahren werden die Ergebnisse, therapeutisches Ziel erreicht (Karies vollständig exkaviert: +) bzw. therapeutisches Ziel nicht erreicht (Karies nicht vollständig exkaviert: -), erfasst und mittels einer „Predeictive value“-Darstellung für die Status T1, T2 und T3 tabellarisch wiedergegeben. Hierbei müssen sowohl für die Sonde als auch für das SIROInspect® die richtig/falsch-Aussagen entsprechend beurteilt werden (Detektionsstatus).

Sonde

- | | | |
|--------------------------|---------------------|---------|
| ➤ Karies vorhanden | → kein Cri dentaire | richtig |
| ➤ Karies nicht vorhanden | → Cri dentaire | richtig |
| ➤ Karies vorhanden | → Cri dentaire | falsch |
| ➤ Karies nicht vorhanden | → kein Cri dentaire | falsch |

SIROInspect®

- | | | |
|--------------------------|--------------------------|---------|
| ➤ Karies vorhanden | → Fluoreszenzsignal | richtig |
| ➤ Karies nicht vorhanden | → kein Fluoreszenzsignal | richtig |
| ➤ Karies vorhanden | → kein Fluoreszenzsignal | falsch |
| ➤ Karies nicht vorhanden | → Fluoreszenzsignal | falsch |

3. Ergebnisse

3.1 Ergebnisübersicht

Die ermittelten Daten sind nicht auf ein bestimmtes Geschlecht oder Alter begrenzt. Der Patientenstamm der Praxis umfasst ein Kontinuum der verschiedenen Altersgruppen und ist daher nicht bevölkerungsrepräsentativ (Abb. 7).

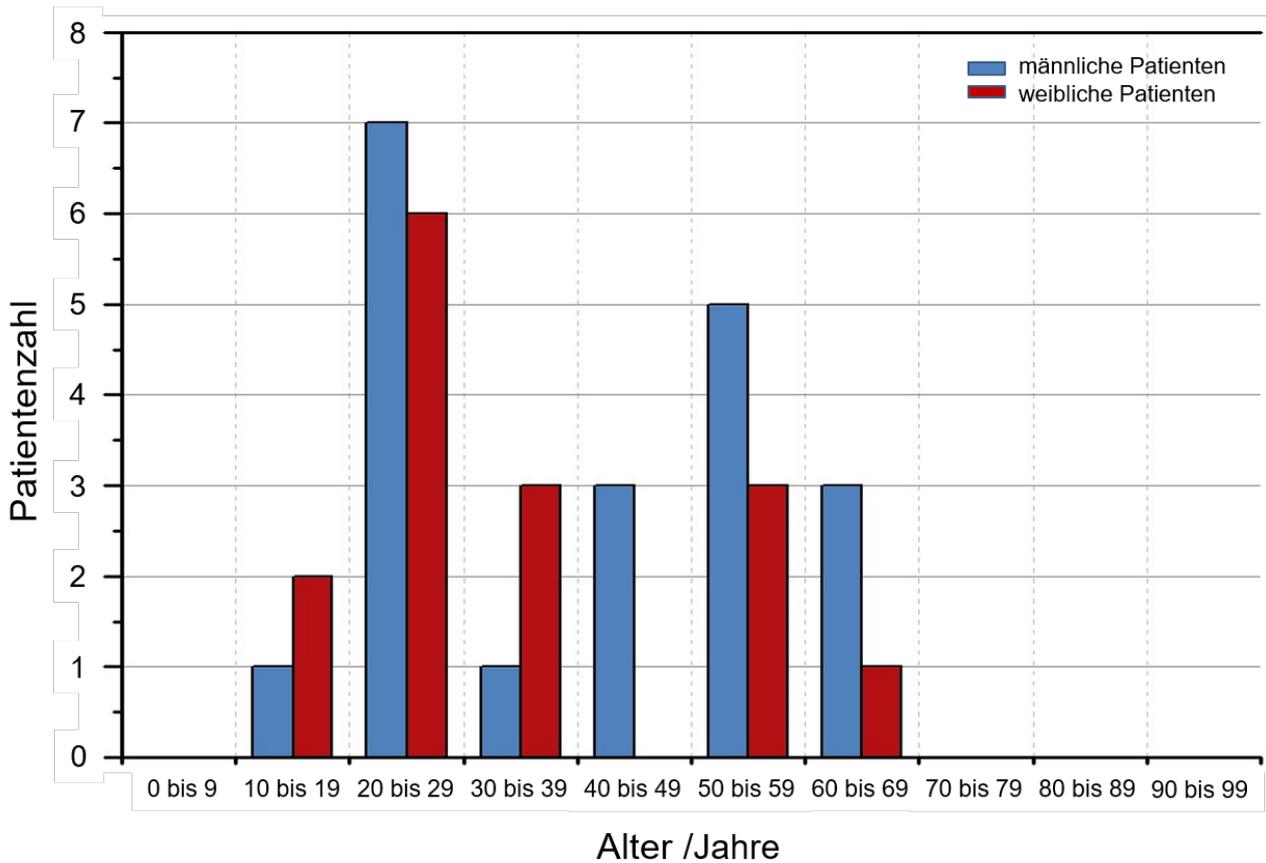


Abb. 17: Häufigkeitsverteilung zum Alter und Geschlecht der für die Untersuchung herangezogenen Patienten Klientel.

Im Rahmen der Kariesexkavation wurde in allen 60 Fällen nach der Freilegung des kariösen Defektes (T1) das Vorhandensein von Karies sowohl mit der Sonde (kein Cri dentaire vorhanden) als auch mittels SIROInspect® (Fluoreszenzsignal vorhanden) richtig detektiert (Tab. 2).

In der Gesamtzahl der untersuchungsrelevanten Zähne konnte lediglich in sechs Fällen die Karies gänzlich mittels PolyBur[®] entfernt werden (Tabelle 2, Abb. 18). Sowohl mittels Sonde (Cri dentaire vorhanden) als auch mittels SIROInspect[®] (kein Fluoreszenzsignal vorhanden) wurde bei der Ermittlung des Kariesexkavationsstatus (T2) keine Restkaries mehr detektiert. In allen anderen Fällen (54 Kavitäten) konnte sich, entweder per Sonde oder per SIROInspect[®], noch Restkaries identifizieren lassen, was letztendlich die Nachexkavation (T3) mit dem Rosenbohrer erforderte.

Nach vollständiger Entfernung der Restkaries in den verbliebenen 54 Kavitäten mittels Rosenbohrer (T3), konnte sowohl mittels Sonde (Cri dentaire vorhanden) als auch mittels SIROInspect[®] (kein Fluoreszenzsignal vorhanden) keine Restkaries mehr nachgewiesen werden.

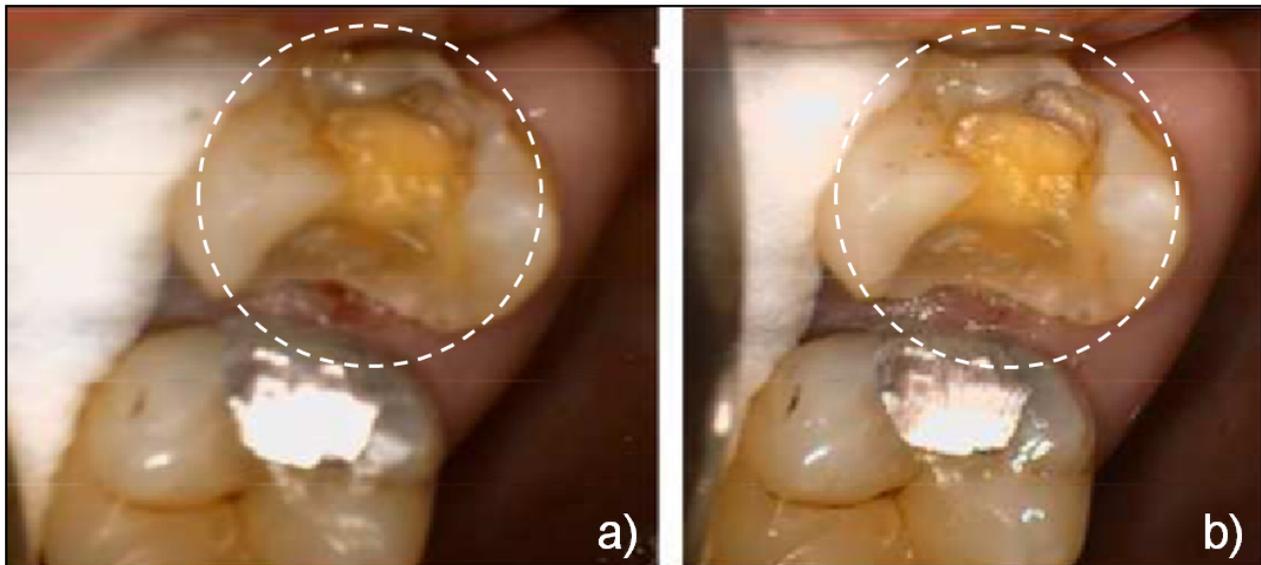


Abb. 18: Beispielhafte intraorale Kameraaufnahmen vor (T1, links) und nach der vollständigen Exkavation (T2, rechts) mit dem PolyBur[®]-System. Der Exkavationsbereich befindet sich innerhalb des mit einem Kreis markierten Areals.

Tab. 2: Gesamtdarstellung der Detektionsergebnisse hinsichtlich des therapeutischen Nachweises von Karies mittels Sonde und SIROInspect® in den Schritten T1, T2 und T3.

Status	Anzahl der Kavitäten	Sonde	SIROInspect®	Kommentare
T1	60	-	-	Sonde und SIROInspect® haben in allen Fällen das Vorhandensein von Karies (kein Cri dentaire und Fluoreszenzsignal) richtig detektiert
T2	49	-	-	Sonde und SIROInspect® haben nach der Behandlung mit PolyBur® in 49 Fällen das Vorhandensein von Restkaries (kein Cri dentaire und Fluoreszenzsignal) richtig detektiert
	6	+	+	Sonde und SIROInspect® haben nach der Behandlung mit PolyBur® in 6 Fällen (Cri dentaire und kein Fluoreszenzsignal → keine Restkaries vorhanden) richtig detektiert
	2	-	+	In 2 Fällen wurde mittels SIRO-Inspect® keine Karies detektiert (kein Fluoreszenzsignal), obwohl Restkaries durch die Sonde (kein Cri dentaire) detektiert wurde
	3	+	-	In 3 Fällen wurde mittels SIRO-Inspect® Karies detektiert (Fluoreszenzsignal), obwohl keine Karies durch die Sonde (Cri dentaire) detektiert wurde
T3	54	+	+	Entfernung der Restkaries mittels Rosenbohrer. Hier haben Sonde und SIROInspect® in allen Fällen keine Karies (Cri dentaire und kein Fluoreszenzsignal) richtig detektiert

3.2 Gegenüberstellung von Sonde und SIROInspect® bei der Kariesdetektion

Während der Behandlungen aller Patienten wurden sowohl Sonde als auch SIROInspect® jeweils 180-mal bei 60 Kavitäten in T1, T2 und T3 eingesetzt. 175-mal lieferten beide Diagnoseverfahren ein übereinstimmendes Ergebnis in Bezug auf die Kariesdetektion, unabhängig ob Karies vorhanden war oder nicht (Detektionsstatus „richtig“). 5-mal traten unterschiedliche Detektionsstatus „falsch“ in Erscheinung.

In zwei Fällen wurde während der Bestimmung des Kariesexkavationsstatus (T2) beim SIROInspect® ein falsch-negatives Ergebnis (Karies vorhanden, aber nicht detektiert) angezeigt, demgegenüber konnte in diesen Fällen jedoch mit der Sonde Restkaries (kein Cri dentaire) detektiert werden (Tab. 2, Abb. 19). Als Nebenbefund wurden hierbei Amalgamtätowierungen im Bereich der zu bearbeiteten Areale festgestellt.

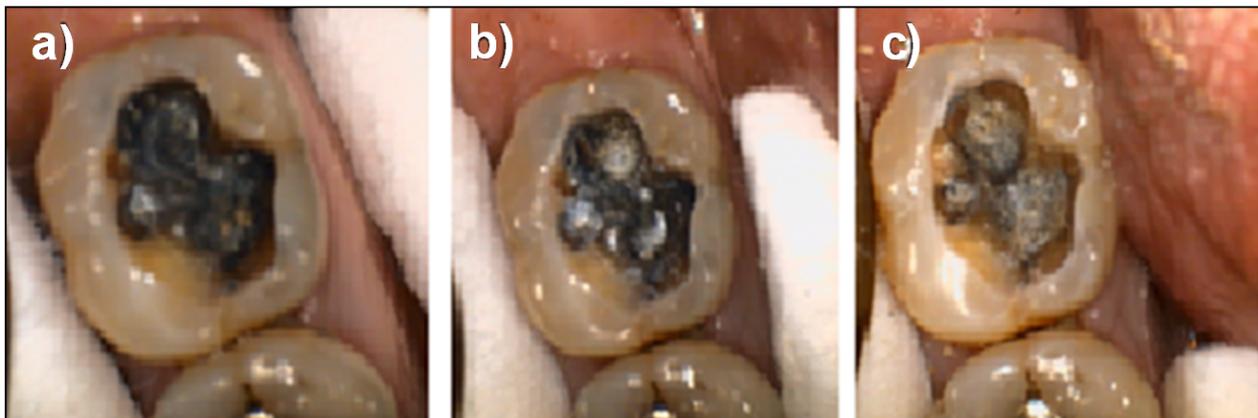


Abb. 19: a) Darstellung des kariösen Defekts (T1); b) Exkavation mittels PolyBur®, bis kein Materialabtrag mehr erfolgte (Sonde zeigte Karies an; SIROInspect® zeigte keine Karies mehr an (T2)); c) Nachexkavation (T3) mit dem Rosenbohrer, bis mittels Sonde keine Restkaries mehr erfasst wurde. Auch hier detektierte das SIROInspect® keine Karies mehr.

Im Gegensatz zum SIROInspect® lieferte auch die Sonde in drei Fällen ein falsch-negatives Ergebnis (Karies vorhanden jedoch Cri dentaire gehört, Tabelle 2). Die Sonde wies darauf hin, dass keine Restkaries mehr vorhanden war und sich das nicht abgetragene Dentin demnach einem gesunden Zustand befindet. Das typisch klirrende Geräusch konnte in jedem dieser drei Fälle wahrgenommen werden. Folglich liefert die Sonde das eindeutige Ergebnis des kariesfreien Zustandes. Abbildung 20 zeigt ein Beispiel zu diesem Sachverhalt.

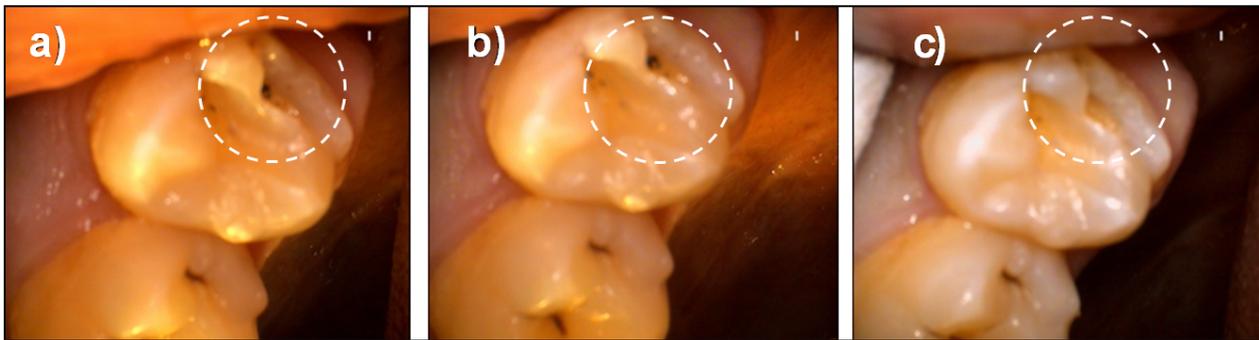


Abb. 20: a) Darstellung des kariösen Defekts (T1); b) Exkavation mittels PolyBur[®], bis kein Materialabtrag mehr erfolgte (Sonde zeigte keine Karies an, mit SIROInspect[®] konnte Karies detektiert werden (T2)); c) Nachexkavation (T3) mit dem Rosenbohrer, bis anhand von Sonde und SIROInspect[®] keine kariösen Bereiche mehr detektiert bzw. angezeigt wurden.

3.3 Detektionsvorhersage von Sonde und SIROInspect[®]

Hinsichtlich der Detektionsgenauigkeit von Sonde und SIROInspect[®] lassen sich aus den Tabellen 3-5 statistische Gütekriterien wie die Sensitivität und die Spezifität für den Befund „therapeutisches Ziel erreicht/nicht erreicht“ ermitteln. Im Rahmen der Primärdiagnostik (T1) ergab sich für beide Systeme ein 100 % iger Nachweis für das Vorhandensein von Karies (Tab. 3).

Tab. 3: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies beider Detektionsverfahren in der Primärdiagnostik (T1). Die hieraus ersichtliche Sensitivität (Richtig-positiv-Rate) liegt bei 100 %.

	Karies vorhanden (-)	Karies nicht vorhanden (+)	
Detektion positiv (-)	60	0	$\Sigma = 100 \%$
Detektion negativ (+)	0	0	$\Sigma = 100 \%$
	$\Sigma = 100 \%$	$\Sigma = 100 \%$	

Bei der Bestimmung des Kariesexkavationsstatus (T2) ergaben sich Abweichungen im Detektionsergebnis zwischen beiden Verfahren. Die Sonde zeigte in drei Fällen, das SIROInspect[®] in zwei Fällen ein falsch-negatives Ergebnis an. Die sich daraus ergebende Nachweisgenauigkeit für beide Detektionsverfahren liegt somit bei 91,7 %

(55 Zähne), wobei von beiden Verfahren 49 mal „Karies vorhanden“ richtig detektiert und 6 mal „Karies nicht vorhanden“ richtig detektiert wurde (Tab. 4).

Tab. 4: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies beider Detektionsverfahren bei der Bestimmung des Kariesexkavationsstatus (T2). Sensitivität und Spezifität stellen sich hier unterschiedlich dar.

	Karies vorhanden (-)	Karies nicht vorhanden (+)	
Detektion positiv (-)	49	0	$\Sigma = 81,7 \%$
Detektion negativ (+)	5	6	$\Sigma = 8,3 \%$
	$\Sigma = 90 \%$	$\Sigma = 10 \%$	

Für die Nachexkavation (T3) lag die Nachweisgenauigkeit für beide Verfahren wieder bei 100 % (Tab. 5).

Tab. 5: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies beider Detektionsverfahren für die Nachexkavation (T3). Die hieraus ersichtliche Spezifität (Richtig-negativ-Rate) liegt bei 100 %.

	Karies vorhanden (-)	Karies nicht vorhanden (+)	
Detektion positiv (-)	0	0	$\Sigma = 100 \%$
Detektion negativ (+)	0	60	$\Sigma = 100 \%$
	$\Sigma = 100 \%$	$\Sigma = 100 \%$	

Aus den Konfusionsmatritzen (Tab. 3-5) lassen sich jetzt die Sensitivität und die Spezifität beider Detektionsverfahren ableiten.

Im Rahmen der Primärdiagnostik (T1) lässt sich somit eine Sensitivität (Karies vorhanden) von 100 % für beide Diagnoseverfahren ermitteln. Ein falsch-negatives Ergebnis konnte für T1 nicht nachgewiesen werden (Tab. 3). Für die Nachexkavation (T3) ergibt

sich eine Spezifität (Karies nicht vorhanden) von ebenfalls 100 % für beide Diagnoseverfahren. Ein falsch-positives Ergebnis liegt für T3 nicht vor (Tab. 5).

Sensitivität und Spezifität stellen sich jedoch innerhalb des Kariesexkavationsstatus (T2) unterschiedlich dar (Tab. 4). Für die Sensitivität ergibt sich hier ein Wert von 90,7 % wodurch sich eine falsch-negativ-Rate von 9,3 % ergibt. Die Spezifität liegt hier bei 100 % bei einer gleichzeitigen falsch-positiv-Rate von 0 %. Tabelle 6 zeigt die Sensitivitäts- und Spezifitätswerte nochmals in der Übersicht für beide Detektionsverfahren. Zudem sind die positiven und negativen Vorhersagewerte für die Schritte T1, T2 und T3 mit aufgeführt.

Tab: 6: Zusammenfassung der Sensitivitäts- und Spezifitätswerte für T1, T2 und T3, sowie die Vorhersagewerte (positiv und negativ) für beide Detektionsverfahren.

	Primärdiagnostik (T1)	Kariesexkavationsstatus (T2)	Nachexkavation (T3)
Sensitivität	100 %	90,7 %	
Falsch-negativ-Rate	0,0 %	9,3 %	
Spezifität		100 %	100 %
Falsch-positiv-Rate		0,0 %	0,0 %
positiver Vorhersagewert	100 %	100 %	0,0 %
Falscherkennungs- rate	0,0 %	0,0 %	0,0 %
negativer Vorhersagewert	0,0 %	54,5 %	100 %
Falschauslassungs- rate	0,0 %	45,5 %	0,0 %

Zur Bestimmung der Sensitivitäts- und Spezifitätswerte sowie der Vorhersagewerte für das jeweilige Diagnoseverfahren, erfolgt jetzt zusätzlich eine Einzelbetrachtung des Kariesexkavationsstatus (T2) für die Sonde und für das SIROInspect® (Tab. 7-9). Diese Einzelbetrachtungen können herangezogen werden, da sich die Falsch-negativ-Raten

für beide Diagnoseverfahren auf unterschiedliche Zähne (im Anhang Tab. 10 Lfd. Nr. 5, 12 und 28 für die Sonde sowie 48 und 49 für SIROInspect®) beziehen.

Tab. 7: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies für die Sonde bei der Bestimmung des Kariesexkavationsstatus (T2). Sensitivität und Spezifität stellen sich hier unterschiedlich dar.

	Karies vorhanden (-)	Karies nicht vorhanden (+)	
Detektion positiv (-)	51	0	$\Sigma = 85,0 \%$
Detektion negativ (+)	3	6	$\Sigma = 5,0 \%$
	$\Sigma = 90 \%$	$\Sigma = 10 \%$	

Tab. 8: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies für das SIRO-Inspect® bei der Bestimmung des Kariesexkavationsstatus (T2). Sensitivität und Spezifität stellen sich hier unterschiedlich dar.

	Karies vorhanden (-)	Karies nicht vorhanden (+)	
Detektion positiv (-)	52	0	$\Sigma = 86,7 \%$
Detektion negativ (+)	2	6	$\Sigma = 3,3 \%$
	$\Sigma = 90 \%$	$\Sigma = 10 \%$	

In den Einzelbetrachtungen stellen sich die Sensitivitäts- und Spezifitätswerte wie folgt dar: Für die Sonde ergibt sich hierbei ein Sensitivitätswert von 94,4 % (Falsch-negativ-Rate von 5,6 %) und für das SIROInspect® ein Sensitivitätswert von 96,3 % (Falsch-negativ-Rate von 3,7 %). Die Spezifitätswerte liegen für beide Diagnoseverfahren bei 100 % mit einer entsprechenden Falsch-positiv-Rate von 0 %. (Tab. 9). Die sich zudem aus den Tabellen 7 und 8 ergebenden Vorhersagewerte lassen sich ebenfalls aus Tabelle 9 entnehmen.

Tab: 9: Getrennte Auflistung der Sensitivitäts- und Spezifitätswerte von Sonde und SIROInspect® für T2, sowie die dazugehörigen Vorhersagewerte (positiv und negativ) für beide Detektionsverfahren.

	Kariesexkavationsstatus (T2) für Sonde	Kariesexkavationsstatus (T2) für SIROInspect®
Sensitivität	94,4 %	96,3 %
Falsch-negativ-Rate	5,6 %	3,7 %
Spezifität	100 %	100 %
Falsch-positiv-Rate	0,0 %	0,0 %
positiver Vorhersagewert	100 %	100 %
Falscherkennungsrate	0,0 %	0,0 %
negativer Vorhersagewert	66,7 %	75,0 %
Falschauslassungsrate	33,3 %	25,0 %

4. Diskussion

Im Rahmen dieser klinischen Untersuchung, basierend auf den Standardverfahren der zahnärztlichen Versorgung, wurden die Exkavationsergebnisse mit dem Ziel des Erreichens eines kariesfreien Zustandes u.a. durch die fluoreszenzunterstützte Exkavation (FACE) mittels SIROInspect® und des Polymerinstrumentes PolyBur® zur pulpanahen Kariesexkavation retrospektiv dargestellt. Über einen Zeitraum von 6 Monaten wurden hierbei 60 Zähne in Betracht gezogen, die den Anforderungen des Untersuchungskonzeptes entsprachen (Abb. 17).

Die Funktionsweise der Instrumente PolyBur® und SIROInspect® erwiesen sich während der gesamten Behandlungen als ein komplementäres und sich ergänzendes System-paar. Nach der Freilegung und der erstmaligen Beurteilung der Kavität mittels Sonde und SIROInspect® im Vergleich (T1) erfolgte die Exkavation des befallenen Dentins mit PolyBur®. Basierend auf dem Exkavationsstatus T2 (Karies vollständig exkaviert oder Restkaries vorhanden) wurde die therapeutische Maßnahme abgeschlossen bzw. bei verbleibender Restkaries die Kavität mit dem Rosenbohrer nachexkaviert. Der therapeutische Endpunkt (kariesfreier Zustand) wurde abschließend mittels Sonde und SIROInspect® verifiziert (T3).

4.1 Vollständige Kariesentfernung ja oder nein?

Die hier durchgeführten therapeutischen Maßnahmen der Kariesexkavation wurden mit Bezug auf die ursprüngliche Lehrmeinung einer vollständigen Kariesentfernung (Nachweis mittels Sonde (Cri dentaire)) durchgeführt. Das Ziel einer vollständigen Kariesentfernung bei der Karietherapie ist jedoch heutzutage nicht mehr zeitgemäß und steht entgegen der ursprünglichen Lehrmeinung offen zur Diskussion (Haak, 2016). Die vollständige Eliminierung allen kariogenen Materials wird heute nicht mehr als primärer Exkavationsendpunkt angesehen, sondern das Monitoring bestehender Bakterienaktivitäten im pulpanahen Bereich (Schwendicke et al., 2015, 2018). Dieses Verständnis ermöglicht den Einsatz neuer Verfahren zur selektiven Kariesexkavation, wie die Verwendung von Polymerbohrern.

4.2 Polymerbohrer (PolyBur®)

Die Verwendung von Polymerinstrumenten rechtfertigt sich aufgrund unterschiedlicher Härtewerte des Polymermaterials und des zu bearbeitenden kariösen Dentins. Damaschke et al. (2006b) geben für das Polymermaterial eine Knoop-Härte von 50 KHN an. Gesundes Dentin an der Schmelz-Dentin-Grenze beginnt bei 70 KHN und endet pulpanah bei etwa 25 KHN (Fusayama et al., 1966; Meredith et al., 1996). Ogawa et al. (1983) beschreiben zusätzlich eine transparente Zone zwischen 30 und 50 KHN als remineralisierbares kariöses Dentin. Somit wären die PolyBur®-Bohrer in der Lage, sowohl die Zwischenzone remineralisierten Dentins als auch kariöses Dentin zu entfernen, jedoch gesundes Dentin zu erhalten. Dammaschke et al. (2006b) und Prabhakar und Kiran (2009) belegen zudem den geringeren Substanzabtrag von Polymerbohrern gegenüber den klassischen Rosenbohrern. Zusätzlich zeigt Tsolmon (2008) dass eine Schicht von 0,5–0,7 mm remineralisierbaren infizierten Dentins durch die Polymerbohrer erhalten werden kann.

Ausgehend von der in dieser Untersuchung durchgeführten Maßnahme „kariesfrei“ zu therapieren, konnten trotz optimierter mechanischer Eigenschaften (Knoop-Härte) und eingehaltener Anwendungsrichtlinien des Herstellers (Handhabung) lediglich 10 % der untersuchungsrelevanten Zähne erfolgreich (kariesfrei) mit dem PolyBur®-System exkaviert werden (Tab. 2, T2). Ein Grund hierfür liegt sicherlich in der Einhaltung der ursprünglichen Lehrmeinung „kariesfrei“ zu therapieren, was sich in der geringen Erfolgsrate des PolyBur®-Systems widerspiegelt. Unter der Annahme, eine vollständige Eliminierung allen kariogenen Materials auszuschließen und das Monitoring bestehender Bakterienaktivitäten zu akzeptieren, würde eine weitaus höhere Erfolgsrate des PolyBur®-Systems nach sich ziehen.

Das Verbleiben kariösen Dentins in der Kavität kann sich jedoch problematisch auf die Detektion auswirken. Zum einen lässt sich der kariesfreie bzw. kariesreduzierte Zustand mittels Sonde ohne Cri dentaire nur erschwert nachweisen, zum anderen liefern die in der remineralisierbaren Dentinschicht belassenen Bakterien ein entsprechendes Fluoreszenzsignal (Abb. 21), basierend auf den von den Bakterien produzierten Protoporphyrinen (Sailer et al., 2001). Buchalla et al. (2008) weisen darauf hin, dass die roten Emissionen der kariösen Bereiche in den von Bakterien besiedelten Flächen durch

Protoporphyrin IX (zu 95 %), Coproporphyrin I + III (zu 97,5 %) sowie unbekannte Porphyrine entstehen. Dabei machen ca. 30 % des roten Emissionslichtes unbekannte Porphyrine bzw. Porphyrinverbindungen aus.

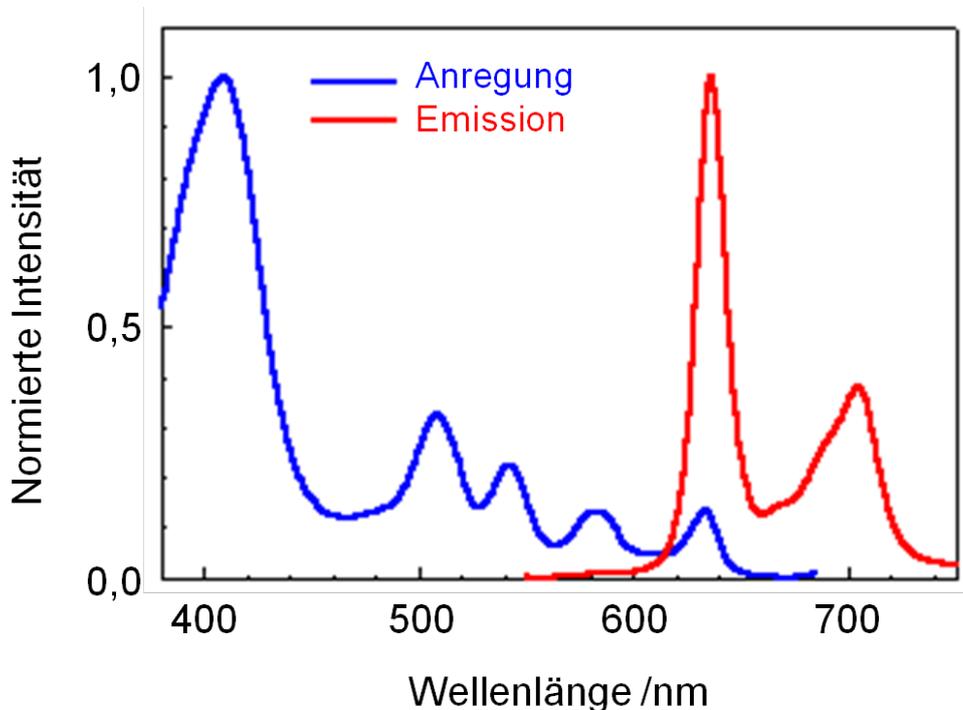


Abb. 21: Fluoreszenzspektrum von Protoporphyrin IX bei der Anregungswellenlänge von 405 nm (mit freundlicher Genehmigung J. Meister).

4.3 Sonde und SIROInspect®

Die Sonde gehört zum Grundinstrumentarium jeder zahnärztlichen Untersuchung. Sie ist universell einsetzbar und bedarf keiner zusätzlichen technischen Hilfsmittel, wie z. B. Batterien oder ein Ladegerät bei der Nutzung von Akkumulatoren. Jedoch liefern die Sonden nur lokal begrenzte Informationen in dem Bereich, wo sie punktuell eingesetzt bzw. entlanggeführt werden. Diese Einschränkungen können als mögliche Ursache für die 3 falsch-negativen Detektionsergebnisse (Karies vorhanden aber nicht detektiert, Tab. 2, T2 sowie Tab. 7) in Betracht gezogen werden. Letztendlich basiert die Detektion von Karies auf einer taktilen, visuellen und akustischen Erfassung, die auch vom Anwender ein gewisses Maß von Erfahrung erfordert.

Im Gegensatz zur Sonde, liefert das SIROInspect® eine großflächige Bereichsinformation, d.h. die Kavität lässt sich komplett einschließlich schwer einsehbarer

Bereiche visuell erfassen. Unter Einsatz von blau/violetttem Licht der Wellenlänge 405 nm, das beim SIROInspect® zum Einsatz kommt, bewirken die fluoreszenzoptischen Eigenschaften der im kariösen Dentin enthaltenen Fluorophore (Protoporphyrine) eine Reemission sichtbarer Strahlung durch eine Spektralverschiebung in den orangefarbenen Farbbereich (Abb. 21), die eine Nachexkavation des kariösen Dentins selektiv ermöglicht (Lennon et al., 2002; Lennon et al., 2009; Lai et al., 2014).

Dennoch wurden in dieser Untersuchung 2 falsch-negative Ergebnisse (Karies vorhanden aber nicht detektiert, Tab. 2, T2 sowie Tab. 8) erfasst. Dies lässt sich auf die Verfärbung der Zähne in einem fortgeschrittenen, dunklen Bereich (Amalgamtätowierung) zurückführen (Abb. 19). In beiden Fällen war es mit dem SIROInspect® daher nicht möglich, ein auf Karies hindeutendes Fluoreszenzsignal zu detektieren. Grund hierfür ist das im Amalgam befindliche Quecksilber, welches im UV-A Bereich bei der Wellenlänge 404,6 nm eine typische Emissions-/Absorptionsbande aufweist (Schöpp, 2002). Somit wird die Anregungswellenlänge für die Kariesfluoreszenz bei 405 nm geschwächt bzw. vollständig absorbiert.

Weitere Limitierungen stellen u.a. die in die Jahre gekommenen, endodontisch behandelten Zähne dar, wo aufgrund von Farbveränderungen in der Zahnhartsubstanz ein Fluoreszenzsignal bräunlicher Färbung in Erscheinung tritt. Ähnlich verhält es sich bei der pulpanahen Kariesdetektion. Auch hier lässt sich ein bräunlich verfärbtes Fluoreszenzsignal erfassen. Beide Situationen erfordern demnach ein gewisses Maß an Erfahrung, um die farblichen Unterschiede zwischen Kariesfluoreszenz und altersbedingter Fluoreszenz richtig zu interpretieren (Buchalla und Lennon, 2015).

Die visuelle Erfassung der reemittierten Fluoreszenzstrahlung erfolgt mittels eines Farbfilters in Form eines Sichtfensters bzw. einer Filterbrille. Diese dient primär dazu, den Spektralbereich der Anregungswellenlänge <500 nm zu blocken. Somit ist die Erfassung der Fluoreszenzstrahlung ohne Farbfilter nicht möglich.

4.4 Klinische Relevanz

Die Karies als häufigste Erkrankung weltweit (Benzian et al., 2012) war früher durch offene Läsionen gekennzeichnet. Durch die in den Industrienationen als *lege artis* angewandte Methode der Applikation von Fluoriden im Rahmen der präventiven Maß-

nahmen der Zahnfürsorge hat sich das Erscheinungsbild der Karies in den letzten Jahrzehnten gewandelt und zeigt sich in kleinen Defekten mit viel Schmelzabdeckung. Dieser auch „Hidden Caries“ genannte Zustand, lässt sich durch rein visuell basierte Diagnostik nicht darstellen (Ricketts et al., 1997). Buchalla und Lennon (2015) weisen darauf hin, dass die Art und Weise der Kariesexkavation per Definition die Gesunderhaltung des Zahns bestimmt und somit die diagnostische Ab- und Eingrenzung der vorhandenen Karies eine wichtige Determinante im therapeutischen Setting darstellt.

In den zahnärztlichen Praxen werden im Alltag bis heute vorrangig zwei Methoden angewandt: das Ertasten der Härte des Dentins mittels der Widerstandsmessung durch eine Sonde (in dieser Untersuchung bestätigt durch einen Sensitivitätswert von 94,4 % aus Tab. 9) und das Einfärben des Zahnes mittels eines Farbstoffes. Buchalla und Lennon (2015) stellen in ihrer Übersichtsarbeit fest, dass das eigefärbte Dentin nicht mit dem Grad einer bakteriellen Infektion korreliert. Beide anerkannten und im Praxisalltag angewandten Methoden sehen die Autoren jedoch als zu ungenau und zu invasiv. Die Färbemethode führt häufig zu einer Überexkavation, da das Färbemittel auch in die Porosität mindermineralisierten Dentins eindringen kann. Krause (2008) ergänzt dies durch den Aspekt, dass das Färben nicht die pathogenen Keime allein anfärbe, da diese (Zitat Anfang) „... das Kollagen der organischen Matrix weniger mineralisierten Dentins anfärben und nicht, wie gewünscht, spezifische pathogene Bakterien“ (Zitat Ende).

Im Zusammenhang der Nutzung der röntgendiagnostischen Herangehensweise erinnert Jablonski-Momeni (2010) an die im Jahre 2002 in Kraft getretene neue Röntgenverordnung, die in § 23 eine „rechtfertigende Indikation“ fordert. Daher sollte ein angewandtes diagnostisches System die initiale Karies ebenso zuverlässig erfassen wie die Dentinkaries.

Die fluoreszenzunterstützte Kariesdetektion mittels SIROInspect® erwies sich während der Behandlungen als eine sinnvolle adjuvante Methode, um die Kavitäten objektiv zu bewerten. Aufgrund stetiger Verfügbarkeit und einfacher Handhabung war das Gerät jederzeit einsetzbar. Die Patienten wurden durch die Benutzung des Gerätes in keinsten Weise beeinträchtigt oder gestört. Das SIROInspect® lieferte in 96,3 % der Fälle ein korrektes Ergebnis (Sensitivitätswert, d.h. richtig-positiv-Rate, Tab. 9). Ausgehend von der richtigen Handhabung (z. B. keine Verwendung des SIROInspect® bei Amalgam-

tätowierungen) kann davon ausgegangen werden, dass das Detektionsergebnis bei der Karieserfassung die Genauigkeit der Sonde übertrifft (Vural et al., 2017). Dies passt zu den Ergebnissen der Übersichtsarbeit von Lennon et al. (2006b), nach der die zwölf häufigsten Bakterienstämme mittels einer Wellenlänge von 405 nm richtig positiv erfasst wurden. Die FACE-Technologie detektierte dabei die Frühbesiedler ebenso effektiv wie die bereits tief im Dentin verankerten Bakterienstämme.

Als limitierender Faktor hat sich u.a. eine zu helle Umgebungsbeleuchtung erwiesen. So konnte während der Behandlungen trotz Nutzung der Filterbrille die Fluoreszenz teilweise nur eingeschränkt wahrgenommen werden. Dieser Einfluss der Störquelle Licht bei der Beurteilung der Kavitäten mittels FACE wird auch von Lennon et al. (2007) beschrieben. Eine weitere Limitierung stellt die Kombination von Caries Detector und FACE dar. Lennon et al. (2009) bemerken in ihrer Arbeit, dass die FACE nicht mit dem Caries Detector kombiniert werden sollte, da dies zu erhöhten roten Fluoreszenzwerten führen kann. Zudem können organische und/oder anorganische Verbindungen auf dem Zahnschmelz bzw. in den Porositäten und Kavitäten zu veränderten Emissionswerten führen, was in weiterführenden Studien untersucht werden sollte.

Hinsichtlich der Korrelation von Intensität der Fluoreszenzemission und bakterieller Besiedlung konnten Lennon et al. (2002) hier den Nachweis eines direkten Zusammenhangs erbringen. Unter Zuhilfenahme der konfokalen Lasermikroskopie (CFLM) konnte nachgewiesen werden, dass (Zitat Anfang) „... die rot fluoreszierenden Dentinbereiche sehr gut mit den stark infizierten Bereichen übereinstimmen.“ (Zitat Ende). Diese Aussage konnte durch Iwami et al. (2004) bestätigt werden. Mit Hilfe eines alternativen fluoreszenzbasierten Diagnoseverfahrens, des DIAGNOdent™, mit der Anregungswellenlänge von 655 nm und der Kariesfluoreszenz bei ca. 730 nm (Lussi et al., 2004) konnte auch hier der Zusammenhang von bakterieller Besiedlung und Intensität des Fluoreszenzsignales nachgewiesen werden. Auch Jablonski-Momeni (2010) weist darauf hin, dass die quantitative lichtinduzierte Fluoreszenz (QLF) den Demineralisierungsgrad von Schmelz und Dentin qualitativ und quantitativ mit hoher diagnostischer Güte ermittelt, was eine hohe Reproduzierbarkeit gewährleistet.

4.5 Klinisches Resümee

Sowohl Jablonski-Momeni (2010) als auch Buchalla und Lennon (2015) weisen explizit darauf hin, prinzipiell alle infizierten Dentinbereiche möglichst vollständig zu exkavieren. In pulpafernen Bereichen lässt sich diese Vorgehensweise generell erfüllen. Im pulpanahen Bereich liegt die Priorität auf der Vitalerhaltung der Pulpa, was zur Folge haben kann, auf eine vollständige Kariesentfernung weitestgehend zu verzichten. Hier erscheint das PolyBur[®]-System als komplementäres Instrument zur pulpanahen Kariesexkavation als geeignet. Durch seine selbstlimitierende Eigenschaft wird der Exkavationsprozess im Vorfeld beendet, ohne die Pulpa zu eröffnen. Ergänzend liefert die fluoreszenzunterstützte Kariesexkavation (FACE) eine klare Aussage hinsichtlich des Kariesbefalls. So lässt sich im pulpafernen Bereich die kariöse Zahnhartsubstanz unter geringem Zeitaufwand mit einem Rosenbohrer nahezu vollständig und im pulpanahen Bereich unter Einsatz des PolyBur[®]-Systems minimalinvasiv entfernen, mit der Einschränkung, im Sinne der Vitalerhaltung der Pulpa infiziertes Dentinkollagen zu belassen. Unter Einbehaltung eines Restrisikos können hier zwei klinische Verläufe in Erscheinung treten: einerseits, die Remineralisation von Dentinkollagen (Dentinbarriere), was zur Bildung von Tertiärdentin (Reizdentinbildung) führt, andererseits, die Entstehung einer Sekundärkaries und/oder eines bakteriellen Einstroms in die Pulpa bzw. die Überschwemmung mit Lipopolysacchariden (bakteriellen Toxinen), was im Endstadium zu einer Denaturierung der Pulpa und somit zu einer endodontischen Behandlung führen kann. Letztendlich liegt es im Ermessen des Behandlers an welchen klinischen Anforderungen und Ergebnissen er sich hier orientiert. So lag die Anforderung dieser Untersuchung darin, kariesfrei zu therapieren. Hinsichtlich der gestellten Null-Hypothesen lassen sich nun folgende Aussagen treffen:

1. *Mit Hilfe der FACE-Technologie als Diagnoseverfahren (SIROInspect[®]) lässt sich vor, während und nach der therapeutischen Maßnahme das Vorhanden- bzw. nicht-Vorhandensein kariöser Zahnhartsubstanz nachweisen.* Diese These lässt sich aufgrund der ermittelten Sensitivitäts- bzw. Spezifitätswerte aus Tabelle 9 verifizieren.

2. *Mit dem verwendeten Polymer-Bohrer-System lässt sich im pulpanahen Bereich die zu entfernende kariöse Zahnhartsubstanz vollständig entfernen.* Bezugnehmend auf die vollständige Eliminierung allen kariogenen Materials als primären therapeutischen Endpunkt, kann diese These nicht verifiziert werden.

5. Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Kariesexkavationen im pulpanahen Bereich mit dem PolyBur[®]-System durchgeführt. Zusätzlich zur klassischen Sonde kam das SIROInspect[®]-System als fluoreszenzbasiertes Diagnoseverfahren zum Einsatz, mit dem Ziel sowohl die Funktionalität als auch die Kombination beider Technologien in der zahnärztlichen Praxis zu untersuchen.

Hierzu wurden 60 kariöse Zähne gemäß der Praxisroutine kariestherapeutisch behandelt und retrospektiv ausgewertet. In drei Arbeitsschritten T1 (Primärdiagnostik und klinische Darstellung der Karies), T2 (Ermittlung des Kariesexkavationsstatus) und T3 (Nachexkavation) wurde der jeweilige Endpunkt der Exkavation mit der Sonde (Cri dentaire) und mit dem SIROInspect[®] (Fluoreszenzsignal) beurteilt. Mittels einer Predictive value-Darstellung für die Status T1, T2 und T3 wurden die Ergebnisse „therapeutisches Ziel erreicht (Karies vollständig exkaviert)“ bzw. „therapeutisches Ziel nicht erreicht (Karies nicht vollständig exkaviert)“ dokumentiert.

Hinsichtlich der Zielvorgabe wurde lediglich bei 6 Zähnen eine vollständige Kariesexkavation mit dem PolyBur[®]-System nach T2 erreicht. Bei den verbliebenen 54 Zahnkavitäten war eine Nachexkavation zur Erreichung des „klassischen“ Endpunktes mit dem Rosenbohrer erforderlich (T3). Mit Bezug auf die Evaluation des Exkavationsstatus (Karies vorhanden/Karies nicht vorhanden) wurde sowohl für die Sonde als auch für das SIROInspect[®] eine übereinstimmende Detektionsgenauigkeit von 100% für T1, von 91,7% für T2 und abermals 100% für T3 ermittelt. So wurden im Status T2 für die Sonde drei falsch-negative Ergebnisse (Fluoreszenzsignal vorhanden, jedoch Cri dentaire gehört) und für das SIROInspect[®] zwei falsch-negative Ergebnisse (Cri dentaire nicht vorhanden, Fluoreszenzsignal nicht vorhanden) beim Vorhandensein von Amalgamtätowierungen erfasst.

Die in dieser Untersuchung erzielte geringe Erfolgsrate beim PolyBur[®]-System basiert auf der Zielvorgabe gemäß der Lehrmeinung einer vollständigen Kariesentfernung. Heutzutage wird jedoch die vollständige Eliminierung einer Karies nicht mehr als primärer Exkavationsendpunkt angesehen, sondern die Kontrolle verbleibender Bakterienaktivitäten. Unter diesen Umständen wäre eine höhere Erfolgsrate bei der

Verwendung des PolyBur®-Systems zu erwarten, da hier ein reproduzierbarer Exkavationsendpunkt durch die Selbstelimination des Bohrers möglich wird.

Die Sonde liefert nur lokal begrenzte Informationen, die von der Sondenspitze ausgehen. Die Detektion basiert somit auf einer taktilen, visuellen und akustischen Erfassung, deren Interpretation auf Erfahrung basiert (Sensitivitätswert 94,4%). Das SIROInspect® hingegen ermöglicht eine großflächige Bereichsinformation, welche sich visuell bewerten lässt (Sensitivitätswert 96,3%). Jedoch können Verfärbungen wie z. B. Amalgamtätowierungen das Fluoreszenzsignal beeinträchtigen. Es konnte in dieser Untersuchung gezeigt werden, dass beide verwendeten Diagnoseverfahren weitestgehend zum gleichen Ergebnis in Bezug auf die Bestimmung des Endpunktes der Kariesexkavation geführt haben. Damit belegen die Sensitivitäts- und Spezifitätswerte, dass die Verwendung der Face-Technologie eine sinnvolle Ergänzung bei der Kariesdiagnostik vor, während und nach der therapeutischen Maßnahme darstellt.

Im Weiteren muss durch klinische Untersuchungen belegt werden, ob der mit dem PolyBur®-System zu erreichende Exkavationsstatus aus klinischer Sicht als ausreichend zu bewerten ist.

6. Anhang

6.1 Datenerfassung untersuchungsrelevanter Zähne

Tab. 10: Auswahl der mit den Detektionsverfahren zu bewertenden Zähne gemäß der Ein- (bleibende, vitale, Prämolaren und Molaren) und Ausschlusskriterien (Milch- und bleibende Frontzähne, wurzelkanalbehandelte und überkronte Zähne sowie indirekte Überkappung).

Patienten- nummer	Fortlaufende Nummer (Lfd. Nr.) untersuchungs- relevanter Zähne	Zahn	Indirekte Überkappung
1	–	14	ja
	1	45	nein
	2	46	nein
	3	47	nein
	–	24	ja
	–	25	ja
2	4	25	nein
	5	28	nein
3	–	37	ja
	6	47	nein
4	7	46	nein
5	–	45	ja
	8	46	nein
6	9	28	nein
7	10	46	nein
	11	47	nein

8	12	45	nein
9	13	45	nein
	14	46	nein
	15	47	nein
10	16	25	nein
11	17	35	nein
12	18	24	nein
13	19	27	nein
	20	36	nein
14	21	17	nein
	22	18	nein
15	23	25	nein
16	24	15	nein
	25	26	nein
	26	27	nein
17	27	15	nein
	28	16	nein
	29	17	nein
18	30	45	nein
19	31	35	nein
20	32	34	nein
	–	35	ja
	33	46	nein

21	34	27	nein
22	35	16	nein
23	36	45	nein
	37	46	nein
	38	47	nein
24	39	15	nein
	40	36	nein
25	41	17	nein
26	42	33	nein
	43	34	nein
27	44	25	nein
28	45	24	nein
	46	25	nein
29	47	46	nein
	48	47	nein
30	49	27	nein
	50	25	nein
31	51	16	nein
	52	17	nein
32	53	25	nein
	54	26	nein
	–	27	ja
33	55	44	nein

	56	45	nein
	57	25	nein
34	58	46	nein
	59	47	nein
35	60	15	nein
Summe	60		60 (nein)

6.2 Fotodokumentation

Patientennummer 1

(Untersuchungsrelevante Zähne: 45, 46, 47)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Polybur® Kopf ist abgebrochen)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 2

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 25)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries) an

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 28)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde zeigt keine Karies an, mit SIROInspect® Karies angezeigt)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 3

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 47)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 4

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 46)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 5

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 46)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 6

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 28)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 7

(Untersuchungsrelevante Zähne: 46, 47)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 8

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 45)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur[®] bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (SIROInspect[®] zeigt Restkaries an. Sonde zeigt keine Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect[®] keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 9

(Untersuchungsrelevante Zähne: 45,46)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur[®] bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect[®] zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect[®] keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 47)



Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIROInspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Fertige Füllung

Patientennummer 10

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 25)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIROInspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 11

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 35)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 12

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 24)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen keine Restkaries mehr an)

kariesfrei nach Polybur®

Patientennummer 13

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 27)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 14

(Untersuchungsrelevante Zähne: 17, 18)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 15

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 25)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 16

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 15)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

(Untersuchungsrelevante Zähne: 26, 27)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Fertige Füllung. Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIRO-Inspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 17

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 15)



kariesfrei nach
Polybur®

Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen keine Restkaries mehr an)

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 16)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde zeigt keine Karies an, mit SiroInspect® Karies angezeigt)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SiroInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 17)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SiroInspect® zeigen keine Restkaries mehr an)

kariesfrei nach Polybur®

Patientennummer 18

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 45)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 19

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 35)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 20

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 34)

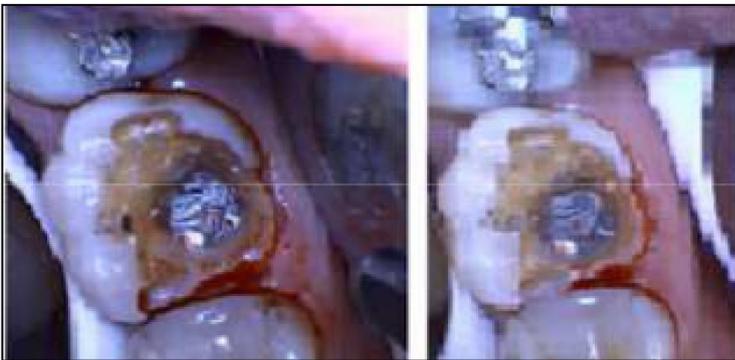


Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Fertige Füllung. Nach-
exkavation mittels
Rosenbohrer bis Sonde
und SIROInspect® keine
kariösen Bereiche mehr
anzeigen

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 46)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen keine Restkaries mehr an)

kariesfrei nach
Polybur®

Patientennummer 21

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 27)



kariesfrei nach
Polybur®

Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen keine Restkaries mehr an)

Patientennummer 22

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 16)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 23

(Untersuchungsrelevante Zähne: 45, 46, 47)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 24

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 15)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 36)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 25

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 17)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 26

(Untersuchungsrelevante Zähne: 33, 34)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 27

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 25)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 28

(Untersuchungsrelevante Zähne: 24, 25)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur[®] bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect[®] zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect[®] keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 29

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 46)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur[®] bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect[®] zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect[®] keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 47)



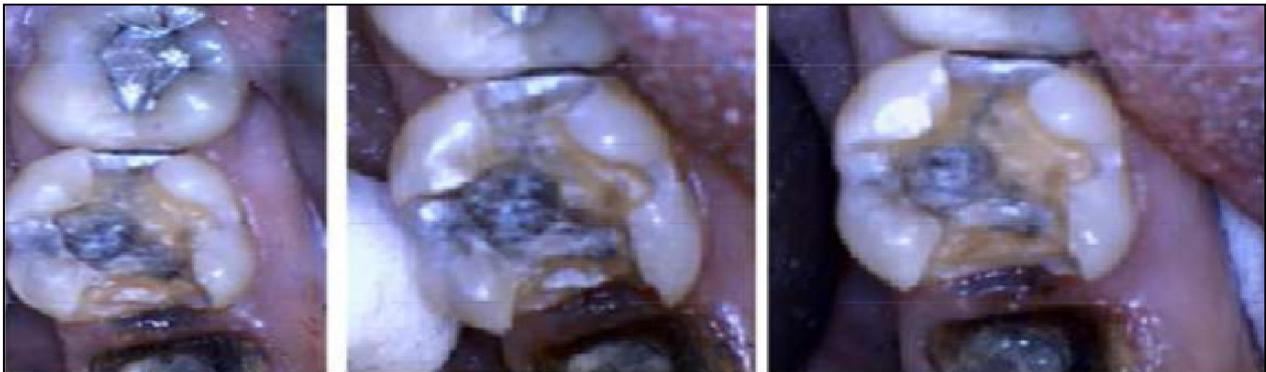
Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde zeigt Karies an, SIROInspect® zeigt keine Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 30

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 27)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde zeigt Karies an, SIROInspect® zeigt keine Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 25)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 31

(Untersuchungsrelevante Zähne: 16, 17)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 32

(Untersuchungsrelevante Zähne: 25, 26)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 33

(Untersuchungsrelevante Zähne: 44, 45)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 34

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 25)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen keine Restkaries mehr an)

kariesfrei nach Polybur®

(Untersuchungsrelevante Zähne: 46, 47)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

Patientennummer 35

(Untersuchungsrelevanter Zahn: 15)



Darstellung des kariösen Defektes

Exkavation mittels Polybur® bis kein Materialabtrag mehr erfolgt (Sonde und SIRO-Inspect® zeigen Restkaries an)

Nachexkavation mittels Rosenbohrer bis Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr anzeigen

7. Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1:** Darstellung der interagierenden Faktoren als ineinandergreifende Kreise der Kariesgenese nach König (1987). Die Krankheitsanfälligkeit der Wirtszähne, die Mikroorganismen in der Plaque sowie das Substrat in Form von Kohlenhydraten entspricht den drei obligaten Faktoren nach Keyes (1962). Keyes' Modell wurde von König um den Faktor Zeit erweitert..... 11
- Abb. 2:** Ätzmusterähnliche Strukturen einer Zahnversuchsoberfläche in vitro nach dem Einwirken von Cola (oben Referenzfläche, unten Versuchsfläche) (Grunau et al.,2013).
..... 12
- Abb. 3:** Die Abbildung zeigt eine vereinfachte Darstellung von Kariesprädispositionsstellen wie z. B. die Approximalräume (a, b). Hier liegen die Zähne stark aufeinander, wobei die Räume nicht zugänglich für die konservative Reinigung mit der Zahnbürste sind. Grau hinterlegt sind zudem auch die Fissuren auf den Kauflächen der Zähne, die zu den Seiten auslaufenden Grübchen und frei liegende Zahnhälse oder Wurzeloberflächen, die durch zu starken Auflagendruck der Zahnbürste beim Zähneputzen entstehen (Universitätsklinikum Gießen und Marburg, 2022)..... 13
- Abb. 4:** Schematische Darstellung eines Vergleichs der radiologischen Methoden Mikroradiographie und Bissflügelaufnahme gegen den histologischen Befund einer Probe. Dargestellt sind kariöse Schmelzläsionen in unterschiedlichen Schweregraden; C₀ = keine Demineralisation sichtbar, C₁ = Karies in der äußeren Schmelzschicht sichtbar (Hellwig, 1995)..... 16
- Abb. 5:** Darstellung des Fluoreszenzprozesses in der Stokes-Verschiebung bei kurzwelliger Anregung $\lambda_{\text{Absorption}}$ (z. B. ultraviolett, blau, grün) und langwelliger Emission $\lambda_{\text{Fluoreszenz}}$ (rot, nahes Infrarot) (mit freundlicher Genehmigung J. Meister)..... 19
- Abb. 6:** Funktionsweise des intraoralen Fluoreszenzkamerasystems VistaProof®. Der Sondenkopf des Kamerasystems Abb. 6a) regt mit der Wellenlänge 405 nm die Fluoreszenz der Zahnareale an. Die visuelle Darstellung in der Fluoreszenz zeigt Abb. 6b), grün gesunde Zahnhartsubstanz, rot kariöse Läsionen. Das mittels der DBSwin®-Software errechnete Vielfarbenbild zeigt Abb. 6c). Die Interpretation des

Zerstörungsgrades in der Zahnhartsubstanz verdeutlicht Abb. 6d) (Dürr Dental SE, 2022). 21

Abb. 7: Darstellung der klinischen Situation vor und nach der Kavitäteneröffnung mit FACE. Abb. 7a) zeigt die klinische Ausgangssituation ohne erkennbare Karies. Die Beleuchtung mit FACE zeigt lediglich Veränderungen in der Opazität (Abb. 7b)). Nach Kavitäteneröffnung ist die Karies visuell deutlich erkennbar (Abb. 7c)). Mittels FACE lässt sich durch die Anregung der Porphyrine der Bereich des veränderten Dentins deutlich von der gesunden Zahnhartsubstanz differenzieren (Abb. 7d)) (W&H, 2022). 23

Abb. 8: Exkavationszeiten verschiedener Methoden nach Lennon et al. (2006a). Die Grafik zeigt die Behandlungsdauern der Kariesexkavation unter Zuhilfenahme der unterschiedlichen Detektionsmethoden.

FACE: Fluorescence-Aided Caries Excavation, CE: Conventional excavation, CS: Chemomechanical excavation, CD: Caries-Aided Excavation. 24

Abb. 9: Intraorale Kameraaufnahme von Zahn 37 (links) und Zahn 45 (rechts) mit indirekter Überkappung. 28

Abb. 10: Abbildung 10a) zeigt das System CeraBur®, Abbildung 10b) das System PolyBur® im Einsatz (Henry Schein, 2023). 30

Abb. 11: Zubehör des SIROInspect®-Systems (modifiziert nach Augenstein und Frentzen, 2016). 33

Abb. 12: Der PolyBur® Exkavationsbohrer ist gebrauchsfertig und wird nach der Behandlung entsorgt (Einweginstrument). Er wird zusätzlich im pulpanahen Bereich eingesetzt, stellt jedoch kein Ersatz für den herkömmlichen Rosenbohrer dar (ZWR, 2016). 34

Abb. 13: Häufigkeitsverteilung zum Alter und Geschlecht der zur Verfügung stehenden Patientenklientel. 35

Abb. 14: Therapeutisches Behandlungsschema der Schritte 1-4 für die primäre Diagnostik und klinische Darstellung. Zunächst wurden die Zähne auf Karies diagnostisch untersucht. Liegen kariöse Läsionen vor, wurden diese Defekte dargestellt

und mittels einer intraoralen Fotokamera dokumentiert. Die Beurteilung erfolgte in Schritt 4 mit dem SIROinspect® und als Kontrolle mit der Sonde.....37

Abb. 15: Die Exkavation mit Polybur® erfolgt so lange, bis kein Material mehr abgetragen wird. Anschließend wird erneut eine Fotodokumentation mittels der intraoralen Kamera durchgeführt um den Exkavationsstatus zu dokumentieren. Abermals wird die Kavität mit SIROInspect® beurteilt und im Vergleich dazu die Sondenmessung durchgeführt.....38

Abb. 16: Unter Umständen muss eine Nachexkavation durchgeführt werden, bis das SIROInspect® den primären Therapieendpunkt (Kariesfreiheit, d.h. keine Fluoreszenzdetektion), darstellt. Anschließend erfolgt die Fotodokumentation mittels intraoraler Kamera und im Weiteren die Beurteilung der Kavität mittels Sondenmessung im Vergleich. Ist die Kariesfreiheit aus Behandlersicht trotz SIROInspect® und Sonde immer noch nicht gegeben muss eine weitere Nachexkavation bis zum therapeutischen Endpunkt durchgeführt werden, um die Maßnahme abzuschließen.....39

Abb. 17: Häufigkeitsverteilung zum Alter und Geschlecht der für die Untersuchung herangezogenen Patienten Klientel.41

Abb. 18: Beispielhafte intraorale Kameraaufnahmen vor (T1, links) und nach der vollständigen Exkavation (T2, rechts) mit dem PolyBur®-System. Der Exkavationsbereich befindet sich innerhalb des mit einem Kreis markierten Areals.....42

Abb. 19: a) Darstellung des kariösen Defekts (T1); b) Exkavation mittels PolyBur®, bis kein Materialabtrag mehr erfolgte (Sonde zeigte Karies an; SIROInspect® zeigte keine Karies mehr an (T2)); c) Nachexkavation (T3) mit dem Rosenbohrer, bis mittels Sonde keine Restkaries mehr erfasst wurde. Auch hier detektierte das SIROInspect® keine Karies mehr.....44

Abb. 20: a) Darstellung des kariösen Defekts (T1); b) Exkavation mittels PolyBur®, bis kein Materialabtrag mehr erfolgte (Sonde zeigte keine Karies an, mit SIROInspect® konnte Karies detektiert werden (T2)); c) Nachexkavation (T3) mit dem Rosenbohrer, bis anhand von Sonde und SIROInspect® keine kariösen Bereiche mehr detektiert bzw. angezeigt wurden.....45

Abb. 21: Fluoreszenzspektrum von Protoporphyrin IX bei der Anregungswellenlänge von 405 nm (mit freundlicher Genehmigung J. Meister).....52

8. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Alters- und Geschlechtsverteilung des zur Verfügung stehenden Patientenpools.	35
Tab. 2: Gesamtdarstellung der Detektionsergebnisse hinsichtlich des therapeutischen Nachweises von Karies mittels Sonde und SIROInspect® in den Schritten T1, T2 und T3.	43
Tab. 3: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies beider Detektionsverfahren in der Primärdiagnostik (T1).	45
Tab. 4: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies beider Detektionsverfahren bei der Bestimmung des Kariesexkavationsstatus (T2).	46
Tab. 5: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies beider Detektionsverfahren für die Nachexkavation (T3).	46
Tab. 6: Zusammenfassung der Sensitivitäts- und Spezifitätswerte für T1, T2 und T3, sowie die Vorhersagewerte (positiv und negativ) für beide Detektionsverfahren.	47
Tab. 7: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies für die Sonde bei der Bestimmung des Kariesexkavationsstatus (T2).	48
Tab. 8: Häufigkeitsverteilung der Nachweisgenauigkeit von Karies für das SIRO-Inspect® bei der Bestimmung des Kariesexkavationsstatus (T2).	48
Tab. 9: Getrennte Auflistung der Sensitivitäts- und Spezifitätswerte von Sonde und SIROInspect® für T2, sowie die dazugehörigen Vorhersagewerte (positiv und negativ) für beide Detektionsverfahren.	49
Tab. 10: Auswahl der mit den Detektionsverfahren zu bewertenden Zähne gemäß der Ein- (bleibende, vitale, Prämolaren und Molaren) und Ausschlusskriterien (Milch- und bleibende Frontzähne, wurzelkanalbehandelte und überkronte Zähne sowie indirekte Überkappung).	60

9. Literaturverzeichnis

Augenstein M. Fluoreszenzgeführte Kariesexkavation an kariösen Zähnen. Dissertationsschrift aus der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn, 2014

Augenstein M, Frentzen M. Fluorescence-guided caries excavation of decayed teeth. An ex vivo study. *Laser* 2016; 1: 6–10

Anderson MH, Charbeneau GT. A comparison of digital and optical criteria for detecting carious dentin. *J Prothet Dent* 1985; 53: 643–646

Banerjee A, Kidd EA, Watson TF. In vitro evaluation of five alternative methods of carious dentine excavation. *Caries Res* 2000; 34: 144–150

Baume L. Allgemeine Grundsätze für eine internationale Normung der Kariesstatistiken. *Int Dent J* 1962; 12: 279

Benedict HC. Note on the fluorescence of teeth in ultraviolet rays. *Science* 1928; 67: 442

Benzian H, Monse B, Belizario Jr. V, Schratz A, Sahin M, van Palenstein Helder W. Public health in action: Effective school health needs renewed international attention. *Glob Health Action* 2012; 5: 14870

Bille J, Hesselgren K, Thylstrup A. Dental caries in Danish 7-, 11- and 13-year-old children in 1963, 1972 and 1981. *Caries Res* 1986; 20: 534–542

Black GV. A work on operative dentistry. Chicago: Medico-Dental Publishing Company, 1908

Buchalla W, Attin T, Niedmann Y, Niedmann PD, Lennon A. Porphyrins are the cause of red fluorescence of carious dentin: Verified by gradient reversed-phase HPLC. *Caries Res* 2008; 42: 223

Buchalla W, Lennon AM. Die Fluoreszenzunterstützte Kariesexkavation – Funktionsprinzip und Empfehlungen für den Gebrauch. Deutscher Ärzte-Verlag | DZZ | Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 2015; 70: 110–120

Buddecke E. Biochemische Grundlagen der Zahnmedizin. Berlin, New York: de Gruyter, 1981

Dammaschke T, Stratmann U, Danesh G, Schäfer E, Ott KHR. Reaction of rat pulp tissue to Carisolv 'new gel'--a histocytological evaluation. Aust Dent J 2006a; 51: 57–63

Dammaschke T, Rodenberg TN, Schäfer E, Ott KHR. Efficiency of the polymer bur smartprep compared with conventional tungsten carbide bud bur in dentin caries excavation. Oper Dent 2006b; 31: 256–260

Dammaschke T, Vesnic A, Schäfer E. In vitro comparison of ceramic burs and conventional tungsten carbide bud burs in dentin caries excavation. Quintessence Int 2008; 39: 495–499

Decerle N, Nicolas E, Hennequin M. Chewing deficiencies in adults with multiple untreated carious lesions. Caries Res 2013; 47: 330–337

Dentaltix. PolyBur® P1.

<https://www.dentaltix.com/en/komet/polybur-p1-polymer-bur-ca-10u#descrepcion>,

Januar 2023

Dibdin GH. The water in human dental enamel and its diffusional exchange measured by clearance of tritiated water from enamel slabs of varying thickness. Caries Res 1993; 27: 81–86

Dürr Dental GmbH & Co. KG. Karies- und Plaquediagnostik – Dürr VistaProof Fluoreszenzkamera.

<https://www.zmz-rothhaarsteig.de/pages/leistungen/vistaproof.pdf>, Dezember 2022

Eberhart J, Frentzen M, Thoms M. Neue optische Methoden zur Kariesdetektion. Fluoreszenzbasierte Verfahren zur Erkennung nichtkavierter Läsionen. ZWR 2007, 116: 148–151

Ekstrand KR, Gimenez T, Ferreira FR, Mendes FM, Braga MM. The international caries detection and assessment system-ICDAS: A systematic review. Caries Res 2018; 52: 406–419

Ekstrand KR, Martignon S, Ricketts DJ, Qvist V. Detection and activity assessment of primary coronal caries lesions: a methodologic study. *Oper Dent* 2007; 32: 225–235

European Commission. Radiation protection 136 – European guidelines on radiation protection in dental radiology. Brüssel: 2004

Fusayama T, Okuse K, Hosoda H. Relationship between hardness, discoloration and microbial invasion in carious dentin. *J Dent Res* 1966; 45: 1033–1046

Ganter P, Al-Ahmad A, Wrbas K-T, Hellwig E, Altenburger MJ. The use of computer-assisted FACE for minimal-invasive caries excavation. *Clin Oral Investig* 2014; 18: 745–751

Gängler P, Hoffmann T, Willerhausen B, Schwenzer N, Ehrenfeld M. Konservierende Zahnheilkunde und Parodontologie, 2. Aufl. Stuttgart, New York: Thieme Verlag, 2005: 368

Gente M, Wenz HJ. Nicht-invasive Methode der Dentinwiderstandsmessung zur Begrenzung der Präparationstiefe. *Dtsch Zahnärztl Z* 1991; 46: 771–773

Grunau O, Ganß C, Schlüter N. Neue Strategien zur Prävention und Therapie von Erosionen. *Zahnmedizin up2date* 2013; 1: 15–29

Haak R, Ziebolz D, Schneider H, Krause F. Darf es ein bisschen weniger sein? Aktuelle Aspekte der Kariesentfernung. *Quintessenz* 2015; 66: 1129–1138

Haak R. Selektive Kariesexkavation zur Vitalerhaltung der Pulpa. *Dental Tribune (German Edition)* 2016; 10: 12

Haak R, Wicht MJ. Caries detection and quantification with DIAGNOdent: prospects for occlusal and root caries? *Int J Comput Dent* 2004; 7: 347–358

Hannigan A, O'Mullane DM, Barry D, Schäfer F, Roberts AJ. A caries susceptibility classification of tooth surfaces by survival time. *Caries Res* 2000; 34: 103–108

Heinrich R, Künzel W, Tawfiq H. The diagnosis of approximal caries – a comparison of clinical, fiber optic and x-ray diagnostic procedures (the diagnosis of approximal caries). Dtsch. Zahn Mund Kieferheilkd Zentralbl 1991; 79: 535–542

Heinrich-Weltzien R, Kühnisch J, Oehme T, Weerheijm K, Stößer L. Okklusalkaries-Diagnostik – Ein Vergleich von DIAGNOdent mit konventionellen Methoden. Oralprophylaxe 2003; 25: 77–80

Hellwig E, Klimek J, Attin T. Einführung in die Zahnerhaltung. München, Wien, Baltimore: Urban und Schwarzenberg, 1995

Hellwig E, Klimek J, Attin T. Restaurationen mit plastischen Füllungsmaterialien. In: Hellwig E, Klimek J, Attin T. eds. Einführung in die Zahnheilkunde; München: Elsevier GmbH, 2007: 80–231

Henry Schein Dental. CeraBur® K1SM.

<https://www.henryschein.nl/nl-nl/dentaal/p/boren/diversen-boren/cerabur-k1sm-ra-o-014-5-stuks/503856>, Januar 2023

Holsten D. Kariesexkavation & PolyBur. ZWR 2016; 125: 118–119

Ifland S, Kühnisch J, Heinrich-Weltzien R. Die quantitative lichtinduzierte Fluoreszenz (QLF). ZWR 2004; 113: 248–254

Institut der Deutschen Zahnärzte. Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS V), 1. Auflage. BZÄK/KZBV, „Hrsg.“, Berlin: orangeblue relations 2016

Iwami Y, Shimizu A, Narimatsu M, Hayashi M, Takeshige F, Ebisu S. Relationship between bacterial infection and evaluation using a laser fluorescence device, DIAGNOdent. Eur J Oral Sci 2004; 112: 419–423

Jablonski-Momeni A. Visuelle und instrumentelle Verfahren zur Diagnose der okklusalen Karies. Dentalhygiene Journal 2010; 4: 6–9

Jablonski-Momeni A, Heinzl-Gutenbrunner M, Klein SMC. In vivo performance of the VistaProof fluorescence-based camera for detection of occlusal lesions. *Clinical Oral Investigations* 2014; 18: 1757–1762

Keyes PH. Recent advances in dental caries research. *Bacteriology. Bacteriological findings and biological implications. Int Dent J* 1962; 12: 443–464

Kielbassa AM, Attin T, Hellwig E. Der Einsatz des Kariesdetektors als diagnostisches Hilfsmittel bei der Therapie der Caries profunda. *Endodontie* 1994; 3: 207–216

König KG. *Karies und Kariesprophylaxe*. Stuttgart: Thieme Verlag, 1987

König K, Flemming G, Hibst R. Laser-induced autofluorescence spectroscopy of dental caries. *Cell Mol Biol* 1998; 44: 1293–1300

Krause F. Fluoreszenzbasierte optische Methoden zur okklusalen Kariesdiagnostik. *LaserZahnheilkunde* 2008. 5: 13–19

Kühnisch J, Dietz W, Stösser L, Hickel R, Heinrich-Weltzien R. Effects of dental probing – a SEM evaluation. *Caries Res* 2007; 41: 43–48

Kühnisch J, Iffland S, Tranaeus S, Angmar-Månsson B, Hickel R, Stösser L, Heinrich-Weltzien R. Establishing quantitative light-induced fluorescence cutoffs for the detection of occlusal dentine lesions. *Eur J Oral Sci* 2006; 114: 483–488

Komet Dental. Excavation PolyBur®.

http://410461V0_PI_EN_PolyBur.pdf (marcant.net), Januar 2023

Lager A, Thornqvist E, Ericson D. Cultivable bacteria in dentine after caries excavation using rose-bur or carisolv. *Caries Res* 2003; 37: 206–211

Lai G, Zhu L, Xu X, Kunzelmann K-H. An in vitro comparison of fluorescence-aided caries excavation and conventional excavation by microhardness testing. *Clin Oral Investig* 2014; 18: 599–605

Lakowicz JR. *Principles of fluorescence spectroscopy*, 3. Aufl. New York: Springer Science and Business Media, 2006

Laurisch L. Individualprophylaxe: Diagnostik und Therapie des individuellen Kariesrisikos, 2. Aufl. Köln, München: DÄV-Hansa, 2000: 20

Leal SC, Bronkhorst EM, Fan M, Frencken JE. Effect of different protocols for treating cavities in primary molars on the quality of life of children in Brazil -1 year follow-up. *Int Dent J* 2013; 63: 329–335

Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde, 11. Aufl. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009a: 158

Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde, 11. Aufl. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2009b: 154

Lehmann KM, Hellwig E, Wenz H-J. Zahnärztliche Propädeutik: Einführung in die Zahnheilkunde, 12. Aufl. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag, 2012: 155

Lennon AM, Buchalla W, Switalski L, Stookey GK. Residual caries detection using visible fluorescence. *Caries Res* 2002; 36: 315–319

Lennon AM, Buchalla W, Rassner B, Becker K, Attin T. Efficiency of 4 caries excavation methods compared. *Oper Dent* 2006a; 31: 551–555

Lennon AM, Buchalla W, Brune L, Zimmermann O, Gross U, Attin T. The ability of selected oral microorganisms to emit red fluorescence. *Caries Res* 2006b; 40: 2–5

Lennon AM, Attin T, Buchalla W. Quantity of remaining bacteria and cavity size after excavation with FACE, caries detector dye and conventional excavation in vitro. *Oper Dent* 2007; 32: 236–241

Lennon AM, Attin T, Martens S, Buchalla W. Fluorescence-aided caries excavation (FACE), caries detector, and conventional caries excavation in primary teeth. *Pediatr Dent* 2009; 31: 316–319

Lohmann J, Schäfer E, Dammaschke T. Histological determination of cariously altered collagen after dentin caries excavation with the polymer bur PolyBur P1 in comparison to a conventional bud bur. *Head Face Med* 2019; 15:19

Lussi A, Hotz P. Approximal and smooth-surface caries. Their diagnosis and therapeutic principles. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1995; 105: 1438–1445

Lussi A, Schroeder A. Methoden zur Diagnose und Verlaufsdiaagnose der Karies. *Schweiz Monatsschr Zahnmed* 1998; 108: 4

Lussi A, Hibst R, Paulus R. DIAGNOdent: An optical method for caries detection. *J Dent Res* 2004. 83(Spec Iss C); C80-C83

Marthaler TM. A standardized system of recording dental conditions. *Helv Odontol Acta* 1966; 10: 1–18

Marsh PD. Dental plaque as a biofilm and a microbial community – implications for health and disease. *BMC Oral Health* 2006; 15 Suppl 1: S14

Matthijs S, Adriaens PA. Chlorhexidine varnishes: a review. *J Clin Periodontol.* 2002; 29: 1–8

Meredith N, Sherriff M, Setchel DJ, Swanson SA. Measurement of the microhardness and Young's modulus of human enamel and dentine using an indentation technique. *Arch Oral Biol* 1996; 41: 539–545

Mileman PA, Mulder E, van der Weele L. Factors influencing the likelihood of successful decisions to treat dentin caries from bitewing radiographs. *Community Dent Oral Epidemiol* 1992; 20: 175–180

Miller WD. The human mouth as a focus of infection. *The Lancet* 1891; 138: 340–342

Milton R, Wirthlin JR. Acid-reacting stains, softening, and bacterial invasion in human carious dentin. *J Dent Res* 1970; 49: 42–46

Mumford JM. Relationship between the electrical resistance of human teeth and the presence und extent of dental caries. *Br Dent J* 1956; 100: 239–244

Neuhaus KW, Ellwood R, Lussi A, Pitts NB. Traditional lesion detection aids. *Monogr Oral Sci* 2009; 21: 42–51

Neves AA, Coutinho E, Cardoso MV, de Munck J, Van Meerbeek B. Micro-tensile bond strength and interfacial characterization of an adhesive bonded to dentin prepared by contemporary caries-excavation techniques. *Dent Mater* 2011; 27: 552-562

Ogawa K, Yamashita Y, Ichijo T, Fusayama T. The ultrastructure and hardness of the transparent layer of human carious dentin. *J Dent Res* 1983; 62: 7-10

Olmez A, Tuna D, Oznurhan F. Clinical evaluation of diagnodent in detection of occlusal caries in children. *J Clin Pediatr Dent* 2006; 30: 287-291

Peers A, Hill FJ, Mitropoulos CM, Holloway PJ. Validity and reproducibility of clinical examination, fibre-optic transillumination, and bite-wing radiology for the diagnosis of small approximal carious lesions: an in vitro study. *Caries Res* 1993; 27: 307-311

Pereira AC, Eggertsson H, Martinez-Mier EA, Mialhe FL, Eckert GJ, Zero DT. Validity of caries detection on occlusal surfaces and treatment decisions based on results from multiple caries-detection methods. *Eur J Oral Sci* 2009; 117: 51-57

Prabhakar A, Kiran NK. Clinical evaluation of polyamide polymer burs for selective carious dentin removal. *J Contemp Dent Pract* 2009; 10: 26-34

Rankovic MJ, Kapor S, Khazaei Y, Crispin A, Schuler I, Krause F, Ekstrand K, Michou S, Eggmann F, Lussi A, Huysmans M-C, Neuhaus K, Kühnisch J. Systematic review and meta-analysis of diagnostic studies of proximal surface caries. *Clin Oral Investig* 2021; 25: 6069-6079

Reynolds RL. The determination of pulp vitality by means of thermal and electrical stimuli. *Oral Surg* 1966; 22: 231-240

Rieben A, Kielbassa A. Diagnostik in der Karies und Parodontitisprophylaxe. *Dent Hyg J* 2007; 2: 6-10

Richards D. Outcomes, what outcomes? *Evidence-Based Dentistry* 2005; 6: 1

Ricketts D, Kidd E, Weerheijm K, de Soet H. Hidden caries: What is it? Does it exist? Does it matter? *Int Dent J* 1997; 47: 259-265

Rohrbach U, Egli U. Qualitätsleitlinien in der Zahnmedizin. Schweiz Monatsschr Zahnmed 2005; 115: 7

Rock WP, Kidd EA. The electronic detection of demineralisation in occlusal fissures. Br Dent J 1988; 164: 243–247

Rodrigues JA, Hug I, Diniz MB, Lussi A. Performance of fluorescence methods, radiographic examination and ICDAS II on occlusal surfaces in vitro. Caries Res 2008; 42: 297–304

Roulett JF, Zimmer S. Prophylaxe und Präventivzahnmedizin. In: Rateitschak KH, Wolf HF. eds. Farbatlanten der Zahnmedizin 16. Aufl.; Stuttgart, New York: Thieme Verlag, 2004: 33

Sailer R, Paulus R, Hibst R. Analysis of carious lesions and subgingival calculi by fluorescence spectroscopy. Caries Res 2001; 35: 267

Schiffner U. Wissenschaftliche Stellungnahme der DGZMK: Mechanische und chemische Plaquekontrolle. DZZ 1995; 50: 863

Schöpp H. Elektrische und strahlungsphysikalische Eigenschaften von Hochdruckentladungen -insbesondere Quecksilberdampfentladungen- für die Beleuchtungstechnik. Dissertationsschrift aus der Fakultät IV Elektrotechnik und Informatik der Technischen Universität Berlin, 2002

Schwendicke F, Paris S. Kariesexkavation: Ein systematischer Überblick. Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift 2014; 69: 456–466

Schwendicke F, Paris S, Tu Y-K. Effects of using different criteria for caries removal: a systematic review and network meta-analysis. J Dent 2015; 3: 1–15

Schwendicke F, Frencken JE, Bjørndal L, Maltz M, Manton DJ, Ricketts D, Van Landuyt K, Banerjee A, Campus G, Doméjean S, Fontana M, Leal S, Lo E, Machiulskiene V, Schulte A, Splieth C, Zandona AF, Innes NPT. Managing carious lesions: Consensus recommendations on carious tissue removal. Adv Dent Res 2016; 28: 58–67

Schwendicke F, Frencken J, Innes N. Clinical recommendations on carious tissue removal in cavitated lesions. *Monogr Oral Sci* 2018; 27: 162–166

Slimani A, Nouioua F, Panayotov I, Giraudeau N, Chiaki K, Shinji Y, Cloitre T, Levallois B, Gergely C, Cuisinier F, Tassery H. Porphyrin and pentosidine involvement in the red fluorescence of enamel and dentin caries. *Int J Exp Dent Sci* 2016; 5: 1–10

Sonnabend E. Zum Röntgenbild bei der Diagnostik in der Zahnerhaltung. *Deutsche Zahnärztliche Zeitschrift* 1990; 44: 691

Stößer L. Die antibakterielle Wirkung der Fluoride auf die dentale Plaque. *Oralprophylaxe & Kinderzahnheilkunde*. 2006; 28: 170–183

Stokes GG. On the change of refrangibility of light. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 1852; 142: 463–562

Stookey G, Jackson R, Fereirra Zandona A, Analoui M. Dental caries diagnosis. *Dental Clinics of North America* 1999; 43: 665–677

Sunada I. New method for measuring the length of the root canal. *J Dent Res* 1962; 41: 375–387

Terrer E, Koubi S, Dionne A, Weisrock G, Sarraquigne C, Mazuir A, Tassery HJ. A new concept in restorative dentistry: light-induced fluorescence evaluator for diagnosis and treatment; Part 1: Diagnosis and treatment of initial occlusal caries. *J Contemp Dent Pract* 2009; 10: 86–94

Thoms M. Detection of intraoral lesions using a fluorescence camera. In: *Lasers in Dentistry XII*, Rechmann P, Fried D, eds., Proc. SPIE 2006; 6137: 1–7

Tsolmon L. Charakterisierung von Dentinoberflächen nach Bearbeitung mit neuen, minimal – invasiven und selbstlimitierenden Präparationsverfahren. *Dissertationsschrift aus der Medizinischen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität zu München*, 2008

Universitätsklinikum Gießen und Marburg. Ursachen für die Karies.

http://www.ukgm.de/ugm_2/deu/ugi_zpz/11001.html, Dezember 2022

Verdonschot EH, Wenzel A, Truin GJ, König KG. Performance of electrical resistance measurements adjunct to visual inspection in the early diagnosis of occlusal caries. J Dent 1993; 21: 332–337

Vural UK, Kütük ZB, Ergin E, Çakır FY, Gürkan S. Comparison of two different methods of detecting residual caries. Restor Dent Endod 2017; 42: 48–53

White GE, Tsamptsouris A, Williams DL. A longitudinal study of electronic detection of occlusal caries. J Periodont 1981; 5: 91–101

Wilde C. Fluoreszenzoptische Kariesdetektion bei restaurierten Zähnen. Dissertationsschrift aus der Medizinischen Fakultät der Universität Bonn, 2013

W&H, 2013: Facelight part 2 - The safe method of caries detection.

http://www.wh.com/en_global/dental-newsroom/reportsandstudies/new-article/00492/,

Dezember 2022

Yip HK, Samaranayake AG. Caries removal techniques and instrumentation: a review. Clin Oral Investig 1998; 2: 148–154

10. Danksagung

Ich möchte mich bei Herrn Prof. Dr. Matthias Frentzen für die Überlassung des Dissertationsthemas sowie für seine strukturierte und hilfsbereite Betreuung bei der Erstellung dieser Arbeit bedanken.

Des Weiteren möchte ich mich ganz herzlich bei Herrn Priv.-Doz. Dr. Jörg Meister für die tatkräftige Unterstützung bei der Auswertung der Datenlage und seiner unermüdlichen Geduld bei der Korrekturlesung bedanken.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinen Eltern, die es mir ermöglicht haben, mein zahnmedizinisches Studium zu absolvieren und meinem Bruder Mehdi, der durch seine beharrliche Motivation zum Abschluss dieser Arbeit beigetragen hat.

Abschließend möchte ich mich bei meiner liebevollen Ehefrau Rosi und meinen Kindern Hanna und Armin sowohl für ihre umfangreiche emotionale und mentale Unterstützung als auch für die bedingungslose Hilfsbereitschaft beim Erstellen dieser Arbeit bedanken.