

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München
Direktor: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel



NEUARTIGE ENTWICKLUNGEN IN DER KARIESDIAGNOSTIK UND -THERAPIE

Habilitation
an der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilian-Universität zu München

vorgelegt von
Dr. med. dent. Katrin Heck
aus Meiningen

2022

Meinem Mann Marcel & meinen Söhnen Raphael und Samuel

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Neuartige Entwicklungen in der Kariesdiagnostik	1
1.2 Neuartige Entwicklungen in der Kariestherapie	2
2 Eigene Publikationen	5
2.1 Neuartige Entwicklungen in der Kariesdiagnostik	5
2.1.1 Originalarbeit: Heck K, Litzenburger F, Ullmann V, Hoffmann L, Kunzelmann KH (2021) In vitro comparison of two types of digital X-ray sensors for proximal caries detection validated by micro-computed tomography. Dentomaxillofac Radiol 50 (3):20200338. doi:10.1259/dmfr.20200338 (IF 2020: 2.419)	10
2.1.2 Originalarbeit: Lederer A, Kunzelmann KH, Heck K, Hickel R, Litzenburger F (2019) In vitro validation of near-infrared transillumination at 780 nm for the detection of caries on proximal surfaces. Clin Oral Investig 23 (11):3933-3940. doi:10.1007/s00784-019-02824-0 (IF 2019: 2.812)	12
2.1.3 Originalarbeit: Litzenburger F, Heck K, Pitchika V, Neuhaus KW, Jost FN, Hickel R, Jablonski-Momeni A, Welk A, Lederer A, Kühnisch J (2018) Inter- and intraexaminer reliability of bitewing radiography and near-infrared light transillumination for proximal caries detection and assessment. Dentomaxillofac Radiol 47 (3):20170292. doi:10.1259/dmfr.20170292 (IF 2018: 1.525)	14
2.1.4 Originalarbeit: Litzenburger F, Lederer A, Kollmuss M, Hickel R, Kunzelmann KH, Heck K (2020) Near-infrared transillumination with high dynamic range imaging for occlusal caries detection in vitro. Lasers Med Sci 35 (9):2049-2058. doi:10.1007/s10103-020-03078-z (IF 2020: 3.161)	16
2.1.5 Originalarbeit: Litzenburger F, Schäfer G, Hickel R, Kühnisch J, Heck K (2021) Comparison of novel and established caries diagnostic methods: a	

	clinical study on occlusal surfaces. BMC Oral Health 21 (1):97. doi:10.1186/s12903-021-01465-8. (IF 2020: 2.757)	18
2.1.6	Originalarbeit: Lederer A, Kunzelmann KH, Heck K, Hickel R, Litzenburger F (2019) In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection. Eur J Oral Sci 127 (6):515-522. doi:10.1111/eos.12663 (IF 2019: 2.220)	20
2.1.7	Originalarbeit: Litzenburger F, Heck K, Kaisarly D, Kunzelmann KH (2021) Diagnostic validity of early proximal caries detection using near-infrared imaging technology on 3D range data of posterior teeth. Clin Oral Investig. doi:10.1007/s00784-021-04032-1 (IF 2020: 3.573)	22
2.1.8	Originalarbeit: Heck K, Litzenburger F, Geitl T, Kunzelmann K-H (2021) Near-infrared reflection at 780 nm for detection of early proximal caries in posterior permanent teeth in vitro. Dentomaxillofac Radiol 0:20210005. doi:10.1259/dmfr.20210005. (IF 2020: 2.419)	24
2.2	Neuartige Entwicklungen in der Kariestherapie	26
2.2.1	Originalarbeit: Fotiadou C, Frasheri I, Reymus M, Diegritz C, Kessler A, Manhart J, Hickel R, Klinke T, Heck K (2019) Corrigendum: A 3-year controlled randomized clinical study on the performance of two glass-ionomer cements in Class II cavities of permanent teeth. Quintessence Int 51 (1):e1-e11. doi:10.3290/j.qi.a43755 (IF 2019: 1.460)	29
2.2.2	Originalarbeit: Heck K, Frasheri I, Diegritz C, Manhart J, Hickel R, Fotiadou C (2020) Six-year results of a randomized controlled clinical trial of two glass ionomer cements in class II cavities. J Dent 97:103333. doi:10.1016/j.jdent.2020.103333 (IF 2020: 4.379)	31
2.2.3	Originalarbeit: Heck K, Manhart J, Hickel R, Diegritz C (2018) Clinical evaluation of the bulk fill composite QuiXfil in molar class I and II cavities: 10-year results of a RCT. Dent Mater 34(6):e138-e147. doi:10.1016/j.dental.2018.03.023 (IF 2018: 4.640)	33
2.2.4	Originalarbeit: Hoffmann L, Neuerer C, Heck K, Kunzelmann KH (2021) Bulk-fill composites compared to a nanohybrid composite in class II cavities – a two year follow-up study. J Adhes Dent 23 (5):389-396. doi:10.3290/j.jad.b2000185 (IF 2020: 2.359)	34
3	Diskussion	36

3.1	Neuartige Entwicklungen in der Kariesdiagnostik	36
3.1.1	Vergleich Röntgensensoren mit CCD- und neuer CMOS-Sensor-Technologie zur Diagnostik früher approximaler Läsionen	36
3.1.2	Kariesdiagnostik mittels nahinfraroter Transillumination	40
3.1.3	Approximalkariesdiagnostik mittels nahinfraroter Reflexion	48
3.2	Neuartige Entwicklungen in der Kariestherapie	53
3.2.1	Glasionomerezemente	53
3.2.2	Bulk-Fill Komposite	59
4	Zusammenfassung	66
5	Tabellen	70
6	Literaturverzeichnis	81
7	Danksagung	105

Abkürzungsverzeichnis

μ CT	<i>Microcomputertomographie</i>
3D	<i>Dreidimensional</i>
aOR	<i>Adjustierte Odds Ratio</i>
ACIS	<i>Alternating current impedance spectroscopy / Wechselstrom-Impedanz-Spektroskopie</i>
AFR	<i>Annual failure rate / Jährliche Versagensrate</i>
ART	<i>Atraumatic restorative treatment / Atraumatische restaurative Behandlung</i>
AUC	<i>Area under the (receiver characteristic) curve / Fläche unter der (Isosensitivitäts-) Kurve</i>
AUROC	<i>Area under the receiver operating characteristic curve / Fläche unter der Isosensitivitätskurve</i>
BF	<i>Bissflügelröntgenaufnahme</i>
CCD	<i>Charged-coupled device / Ladungsgekoppeltes Bauteil</i>
CMOS	<i>Complementary metal-oxide-semiconductor / Komplementärer/sich ergänzender Metall-Oxid-Halbleiter</i>
D1	<i>Äußere Schmelzhälfte</i>
D2	<i>Innere Schmelzhälfte</i>
D3	<i>Äußere Dentinhälfte</i>
D4	<i>Innere Dentinhälfte</i>
DC	<i>Diagnocam</i>
DIFOTI	<i>Digitale fiberoptische Transillumination</i>

FOTI	<i>Fiberoptische Transillumination</i>
GIZ	<i>Glasionomerzement</i>
ICDAS	<i>International Caries Detection and Assessment System / Internationales System zur Erkennung und Bewertung von Karies</i>
InGaAs	<i>Indium-Gallium-Arsenid</i>
kV	<i>Kilovolt</i>
LF	<i>Laserfluoreszenz</i>
mm	<i>Millimeter</i>
MPa	<i>Megapascal</i>
n. b.	<i>Nicht berichtet</i>
NIR	<i>Nahinfrarot</i>
NIRR	<i>Nahinfrarot-Reflexion</i>
NIRR _{780nm}	<i>Nahinfrarot-Reflexion bei 780 nm</i>
NIRT	<i>Nahinfrarot-Transillumination</i>
NIRT-HDRI	<i>Nahinfrarot-Transillumination mit High Dynamic Range Imaging / Nahinfrarot-Transillumination Bildgebung mit hohem Dynamikbereich</i>
nm	<i>Nanometer</i>
QLF	<i>Quantitative lichtinduzierte Fluoreszenz</i>
ROC	<i>Receiver operating characteristic curve / Isosensitivitätskurve</i>
s	<i>Sekunde</i>
SN	<i>Sensitivität</i>
SP	<i>Spezifität</i>

VI	<i>Visuelle Inspektion</i>
wk	<i>Gewichtetes Kappa</i>
κ	<i>Kappa</i>

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht <i>Sensitivität (SN) und Spezifität (SP)</i> der im Rahmen dieser Habilitation (*) durchgeführten Studien zu Bissflügelröntgen, NIRT und NIRR sowie in der Literatur berichtete Werte zu NIRT und NIRR für <i>Approximalkaries</i>	70
Tabelle 2: Übersicht <i>Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit</i> der im Rahmen dieser Habilitation (*) durchgeführten Studien zu Bissflügelröntgen, NIRT und NIRR sowie in der Literatur berichtete Werte zu NIRT und NIRR für <i>Approximalkaries</i>	73
Tabelle 3: Übersicht <i>Sensitivität (SN) und Spezifität (SP)</i> der im Rahmen dieser Habilitation (*) durchgeführten Studien zu Bissflügelröntgen, NIRT und NIRR sowie in der Literatur berichtete Werte zu NIRT und NIRR für <i>Okklusalkaries</i>	75
Tabelle 4: Übersicht <i>Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit</i> der im Rahmen dieser Habilitation (*) durchgeführten Studien zu Bissflügelröntgen, NIRT und NIRR sowie in der Literatur berichtete Werte zu NIRT und NIRR für <i>Okklusalkaries</i>	77
Tabelle 5: Zusammenstellung klinischer Studien zu hochviskösem GIZ mit Coating und Bulk-Fill-Kompositen in <i>Klasse-II-Kavitäten</i> und deren jeweiligen Überlebensraten sowie jährlichen Ausfallraten (AFR). Studien, die im Rahmen dieser Habilitation durchgeführt wurden, sind mit einem * markiert.	78

1 Einleitung

1.1 Neuartige Entwicklungen in der Kariesdiagnostik

Während sich die Kariestherapie vor einigen Jahrzehnten auf Bohren und Füllen beschränkte, steht dem Zahnarzt heute ein breiteres Spektrum an nicht- oder minimal-invasiven Therapien zur Verfügung. So können heute beispielsweise früh erkannte proximale kariöse Läsionen adhäsiv infiltriert oder durch entsprechende prophylaktische Maßnahmen arretiert werden [3, 156]. Eine unbehandelte, versteckte okklusale Karies kann zu endodontischen Problemen führen, obwohl sie bei frühzeitiger Erkennung mit minimalinvasiven Restaurationstechniken behandelt werden kann. Allerdings stellt die Detektion der Karies, insbesondere im Frühstadium im Approximalraum, als auch von versteckter okklusaler Karies, den Behandler weiterhin vor Herausforderungen.

Die im klinischen Alltag etablierten Methoden, die visuelle Inspektion und die digitale Bissflügelröntgenaufnahme (BF) liefern schwache diagnostische Sensitivitätswerte, insbesondere für die Detektion proximaler Initialkaries in Schmelz und Dentin [110, 114, 159, 162, 180]. Dies gilt insbesondere für Schmelzläsionen, da diese Läsionen aufgrund ihrer geringeren Größe und ihres geringeren Mineralverlusts in Bissflügelröntgenaufnahmen schwieriger zu erkennen sind als Dentinläsionen [50].

Ein Problem im klinischen Alltag stellt zudem die Erkennung von sogenannter "hidden caries", ausgedehnter Dentinkaries ohne auffällige Oberflächendefekte dar. Diese Kariesart lässt sich zumeist nicht visuell detektieren [168, 215]. Okklusal ist sie meist visuell nicht zu erkennen, da die Fissuren in der Regel klinisch gesund oder allenfalls verfärbt erscheinen [214]. Aber auch proximal ist die visuelle Diagnostik schwierig, da der geschlossene Kontakt zum Nachbarzahn keine direkte Beurteilung der Zahnoberfläche zulässt und Demineralisationsprozesse daher oft unerkannt bleiben [50, 159]. Weiterhin wird diskutiert, ob der verstärkte Einsatz von lokalen Fluoridierungsmaßnahmen und die damit verbundene Remineralisierung des Schmelzes ursächlich für das Auftreten von "hidden caries" ist [216]. Die sichtbar intakte Schmelzoberfläche, die zudem durch Fluorapatit härter ist, verdeckt hierbei die Dentinläsion. Erst auf Röntgenaufnahmen lässt sich eine ausgedehnte unterminierende Dentinkaries zumeist diagnostizieren, welche allerdings auch mit einer Strahlenbelastung für den Patienten einhergehen.

Neue lichtoptische Diagnoseverfahren haben das Potenzial, Karies auch ohne ionisierende Strahlung besser zu erkennen. Vielversprechend sind vor allem Geräte, die mit nahinfrarotem Licht (>780 nm) unter Nutzung des Prinzips der Transillumination, aber auch der Reflexion arbeiten und erst kürzlich in die zahnärztliche Praxis eingeführt wurden [100, 188]. Bisherige Geräte, die mit dem Prinzip der Transillumination arbeiten, wie z. B. FOTI (fiberoptische Transillumination und DIFOTI (digitale fiberoptische Transillumination), nutzen dafür eine Faseroptik zur Durchleuchtung von Zähnen. Kariöse Läsionen erscheinen dabei dunkel, da eine erhöhte Streuung und Absorption durch die Läsion die optische Transmission reduziert. Diese Systeme verwenden jedoch Wellenlängen im sichtbaren Bereich um 650 nm, bei denen starke Lichtstreuung eine Durchleuchtung des gesamten Zahnes verhindert. Die Anwendung ist zudem auf Frontzähne und Prämolaren limitiert, da die Intensität des Lichtes in der Regel nicht für die Durchdringung an großen Molaren und Prämolaren ausreicht. Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Attenuation im Gewebe jedoch ab, so dass der nahinfrarote Wellenlängenbereich für die Kariesdiagnostik vielversprechend erscheint.

Diese Habilitationsschrift umfasst im ersten Teil das Themengebiet „neuartige Entwicklungen in der Kariesdiagnostik“. Im Einzelnen umfasst sie: In-vitro- aber auch In-vivo-Untersuchungen zur diagnostischen Leistung, Validität und Reliabilität der nahinfraroten Kariesdiagnostik mittels Transillumination im Wellenlängenbereich von 780 nm und Reflexion im Wellenlängenbereich von 780 nm und 850 nm sowie eine Untersuchung zur diagnostischen Leistungsfähigkeit von neuen CMOS Röntgensensoren.

1.2 Neuartige Entwicklungen in der Kariestherapie

Fortgeschrittene kariesbedingte Schäden der Zähne im Seitenzahnbereich, welche eine invasive Therapie erfordern, werden zumeist mittels direkter Füllungen versorgt. Lange Zeit wurde hierfür Amalgam verwendet, ein preiswertes und langlebiges Material, welches allerdings Quecksilber enthält. Im Jahr 2013 wurde im Rahmen der Minamata-Konvention ein "Amalgam-Phase-Down" beschlossen, das 2017 in Kraft trat und mittlerweile von über 130 Ländern ratifiziert wurde [200]. Im Jahr 2015 beschloss der Wissenschaftliche Ausschuss für neu auftretende und neu identifizierte Gesundheitsrisiken „Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks“ (SCENIHR), die Verwendung von Dentalamalgam zu reduzieren, um die Quecksilberbelastung zu verringern. Zudem wurde festgestellt, dass die

Entwicklung alternativer, kostengünstiger biokompatibler Materialien weiter erforscht werden muss [181].

Als direkte Restaurationsmaterialien kommen unter diesen Gesichtspunkten unter anderem Glasionomerezemente (GIZ) als auch moderne Bulk-Fill-Komposite in Frage. GIZ sind schnell zu platzieren, wirtschaftlich, biokompatibel und geben Fluorid ab [55, 135, 209]. Darüber hinaus weist diese Materialgruppe unter allen Füllungsmaterialien eine einzigartige chemische Adhäsion zur Zahnhartsubstanz auf. Die Adhäsion von ca. 5 MPa an Dentin und Schmelz in vitro ist zwar deutlich geringer als die Adhäsion moderner Haftvermittler, aber in vivo verbessert die GIZ-Reifung noch die mechanischen Eigenschaften und das Wärmeausdehnungsverhalten ist deutlich günstiger als das von Kompositen [112, 148]. Des Weiteren unterliegt der Haftverbund von GIZ im Vergleich zu Komposit kaum einer Alterung. Allerdings besitzen GIZ eine geringere Bruchzähigkeit und einen erhöhten okklusalen Verschleiß [130, 221]. Um die Verschleißfestigkeit zu verbessern und Initialrisse zu füllen, wurden diese Materialien in letzter Zeit weiterentwickelt und in der ersten Phase der Aushärtung mit einem Coating überzogen, welches die Oberflächenporen schützt sowie zusätzlich abdeckt und so die mechanischen Eigenschaften des GIZ verbessert [65, 221].

Auch Komposite werden als direktes Füllungsmaterial im Seitenzahnbereich genutzt. Trotz der Vorteile einer schonenden Kavitätenpräparation ohne makromechanische Verstärkungsbereiche, dem maximalen Erhalt gesunder Zahnschubstanz, der adhäsiven Verstärkung schwacher Höcker und einer guten Ästhetik ist dieses Material weitaus teurer und gilt als schwieriger zu verarbeiten als Amalgam [135]. Aber auch der Zeitaufwand bei der Applikation von Kompositen ist höher, da konventionelle Komposite üblicherweise in einer inkrementellen Schichttechnik mit einer Schichtdicke von 2 mm verarbeitet werden, um die Probleme des Polymerisationsstress und der begrenzten Aushärtungstiefe zu überwinden [27]. Jedes Inkrement wird hierbei separat für 10 - 40 s belichtet, abhängig von der Intensität des Belichtungsgeräts, der Zusammensetzung und der Farbe/Transluzenz des Kompositmaterials [167]. Daraus ergibt sich ein zeitaufwändiges Applikationsverfahren von kunststoffbasierten Kompositen, das aus wirtschaftlichen Gründen ein angemessenes Honorar zur Deckung der Kosten erfordert [203].

Daher wurden moderne Bulk-Fill Komposite entwickelt, welche im Vergleich zu konventionellen Kompositen schneller und einfacher in der Kavität verarbeitet werden können und gleichzeitig gute mechanische Eigenschaften - wie Randadaption, Versiegelungseigenschaften, Bruchfestigkeit, Abriebfestigkeit - und langfristigen klinischen

Erfolg aufweisen [123, 124, 136]. Diese Komposite können in Inkrementen von 4 mm in die Kavitäten eingebracht werden, ohne dass die Aushärtungszeit verlängert wird oder ein Aushärtungsgerät mit erhöhter Intensität verwendet werden muss [27, 161].

Für beide Materialien, GIZ und Bulk-Fill, bestand und besteht allerdings noch Bedarf an klinischen Studien, um ausreichende Langzeitüberlebensdaten sicherzustellen. Bislang wurden nur wenige Studien mit einer Dauer von über 3 Jahren veröffentlicht, und die Ergebnisse variierten stark, insbesondere für GIZ.

Der zweite Teil dieser Habilitationsschrift mit dem Themengebiet „neuartige Entwicklungen in der Kariestherapie“ umfasst klinische Langzeituntersuchungen hochviskösem GIZ und Bulk-Fill-Materialien.

2 Eigene Publikationen

Im folgenden Abschnitt werden 12 Originalarbeiten mit ihren übersetzten Zusammenfassungen und den dazugehörigen Publikationen vorgestellt. Diese wurden in englischsprachigen, peer-reviewed Journals mit Impact-Factor veröffentlicht. Vorangestellt ist jeweils eine Einführung in die jeweiligen Themenbereiche, die von dieser Habilitationsschrift betrachtet werden.

2.1 Neuartige Entwicklungen in der Kariesdiagnostik

Klinisch erfolgt die Kariesdiagnostik meist mittels visueller Methoden, welche eine hohe Genauigkeit bei der Detektion von zugänglichen kariösen Läsionen aufweisen. Allerdings ist die Sensitivität für proximale, nicht direkt zugängliche Läsionen begrenzt. Im klinischen Alltag wird daher oft die visuell-taktile Methode im Seitenzahnbereich durch Bissflügelröntgenaufnahmen ergänzt. Der Vorteil dieser Technik ist, dass diese Informationen über das Vorhandensein einer Läsion sowie ihrer Tiefe bzw. Größe liefert. Konventionelle als auch digitale Bissflügelröntgenaufnahmen weisen für die Detektion proximaler Läsionen eine hohe Spezifität, allerdings nur eine geringe Sensitivität von 0,4 – 0,6 auf, frühe Läsionen im Schmelz sogar nur eine Sensitivität von 0,2 – 0,3 [110, 114, 159, 162, 179]. Aufgrund ihrer geringen Ausdehnung und des noch recht geringen Mineralverlustes, im Vergleich zum umgebenden gesunden Schmelz, ist vor allem die Detektion der Schmelzkaries schwierig [50]. Aber auch anatomische Besonderheiten und Überlagerungsartefakte im proximalen Bereich erschweren zusätzlich die Kariesdiagnostik im Interdentalebereich mittels Bissflügelröntgenaufnahmen zusätzlich. Zudem muss die Strahlenbelastung für den Patienten bei der Verwendung der Bissflügel-Röntgentechnik zur Kariesdiagnostik stets kritisch hinterfragt werden, da diese den Patienten ionisierender Strahlung aussetzt, welche potenziell schädliche Auswirkungen haben kann [92]. Dies ist vor allem bei Kindern und Jugendlichen problematisch. Zudem schränkt dies die Wiederholbarkeit der Aufnahmen ein. Daher werden proximale kariöse Läsionen in ihrer Prävalenz und ihrem Progressionsgrad häufig falsch eingeschätzt [162, 163]. Obwohl die Fehlinterpretation von Befunden in Bissflügelröntgenaufnahmen zu einer Überschätzung und Überbehandlung von Karies führen kann, ist diese in der klinischen Routine von Zahnärzten weltweit aktuell nicht mehr wegzudenken [14].

Aktuelle Entwicklungen in der Röntgentechnik durch den Wechsel der digitalen Sensortechnologie von CCD (charged-coupled device) zu CMOS (complementary metal-

oxide-semiconductor) versprechen Verbesserungen in der Kariesdiagnostik. Neue CMOS Sensoren sollen durch eine höhere Auflösung und Pixelgröße, aber auch durch mehr Graustufen (Bit) und reduziertem Rauschen, vor allem die Schmelzkariesdiagnostik verbessern. Allerdings bietet der CMOS-Sensor aufgrund seines Schichtaufbaus eine geringere Ladungsumsetzung und damit einhergehend eine geringere Empfindlichkeit [31]. Die mit dem CMOS-Sensor aufgenommenen Röntgenbilder erscheinen klinischen Untersuchern subjektiv kontrastreicher und detailreicher. Diese Beobachtung wurde auch von Brullmann et al. bestätigt, die die Kontrast- und Auflösungseigenschaften der beiden Sensortechnologien bei unterschiedlichen Belichtungszeiten analysierten und berichteten, dass die CMOS-basierten Sensoren bei höheren Belichtungszeiten eine höhere Leistung erreichten [25]. Allerdings muss bei der Verwendung eines CMOS-Sensors entweder die Belichtungszeit (0,08 - 0,16 s) oder die Spannung der Röntgenröhre (60 - 70 kV) im Vergleich zu den CCD-Sensoren, gemäß den Empfehlungen der Hersteller, erhöht werden. Nach den Strahlenschutzrichtlinien der Europäischen Union ist jedoch jeder Zahnarzt dafür verantwortlich, die Strahlenexposition von Patienten zu diagnostischen Zwecken auf das notwendige Minimum zu begrenzen [51]. Die Erhöhung der Strahlenexposition beim Wechsel von einer zu einer anderen Sensorgeneration ist daher nur zu rechtfertigen, wenn auch das diagnostische Ergebnis der Bissflügelröntgenaufnahme entsprechende Verbesserungen erzielt. Um festzustellen, ob mit einem Wechsel der Sensortechnologie eine Verbesserung der Genauigkeit bei der Detektion von frühen approximalen Läsionen zu erreichen ist, wurde daher eine In-vitro-Studie mit einem CCD- und einem CMOS-Sensortypen an extrahierten humanen Molaren und Prämolaren durchgeführt (2.1.1 Originalarbeit).

Aber auch alternative, nicht-ionisierende zusätzliche Detektionsmethoden zur Diagnose von kariösen Läsionen werden seit Jahren entwickelt und bereits in der klinischen Praxis eingesetzt. Hierzu gehören unter anderem die Laserfluoreszenz (LF), die faseroptische Transillumination und die quantitative lichtinduzierte Fluoreszenz (QLF). Diese weisen jedoch verschiedene Defizite in Bezug auf die Zuverlässigkeit oder die diagnostische Leistungsfähigkeit auf [113, 132, 144, 165, 170].

So kann die LF, welche Laserlicht mit einer Wellenlänge von etwa 650 nm und das spezifische Fluoreszenzverhalten kariogener Mikroorganismen nutzt, bei der okklusalen Kariesdiagnostik vor allem in der inneren Schmelzhälfte (D2) oder in der äußeren Dentinhälfte (D3) Karies mit hoher Sensitivität erkennen. Falsch-positive Messwerte können jedoch unter anderem durch fluoreszierende Materialien oder Moleküle verursacht werden [132]. Die approximale

Kariesdetektion mittels Laserfluoreszenz ist ebenfalls mit hoher Sensitivität möglich, allerdings nur an nicht zu nahen Kontaktpunkten, da die Glasspitze des Gerätes zu dick und zerbrechlich ist, um diese Bereiche zuverlässig zu messen [144]. Ein großer Nachteil ist, dass die Messungen nur punktuell erfolgen können und keine Bildgebung zur Dokumentation möglich ist.

Die faseroptische Transillumination hingegen nutzt sichtbares Licht im Wellenlängenbereich von 400 – 700 nm und basiert auf dem Phänomen der Lichtstreuung. Das Licht wird durch den Zahn gestrahlt und der Streueffekt kann als Schatten im Schmelz und Dentin gesehen werden. Unter Verwendung einer eingebauten digitalen Kamera – als DIFOTI System – kann durch die Bildgebung sowohl eine Überwachung als auch eine Dokumentation erfolgen. Jedoch ist für die Interpretation der Bilder ein hohes Maß an Erfahrung und Kalibrierung notwendig und führt daher oft zu ungenauen Ergebnissen [165, 176]. Zudem ist die Streuung und Abschwächung des verwendeten Weißlichts im Gewebe sehr hoch, da die Intensität für große Prämolaren und Molaren oft nicht ausreicht, so dass die Technik hauptsächlich auf Frontzähne und kleine Prämolaren beschränkt ist. Mittlerweile wurde die DIFOTI-Technologie weiterentwickelt und es werden Wellenlängen im Nahinfrarot-Bereich von 780 nm genutzt. Diese Nahinfrarot-Transillumination (NIRT) behält den Vorteil der Bilderfassung und -speicherung bei, bietet aber ein tieferes Eindringen des Lichts in die Zahnstruktur, wodurch kariöse Veränderungen deutlicher hervorgehoben werden [115, 188].

Obwohl bereits bewiesen wurde, dass mit zunehmender Wellenlänge der Attenuationskoeffizient im Schmelz abnimmt und bei einer Wellenlänge von 1310 nm sein Minimum erreicht, sich der Kontrast deutlich verbessert und In-vitro-Studien mit Zahnschnitten gezeigt haben, dass die Verwendung von Licht mit längeren Wellenlängen (1050 – 1600 nm) bessere Ergebnisse liefert, verwenden die derzeit auf dem Markt erhältlichen nahinfrarot-basierten Geräte zur Kariesdiagnostik mittels Transillumination Licht im Bereich von 780 nm [38, 61, 62, 102, 103, 120, 185]. Dies ist einerseits einer Patentierung von Wellenlängen über 795 nm für die Transillumination geschuldet, andererseits auch der Limitation der Kamerasensoren [63]. Günstige Silizium-Sensoren können theoretisch Wellenlängen bis 1000 nm verarbeiten, ihre Quanteneffizienz beträgt bei 800 nm allerdings nur 50 %, was zu einer schlechteren Bildqualität führt. Für Wellenlängen oberhalb von 850 nm werden daher teurere Kamerasensoren aus Indium-Gallium-Arsenid (InGaAs) benötigt [186].

Um die Genauigkeit der neuartigen NIRT bei der Detektion mit einer Wellenlänge von 780 nm von kariösen Läsionen zu eruieren, wurde daher jeweils eine In-vitro-Untersuchung zur approximalen (2.1.2. Originalarbeit) sowie okklusalen (2.1.4 Originalarbeit) Kariesdetektion

mittels NIRT durchgeführt. Ebenso wurde eine klinische Vergleichsuntersuchung der NIRT zur Detektion von okklusaler Karies zu bereits etablierten Methoden, wie der LF, der Wechselstrom-Impedanz-Spektroskopie und der BF durchgeführt (2.1.5 Originalarbeit). Da neben der Sensitivität und Spezifität auch eine hohe Reliabilität einer neuen Diagnostikmethode anzustreben ist, wurde die Übereinstimmung zwischen zehn Beurteilern für die Detektion von approximaler Karies mittels NIRT als auch Bissflügelröntgenaufnahmen ermittelt (2.1.3 Originalarbeit).

Eine weitere neuartige Kariesdetektionsmethode ist die Nahinfrarot-Reflexion (NIRR). Obwohl bereits vor zwei Jahrzehnten die sichtbare Lichtreflexion zur Überwachung von früher Demineralisation auf Zahnoberflächen vorgeschlagen wurde, hatte sich diese allerdings nicht als erfolgreich erwiesen [196]. Dies lag vor allem an der Absorption von sichtbarem Licht durch Verfärbungen, welche höher ist als die Streuung durch Demineralisation [32]. Da sich Verfärbungen meist in Bereichen befinden, in denen sich die meisten Läsionen entwickeln, war die Methode daher nicht einsetzbar [60]. Aber auch der hohe Brechungsindex von Schmelz und die damit einhergehende spiegelnde Reflexion stellten ein Problem dar. Die Verwendung von gekreuzten Polarisatoren kann diese Spiegelartefakte mittlerweile jedoch entfernen [22]. Ebenso konnte eine Verbesserung des Kontrastes zwischen gesundem und demineralisiertem Schmelz durch Depolarisation des Streulichtes erreicht werden [64].

Erste Reflexionsstudien unter Nutzung nahinfraroter Wellenlängen wurden im Jahr 2009 von Wu und Fried sowie Zakian et al. durchgeführt und konnten zeigen, dass der Kontrast bei einer Wellenlänge von 1300 nm signifikant höher ist im Vergleich zu sichtbarem Licht und dass Bilder mit mehreren Wellenlängen zur Unterstützung der Kariesdiagnostik verwendet werden können [217, 220]. Obwohl in ersten klinische Studien Wellenlängen von 1500 bis 1700 nm sehr gute Ergebnisse lieferten, arbeiten aktuell auf dem Markt befindliche Geräte, aufgrund des limitierenden Faktors der Kosten der InGaAs-Sensortechnologie, mit Wellenlängen von 850 nm [100, 185]. Um die Genauigkeit der NIRR bei der Detektion von früher Karies bei einer Wellenlänge von 850 nm zu bestimmen, wurde daher in zwei In-vitro-Untersuchungen die Leistungsfähigkeit zweier auf dem Markt befindlichen NIRR-Geräten zur approximalen Kariesdetektion untersucht (2.1.6 Originalarbeit und 2.1.7 Originalarbeit).

Kommerzielle Geräte sind jedoch nicht geeignet, um Hilfestellung bei der Bewertung eines physikalischen Prinzips zu geben, da viele der benötigten wesentlichen Informationen als Geschäftsgeheimnis gelten. So gibt es beispielsweise keine Informationen über das verwendete Linsensystem oder die Bildverarbeitungsroutinen, die zur Optimierung der Bildqualität

eingesetzt werden. Daher stellte sich die Frage nach dem Potenzial der NIRR (< 800 nm) unter optimierten technischen Bedingungen, wie z. B. dem Einsatz einer NIR-Kamera mit hoher Auflösung, hochwertigen optischen Komponenten und der Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln. Zu diesem Zweck wurde ein In-vitro-Modell entwickelt, das realistische Approximalkontakte simuliert und NIRR-Aufnahmen mit 780 nm generiert. Ziel der Studie war es, das Potenzial der NIRR zur Erkennung früher Approximalkaries zu untersuchen und festzustellen, ob sich die diagnostischen Ergebnisse der NIRR von denen der traditionellen digitalen Röntgengebissaufnahme unterscheiden (2.1.8 Originalarbeit).

- 2.1.1 Originalarbeit:** Heck K, Litzenburger F, Ullmann V, Hoffmann L, Kunzelmann KH (2021) In vitro comparison of two types of digital X-ray sensors for proximal caries detection validated by micro-computed tomography. *Dentomaxillofac Radiol* 50 (3):20200338. doi:10.1259/dmfr.20200338 (IF 2020: 2.419)

Zusammenfassung

Ziel: Ziel war es, die diagnostische Genauigkeit zweier intraoraler digitaler Röntgensensoren - CCD (charged-coupled device) und CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor) - für die Erkennung von Approximalkaries in permanenten Molaren und Prämolaren zu vergleichen. Die Microcomputertomographie diene als Referenzstandard.

Material und Methode: Zweihundertfünfzig Proben wurden in 3D-gedruckte Phantome montiert, und ihre Approximalflächen wurden in direkter Aufsicht nach ICDAS-Kriterien bewertet, um eine ausgewogene Stichprobe zu erstellen. Die Bissflügelröntgenaufnahmen wurden unter Verwendung von 3D-konstruierten Röntgenphantomen mit einem CCD-Sensor bei einer Belichtungszeit von 0,08 s und einem CMOS-Sensor bei 0,12 s und 0,16 s aufgenommen. Zwei Untersucher trafen die diagnostischen Entscheidungen nach festgelegten Kriterien jeweils zweimal in einem Abstand von zwei Wochen. Es wurden drei Diagnoseschwellen für gesunde Oberflächen und Schmelz- und Dentinkaries definiert und in einer Kreuztabelle dargestellt. Sensitivitäts- und Spezifitätswerte sowie die Gesamtgenauigkeit wurden berechnet und Receiver-Operating-Kurven erstellt und verglichen. Die Beurteilung der Reliabilität wurde mit Hilfe der linear gewichteten Kappa-Statistik durchgeführt.

Ergebnisse: Die Gesamtgenauigkeiten zwischen dem Referenzstandard und den verschiedenen Sensoren und Belichtungszeiten betragen 63,1 % (CCD), 67,1 % (CMOS-Sensor bei 0,12 s) und 70,7 % (CMOS-Sensor bei 0,08 s). Für alle Untersuchungsbedingungen wurden bei allen Schwellenwerten hohe Spezifitäts- aber niedrige Sensitivitätswerte gefunden. Die Vergleichswerte der Flächen unter der Receiver-Operating-Kurve zeigten keinen signifikanten Unterschied zwischen den Sensortypen und Belichtungszeiten. Die linear gewichtete Kappa-Analyse ergab eine nahezu perfekte Übereinstimmung für alle Bewertungen.

Schlussfolgerung: Es wurde kein signifikanter Unterschied für die diagnostische Leistung der approximalen Karieserkennung zwischen den verschiedenen Sensoren und Belichtungszeiten gefunden. Die erhöhte Belichtungszeit führte nicht zu einem signifikanten diagnostischen Vorteil.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32822231/>

- 2.1.2 Originalarbeit: Lederer A, Kunzelmann KH, Heck K, Hickel R, Litzemberger F (2019) In vitro validation of near-infrared transillumination at 780 nm for the detection of caries on proximal surfaces. Clin Oral Investig 23 (11):3933-3940. doi:10.1007/s00784-019-02824-0 (IF 2019: 2.812)**

Zusammenfassung

Ziel: Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, die Leistungsfähigkeit der Diagnocam (DC), welche mittels Nahinfrarot-Transillumination bei 780 nm arbeitet, zur Früherkennung von Karies zu untersuchen und mit der digitalen Bissflügelröntgenaufnahme zu vergleichen.

Material und Methode: Es wurden 120 Approximalflächen, die sich zu gleichen Teilen aus gesunden und kariösen Flächen zusammensetzten, anhand von Bildern bewertet, die mit der Diagnocam (Kavo, Biberach, Deutschland) und digitaler Bissflügelröntgenaufnahme (BF) aufgenommen wurden. Alle Bilder wurden zweimal von zwei kalibrierten Zahnärzten mit einem Mindestabstand von 2 Wochen zwischen den Untersuchungen beurteilt. Die Ergebnisse wurden mit Microcomputertomographie-Scans (μ CT) als Referenzstandard verglichen.

Ergebnisse: Die Inter-Rater-Reliabilität zeigte eine nahezu perfekte Übereinstimmung; außerdem wurde eine hohe Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit ermittelt. Die Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten zeigten eine starke Korrelation von Diagnocam und μ CT (0,82). BF und μ CT erreichten eine etwas geringere Korrelation (0,73). Die Oberflächen wurden in gesunde Oberflächen, Schmelzläsionen und Dentinläsionen eingeteilt, um die Intraklassen Korrelationskoeffizienten (ICCs), Sensitivität und Spezifität zu bestimmen. Die ICCs zwischen μ CT und BF reichten von 0,20 bis 0,63. Die ICCs zwischen Diagnocam und BF waren in allen Kategorien höher und reichten von 0,56 bis 0,83. Sensitivität, Spezifität und Genauigkeit von Diagnocam erreichten meist höhere Werte als BF. Bei der Erkennung von Schmelzläsionen betrug die Sensitivität 0,36 für BF und 0,59 für die DC. Die Flächen unter den Receiver Operating Characteristic (ROC)-Kurven der Diagnocam waren in allen Kategorien größer als die der BF.

Schlussfolgerung: Die Diagnocam ist im Vergleich zur digitalen Bissflügelradiologie eher in der Lage, initiale proximale Läsionen darzustellen, und zeigt zudem eine höhere

Empfindlichkeit für Dentinläsionen. Die Kariesprogression im Dentin kann mit der Diagnocam jedoch nicht zuverlässig bestimmt werden. Die Diagnocam kann als Ergänzung zur Röntgendiagnostik im klinischen Einsatz sinnvoll sein.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/30693402/>

- 2.1.3 Originalarbeit: Litzenburger F, Heck K, Pitchika V, Neuhaus KW, Jost FN, Hickel R, Jablonski-Momeni A, Welk A, Lederer A, Kühnisch J (2018) Inter- and intraexaminer reliability of bitewing radiography and near-infrared light transillumination for proximal caries detection and assessment. Dentomaxillofac Radiol 47 (3):20170292. doi:10.1259/dmfr.20170292 (IF 2018: 1.525)**

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser In-vitro-Studie war es, die Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit der digitalen Bissflügelröntgenaufnahme (BF) und der Nahinfrarot-Transillumination (NIRT) zur Erkennung und Beurteilung von Approximalkaries im Seitenzahnbereich zu bewerten.

Material und Methode: Aus einem Pool von 85 Patienten wurden 100 korrespondierende Paare von BF- und NIRT-Bildern (~1/3 gesund, ~1/3 mit Schmelzkaries und ~1/3 mit Dentin-Karies) ausgewählt. Zwölf Zahnärzte mit unterschiedlichem beruflichem Status und klinischer Erfahrung wiederholten die Auswertung in zwei verblindeten Zyklen. Zwei erfahrene Zahnärzte erstellten eine Referenzdiagnose, nachdem sie alle Bilder unabhängig voneinander analysiert hatten. Die statistische Analyse beinhaltete die Berechnung von einfachem (κ) und gewichtetem Kappa ($w\kappa$) als Maß für die Zuverlässigkeit. Es wurde die logistische Regression mit einem Rückwärtseliminationsmodell verwendet, um den Einfluss der Diagnosemethode, des Auswertungszyklus, der Zahnart und der klinischen Erfahrung auf die Reliabilität zu untersuchen.

Ergebnisse: Insgesamt zeigte die Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit gute bis ausgezeichnete κ - und $w\kappa$ -Werte für die BF-Radiographie (Inter: $\kappa = 0,60/0,63$; $w\kappa = 0,74/0,76$; Intra: $\kappa = 0,64$; $w\kappa = 0,77$) und die NIRT (Inter: $\kappa = 0,74/0,64$; $w\kappa = 0,86/0,82$; Intra: $\kappa = 0,68$; $w\kappa = 0,84$). Das Rückwärtseliminationsmodell ergab, dass die NIRT signifikant zuverlässiger ist als die BF-Radiographie.

Schlussfolgerung: Diese Studie zeigte eine gute bis ausgezeichnete Inter- und Untersucher-Zuverlässigkeit für die Erkennung von Approximalkaries mittels BF- und NIRT-Aufnahmen. Die logistische Regressionsanalyse ergab eine signifikant bessere Zuverlässigkeit für NIRT. Zusätzlich war der erste Auswertungszyklus gemäß den Referenzdiagnosen zuverlässiger.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29227160/>

- 2.1.4 Originalarbeit: Litzenburger F, Lederer A, Kollmuss M, Hickel R, Kunzelmann KH, Heck K (2020) Near-infrared transillumination with high dynamic range imaging for occlusal caries detection in vitro. Lasers Med Sci 35 (9):2049-2058. doi:10.1007/s10103-020-03078-z (IF 2020: 3.161)**

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser Studie war es, die Nahinfrarot-Transillumination mit High Dynamic Range Imaging (NIRT-HDRI) für die okklusale Kariesdetektion in vitro zu bewerten sowie mit der visuellen Inspektion mit dem International Caries Detection and Assessment System II (ICDAS) und der digitalen Bissflügelröntgenaufnahme (BF) zu vergleichen.

Material und Methode: Es wurden 61 extrahierte permanente Molaren mit gesunden oder okklusalen kariösen Oberflächen ohne schwere Kavitation visuell zusammengestellt. Zwei Untersucher begutachteten diese Oberflächen unabhängig voneinander mit ICDAS, BF und NIRT-HDRI. Für letzteres wurde ein Prototyp verwendet, der aus zwei Laserquellen (780 nm), einem CCD-Sensor und anschließender Verarbeitung mit einer Bildanalyse-Software bestand. Für alle Methoden wurden Schwellenwerte für kariöse Oberflächen, Schmelz- und Dentinläsionen definiert. Die Mikrocomputertomographie diente als Referenzstandard.

Ergebnisse: Die linear gewichtete Kappa-Analyse der Methoden gegenüber der Referenz an den Schwellenwerten kariöse Oberfläche, Schmelz- und Dentinläsion ergab 0,59/0,08/0,12 für ICDAS, 0,37/-0,06/0,58 für BF und 0,33/-0,01/0,51 für NIRT-HDRI. Die Sensitivitätswerte bei den drei Schwellenwerten waren 0,85/0,78/0,13 für ICDAS, 0,59/0,00/0,69 für BF und 0,98/0,33/0,78 für NIRT-HDRI. Die Spezifitätswerte bei den drei Schwellenwerten waren 0,70/0,40/1,00 für ICDAS, 0,90/0,96/0,90 für BF und 0,30/0,65/0,72 für NIRT-HDRI. Die Reliabilitätsanalyse ergab eine erhebliche Übereinstimmung für BF und NIRT-HDRI und eine fast perfekte Übereinstimmung für ICDAS.

Schlussfolgerung: Die Nahinfrarot-Transillumination mit High Dynamic Range Imaging zeigte eine starke Leistungsfähigkeit, okklusale Karies im Allgemeinen zu erkennen; allerdings zeigte sie eine Tendenz zur Überschätzung. Ihre Stärke war die Erkennung von Dentin-Karies-

Läsionen im Vergleich zu ICDAS und BF. NIRT-HDRI scheint eine geeignete Methode zu sein, um versteckte Dentinkaries als Ergänzung zur visuellen Untersuchung zu erkennen.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32594346/>

- 2.1.5 Originalarbeit: Litzenburger F, Schäfer G, Hickel R, Kühnisch J, Heck K (2021) Comparison of novel and established caries diagnostic methods: a clinical study on occlusal surfaces. BMC Oral Health 21 (1):97. doi:10.1186/s12903-021-01465-8. (IF 2020: 2.757)**

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser prospektiven klinischen Diagnosestudie mit Validierung war der Vergleich der diagnostischen Genauigkeit von Nahinfrarot-Transillumination (NIRT), Laserfluoreszenz-Messung (LF), Wechselstrom-Impedanz-Spektroskopie (ACIS) und deren Kombinationen als Zusatzmethoden zur visuellen Untersuchung (VI) für die okklusale Karieserkennung unter Verwendung eines Hybrid-Referenzstandards.

Material und Methode: Es wurden 96 erste und zweite nicht-kavitierte permanente Molaren von 76 Personen (Durchschnittsalter 24,2 Jahre) mittels visueller Inspektion (VI) und Bissflügelröntgenaufnahme (BF) sowie NIRT, LF und ACIS untersucht. Die Befunde von BF und NIRT wurden von zwei Untersuchern ausgewertet, während die anderen Untersuchungen von einem kalibrierten Zahnarzt durchgeführt wurden. Der hybride Referenzstandard bestand aus einer nicht-operativen Validierung, basierend auf den Ergebnissen von VI und BF und einer operativen Validierung. Die statistische Analyse umfasste Kreuztabellen, Berechnung der Sensitivität, Spezifität und Fläche unter der Receiver Operating Characteristic Curve (AUROC) bei drei diagnostischen Schwellenwerten: Karies allgemein, Schmelzkaries und Dentin-Karies.

Ergebnisse: NIRT, LF und ACIS zeigten eine hohe Sensitivität für Karies im Allgemeinen (1,00 (1,00-1,00), 0,77 (0,65-0,88), 0,75 (0,63-0,87)) und für Dentinkaries (0,97 (0,91-1,03), 0,76 (0,76-0,90), 0,64 (0,47-0,80)). Die Sensitivitätswerte für Schmelzkaries waren schwach (0,21, 0,11, 0,37). Die Spezifitätswerte fielen für alle Kategorien und Methoden nicht unter 0,65 (NIRT), außer für NIRT an der Kariesdetektionsschwelle (0,27). Eine Kombination von LF und ACIS mit VI verbesserte die diagnostische Leistung an der Gesamt- und der Schmelzkariesschwelle. Die anderen Methoden zeigten eine gute bis sehr gute Diskriminierung an der Gesamtkariesschwelle (NIRT 0,64, LF 0,89 und ACIS 0,86) und eine akzeptable Diskriminierung an der Dentin-Kariesschwelle (NIRT 0,82, LF 0,81 und ACIS 0,79). Die AUROC für Schmelzkaries wies die schwächste Diskriminierung auf. Die Genauigkeit betrug

65,6 % für VI, 69,8 % für BF, 50,0 % für NIRT, 53,1 % für LF und 74,0 % für ACIS. Die Reliabilitätsbewertung für BF und NIRT zeigte für alle Analysen zumindest substantielle Übereinstimmungen.

Schlussfolgerung: Die Methoden, NIRT, LF und ACIS, zeigten unterschiedliches Potenzial, aber keine einwandfreie Leistung für die okklusale Karieserkennung. Alle sind geeignete Instrumente, um versteckte kariöse Läsionen im Dentin zu erkennen. Als Hilfsmittel zur VI zeigten LF und ACIS eine Steigerung der diagnostischen Leistung.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33663454/>

- 2.1.6 Originalarbeit: Lederer A, Kunzelmann KH, Heck K, Hickel R, Litzemberger F (2019) In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection. Eur J Oral Sci 127 (6):515-522. doi:10.1111/eos.12663 (IF 2019: 2.220)**

Zusammenfassung

Ziel: Das Ziel dieser Studie war die In-vitro-Validierung der VistaCam iX HD, die die Nahinfrarot-Reflexion (NIRR) zur Erkennung von Approximalkaries verwendet. Sie wurde verglichen mit der digitalen Bissflügelröntgenaufnahme (BF) und Microcomputertomographie-Scans (μ CT), welche als Referenzstandard verwendet wurde.

Material und Methode: Einhundert Zähne mit entweder gesunden ($n = 54$) oder kariösen ($n = 46$) Approximalflächen wurden anhand visuell-taktiler Kriterien ausgewählt. Bilder dieser Oberflächen wurden mit BF und NIRR erstellt. Die Auswertung erfolgte durch zwei Untersucher, zweimal im Abstand von jeweils zwei Wochen. Alle Proben wurden mit einem Microcomputertomographen gescannt und als Referenzstandard bewertet. Für alle Methoden wurden Schwellenwerte für gesunde Oberflächen und für Schmelz- und Dentinläsionen definiert.

Ergebnisse: Sowohl BF als auch NIRR zeigten eine moderate Sensitivität für die Erkennung jeglicher Karies (0,50 für NIRR und 0,53 für BF). Für Schmelzläsionen war die Sensitivität geringer (0,13 für NIRR und 0,31 für BF). Die Spezifität war in allen Kategorien für beide Methoden hoch ($\geq 0,94$). Die Inter-Untersucher-Zuverlässigkeit reichte von 0,89 bis 0,93 und die Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit von 0,80 bis 0,89. Die Beurteilung der Oberfläche der mit NIRR erzeugten Bilder wurde durch überbelichtete Bereiche erschwert; ca. 25 % der Bilder waren nicht eindeutig interpretierbar.

Schlussfolgerung: Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich NIRR und BF als reproduzierbare Methoden mit vergleichbarer diagnostischer Genauigkeit erwiesen. Allerdings kann die NIRR nicht als ergänzende Diagnosemethode zur Beurteilung von Approximalkaries in permanenten Molaren empfohlen werden, da Probleme mit der Bildqualität und Artefakte bestehen.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31774207/>

- 2.1.7 Originalarbeit: Litzenburger F, Heck K, Kaisarly D, Kunzelmann KH (2021) Diagnostic validity of early proximal caries detection using near-infrared imaging technology on 3D range data of posterior teeth. Clin Oral Investig. doi:10.1007/s00784-021-04032-1 (IF 2020: 3.573)**

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser In-vitro-Studie war es, das Potenzial zur Erkennung von Approximalkaries anhand von 3D-Distanzdaten von Zähnen zu evaluieren, die aus Nahinfrarot-Reflexionsbildern (NIRR) unter Verwendung des iTero Element 5D Scanners bei 850 nm aufgenommen wurden.

Material und Methode: Es wurden insgesamt 250 gesunde und kariöse bleibende menschliche Zähne paarweise angeordnet, mit Bissflügelröntgenaufnahme (BF) und NIRR untersucht und mit Mikrocomputertomographie validiert. Die NIRR-Befunde wurden aus bukkaler, lingualer und okklusaler (trilateraler) Sicht nach Ja/Nein-Entscheidungen über das Vorhandensein von Karies bewertet. Zwei Untersucher bewerteten alle Befunde zweimal. Die Reliabilitätsbeurteilung erfolgte mittels Kappa-Statistik und ergab für beide Methoden ein hohes Maß an Übereinstimmung. Die statistische Analyse erfolgte durch Kreuztabellen und Berechnung der Sensitivität, Spezifität und AUC-Werte für Molaren und Prämolaren.

Ergebnisse: Bei der okklusalen NIRR wurde die Karies um 24,8 % unterschätzt und bei der BWR waren es 26,4 %. Die Überschätzung betrug 10,4 % für okklusale NIRR-Bewertungen und 0 % für BF-Bewertungen. Trilaterale NIRR-Bewertungen hatten eine Gesamtgenauigkeit von 64,8 %, eine Überschätzung von 15,6 % und eine Unterschätzung von 19,6 %. NIRR- und BF-Bewertungen zeigten eine hohe Spezifität und eine geringe Sensitivität für die Erkennung von Approximalkaries.

Schlussfolgerung: Basierend auf der AUC erzielte die NIRR-Diagnostik des iTero Element 5D Scanners vergleichbare diagnostische Ergebnisse wie die BF. Trilaterale NIRR-Bewertungen überschätzten das Vorhandensein von Approximalkaries und zeigten höhere Sensitivitätswerte für die Erkennung von initialen Kariesläsionen als die BF.

Klinische Relevanz: Die Ergebnisse der NIRR-Untersuchungen stellen eine valide Ergänzung zur BF als diagnostisches Hilfsmittel dar. Die Untersuchung aus mehreren Blickwinkeln verbesserte die Erkennung von initialen approximalen Kariesläsionen.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34636940/>

2.1.8 Originalarbeit: Heck K, Litzenburger F, Geitl T, Kunzelmann K-H (2021) Near-infrared reflection at 780 nm for detection of early proximal caries in posterior permanent teeth in vitro. Dentomaxillofac Radiol 0:20210005. doi:10.1259/dmfr.20210005. (IF 2020: 2.419)

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser In-vitro-Studie war es, das diagnostische Potenzial der Nahinfrarot-Reflexion bei 780 nm (NIRR_{780nm}) zur frühzeitigen Erkennung von Approximalkaries auf den okklusalen, bukkalen und oralen Oberflächen von Molaren und Prämolaren unter simulierten, klinisch relevanten Bedingungen zu bewerten. Die Ergebnisse wurden mittels Mikrocomputertomographie (μ CT) validiert.

Material und Methode: Als vergleichende diagnostische Methode wurde die Bissflügelröntgenaufnahme (BF) verwendet. Zweihundertfünfzig gesunde oder kariöse bleibende Zähne wurden mittels NIRR_{780nm} und BF untersucht. Die NIRR_{780nm}-Befunde wurden mittels Ja/Nein-Entscheidungen in Abhängigkeit vom Vorhandensein kariöser Läsionen bewertet, da die Schmelz-Dentin-Grenze in der Mehrzahl der Proben nicht nachweisbar war. Alle NIRR_{780nm}-, BF- und μ CT-Befunde wurden zweimal von zwei geschulten Untersuchern erstellt. Die NIRR_{780nm}-Bilder wurden sowohl okklusal allein als auch kombiniert okklusal, lingual und bukkal ausgewertet. Alle Befunde wurden in einer Kreuztabelle dargestellt. Es wurden die Werte für Sensitivität, Spezifität und Fläche unter der Kurve /Area under the curve (AUC) berechnet. Die Beurteilung der Reliabilität wurde mit Hilfe der Kappa-Statistik durchgeführt.

Ergebnisse: Eine Unterschätzung der Karies wurde für NIRR_{780nm} bei 26,0 % aller Flächen und für BF bei 32,8 % aller Flächen beobachtet. Die Überschätzung betrug 10,0 % für NIRR_{780nm} und 0,4 % für BF. Die trilaterale NIRR_{780nm} -Bewertung zeigte eine Gesamtgenauigkeit von 67,2 %, eine Unterschätzung von 13,6 % und eine Überschätzung von 19,2 %. Die trilaterale NIRR_{780nm} zeigte eine Sensitivität von 63,0 % und eine Spezifität von 69,6 %, während die BF eine Sensitivität von 26,7 %, aber eine Spezifität von 100 % für die Erkennung von Approximalkaries zeigte.

Schlussfolgerung: NIRR_{780nm} ist nicht geeignet, um frühe Approximalkaries zuverlässig zu detektieren, selbst bei Anwendung eines idealen Aufbaus und optimierter In-vitro-Bedingungen.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/33956491/>

2.2 Neuartige Entwicklungen in der Kariestherapie

Im letzten Jahrzehnt gab es verstärkte Bemühungen der Dentalindustrie, Materialien zu entwickeln, die als adäquater Ersatz für Amalgam im Seitenzahnbereich verwendet werden können. Dies wurde durch die Minamata Konvention von 2013, welche 2017 aktiv wurde und 2021 von 131 Ländern ratifiziert wurde, beschleunigt. Amalgam hat zwar viele vorteilhafte Eigenschaften, u. a. in Bezug auf die Handhabung und die Kostenparameter, doch seine ästhetischen Einschränkungen und die Bedenken hinsichtlich einer möglichen Toxizität durch Quecksilberexposition haben allmählich zu einem Rückgang der Verwendung des Materials geführt [30, 143]. Obwohl konventionelle Komposite eine gute Alternative mit hohem ästhetischem Wert und minimalinvasivem Vorgehen sind, sind diese weiterhin teuer und die Anwendung ist zeitaufwendig, was die Suche nach einfach zu handhabenden und kostengünstigen Dentalmaterialien notwendig macht [31, 172].

Ein Material, welches diesen Anforderungen entspricht, ist Glasionomermaterial (GIZ). Glasionomermaterialien, als direkte Restaurationsmaterialien eingesetzt, haben viele Vorteile, die in der Literatur umfangreich beschrieben sind. Darunter die Adhäsion an feuchtem Schmelz und Dentin, antikariogene Eigenschaften durch Fluoridfreisetzung, thermische Kompatibilität mit Schmelz und Biokompatibilität [55, 209]. Dennoch hat das Material auch Nachteile, insbesondere bei den mechanischen Eigenschaften wie schlechte Bruchzähigkeit, Feuchtigkeitsempfindlichkeit und erhöhter okklusaler Abrieb [130, 221].

Um die Verschleißfestigkeit zu verbessern und Initialrisse zu füllen, wurde dieses Material weiterentwickelt. Für die erste Phase der Aushärtung wurde vorgeschlagen, dass eine Beschichtung mittels einem nanogefüllten lighthärtenden Coating etwaige Porositäten der Oberfläche versiegeln soll und sich so die mechanischen Eigenschaften verbessern sowie sich zusätzlich die ästhetische Qualität der GIZ verbessert [65, 70, 221]. Daher wurde im Jahr 2007 ein neues Restaurationskonzept eingeführt, bei dem ein konventioneller hochvisköser GIZ mit einem nanogefüllten lighthärtenden Coating kombiniert wurde. Laut Hersteller kann dieses Materialsystem als langfristiges Füllungsmaterial für Klasse-I-Restaurationen, nicht belastete Klasse-II-Restaurationen und belastete Klasse-II-Restaurationen verwendet werden, wenn u.a. der Isthmus der Kavität weniger als die Hälfte des interkuspidalen Abstands beträgt. Während mehrere prospektive und retrospektive Studien gezeigt haben, dass in Klasse-I-Restaurationen eine gute klinische Leistung erzielt werden konnte, gab es widersprüchliche Ergebnisse für Klasse-II-Restaurationen (Tabelle 5) [19, 44, 65, 69-71, 105, 109, 142, 199]. Daher wurde in einer doppelblinden, randomisierten, kontrollierten, prospektiven klinischen Studie die

Leistungsfähigkeit des GIZ-Restaurationskonzepts im Vergleich zu einem konventionelle hochviskösen GIZ in zwei und drei flächigen Klasse-II-Restaurationen sowohl im Molaren- als auch im Prämolaren-Bereich untersucht und nach drei sowie sechs Jahren berichtet (2.2.1 Originalarbeit und 2.2.2. Originalarbeit).

Eine weitere Materialgruppe, welche als langfristige Amalgamalternative im kaulasttragenden Seitenzahnbereich entwickelt wurde, sind die neuartigen Bulk-Fill-Komposite. Diese erfüllen die Nachfrage der Zahnärzte nach Kompositen, die einfacher und schneller zu platzieren sind. Konventionelle Komposite haben den Nachteil eines aufwändigen Applikationsverfahrens. Einerseits ist dies der inkrementellen Schichttechnik geschuldet, bei welcher das Material üblicherweise in einer Schichtdicke von 2 mm eingebracht wird. Dies muss erfolgen, um die Probleme des Polymerisationsstresses und der begrenzten Aushärtungstiefe zu überwinden [27]. Andererseits wird außerdem jedes Inkrement separat für 10 bis 40 s belichtet, abhängig von der Intensität des Lichthärtegeräts, der Formulierung und der Farbe / Transluzenz des Kompositmaterials [167]. Die Gruppe der Bulk-Fill-Composite hingegen, von denen die meisten in den letzten Jahren eingeführt wurden, lassen sich im Vergleich zu konventionellen Hybrid-Kompositen schneller und bequemer in die Kavität einbringen, adaptieren und modellieren und zeigen dennoch gute mechanische Eigenschaften - wie Randadaption, Versiegelungseigenschaften, Bruchfestigkeit, Verschleißfestigkeit - und langfristigen klinischen Erfolg [124]. Außerdem können diese Komposite in Inkrementen von 4 mm in die Kavitäten eingebracht werden, ohne dass die Aushärtungszeit verlängert wird oder ein Aushärtungsgerät mit erhöhter Bestrahlungsstärke verwendet werden muss [27, 161]. Bulk-Fill-Composite werden in zwei verschiedenen Viskositäten angeboten [98]. Hochvisköse Bulk-Fill-Composite können zur vollständigen Füllung der Kavitäten bis zur Okklusalfäche mit nur einem Material verwendet werden, wohingegen niedrigvisköse Bulk-Fill-Composite eine abschließende Überkappungsschicht von 2 mm durch ein reguläres Hybrid-Komposit-Material erfordern, da sie aufgrund ihrer reduzierten Füllstoffmenge und Füllstoffzusammensetzung schlechtere mechanische Eigenschaften (z. B. E-Modul und Abnutzung) aufweisen [73, 93, 97, 99, 160]. Einige Studien berichteten bereits über gute Ergebnisse aufgrund von reduziertem Polymerisationsschrumpfstress, einer angemessenen Aushärtungstiefe von bis zu 4 mm sowie guter Haftfestigkeit, unabhängig von der Füllungstechnik oder Kavitätenkonfiguration [48, 94, 166, 208]. Es gibt jedoch nur wenige klinische Langzeitstudien, die Bulk-Fill-Composite untersuchen [17, 45, 68, 88, 137-139, 205, 218].

Daher wurden zwei randomisierte, kontrollierte, prospektive klinische Studien zur Leistungsfähigkeit von Bulk-Fill-Kompositen im Vergleich zu einem traditionellen Hybridkomposit bzw. einem Nanohybrid-Komposit durchgeführt und publiziert (2.2.3 Originalarbeit und 2.2.4 Originalarbeit).

- 2.2.1 Originalarbeit: Fotiadou C, Frasher I, Reymus M, Diegritz C, Kessler A, Manhart J, Hickel R, Klink T, Heck K (2019) Corrigendum: A 3-year controlled randomized clinical study on the performance of two glass-ionomer cements in Class II cavities of permanent teeth. Quintessence Int 51 (1):e1-e11. doi:10.3290/j.qi.a43755 (IF 2019: 1.460)**

Zusammenfassung

Ziel: Vergleich der klinischen Leistung zweier Glasionomerzemente in Kombination mit zwei lichthärtenden Coatings in Klasse-II-Kavitäten.

Material und Methode: Insgesamt wurden 43 Equia Fil/Equia Coat und 42 Fuji IX GP Fast/Fuji Coat LC-Restaurationen bei 34 Patienten gelegt. Es wurden nur Klasse II Kavitäten mit zwei- oder dreiflächigen Restaurationen eingeschlossen. Die klinische Leistung wurde zu Studienbeginn sowie nach 1, 2 und 3 Jahren anhand von FDI-Kriterien bewertet. Für die statistischen Analysen wurden der exakte Fisher-Test, der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test und der Mann-Whitney-U-Test verwendet. Der Erfolg und das Überleben der Restaurationen wurden mit der Kaplan-Meier-Methode berechnet und ein Log-Rank-Test wurde verwendet, um signifikante Unterschiede zwischen den getesteten Materialien zu erkennen.

Ergebnisse: Beim 3-Jahres-Recall konnten für keines der ausgewerteten Kriterien signifikante Unterschiede zwischen den beiden Glasionomerzementen festgestellt werden (Mann-Whitney-U-Test, $P > .05$). Vergleicht man die Baseline- mit den Recall-Daten nach 3 Jahren für jedes Material separat, konnten bei beiden Materialien signifikante Veränderungen für die Kriterien "Oberflächenglanz", "Materialbruch und Retention" und "Approximale anatomische Form" festgestellt werden (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test, $P < .05$). Zusätzlich zeigten die Equia Fil-Restaurationen eine bemerkenswerte Veränderung für das Kriterium "marginale Adaptation" (Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test, $P = .039$). Beim 3-Jahres-Follow-up wiesen die Equia Fil- und die Fuji IX GP Fast-Restaurationen eine Gesamtüberlebensrate von 89,3% bzw. 88,0% auf. Drei Füllungen in jeder Gruppe versagten.

Schlussfolgerung: Die beiden getesteten Glasionomerzemente zeigten in Klasse-II-Kavitäten bei erwachsenen Patienten ein vergleichbares Leistungsergebnis, mit einer moderaten Versagensrate nach 3 Jahren.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/31286115/>

- 2.2.2 Originalarbeit:** Heck K, Frasheri I, Diegritz C, Manhart J, Hickel R, Fotiadou C (2020) Six-year results of a randomized controlled clinical trial of two glass ionomer cements in class II cavities. *J Dent* 97:103333. doi:10.1016/j.jdent.2020.103333 (IF 2020: 4.379)

Zusammenfassung

Ziel: Untersuchungen zum Langzeitüberleben von zwei hochviskösen Glasionomerzementen (Fuji IX GP Fast und Equia Fil) über einen Zeitraum von 6 Jahren in vivo.

Material und Methode: Insgesamt wurden 85 zwei- oder dreiflächige Klasse-II-Restaurationen, davon 43 Equia Fil / Equia Coat und 42 Fuji IX GP Fast / Fuji Coat LC, bei 34 Patienten gelegt. Die Restaurationen wurden nach 6 Jahren anhand von FDI-Kriterien reevaluiert. Die statistische Analyse wurde mit dem exakten Test von Fisher, dem Wilcoxon Signed-Rank-Test, dem Mann-Whitney-U-Test und der Kaplan-Meier-Methode durchgeführt.

Ergebnisse: Vierundvierzig Restaurationen (22 Equia Fil und 22 Fuji IX GP Fast) konnten bei der 6-Jahres-Nachuntersuchung bewertet werden. Während des gesamten Studienzeitraums wurden acht Misserfolge, vier für jedes Material, beobachtet. Die Hauptgründe für Misserfolge waren Materialfrakturen und Retentionsverlust, die teilweise mit unzureichender Randadaptation oder schlechter approximaler anatomischer Form kombiniert waren. Zwei Misserfolge können auf eine unzureichende Applikation der Materialien zurückgeführt werden, wie anhand der Röntgenbilder zu vermuten war. Die Kaplan-Meier-Überlebensrate für Equia Fil-Restaurationen nach 6 Jahren betrug 86,5 % und die für Fuji IX GP Fast nach 6 Jahren 86,8 % (log-rank $p=0,907$). Während des Zeitraums von 3 bis 6 Jahren versagte nur eine Füllung in jeder Gruppe.

Schlussfolgerung: Beide Materialien zeigten akzeptable und vergleichbare Überlebensraten nach 6 Jahren. Eine unzureichende Applikation der Materialien (Hohlräume) könnte möglicherweise einige Misserfolge erklären. Hochvisköse Glasionomerzemente können eine akzeptable Alternative zu Amalgamrestaurationen für kleine Klasse-II-Kavitäten sein.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32305380/>

- 2.2.3 Originalarbeit: Heck K, Manhart J, Hickel R, Diegritz C (2018) Clinical evaluation of the bulk fill composite QuiXfil in molar class I and II cavities: 10-year results of a RCT. Dent Mater 34(6):e138-e147. doi:10.1016/j.dental.2018.03.023 (IF 2018: 4.640)**

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser randomisierten, kontrollierten Studie war es, die 10-jährige klinische Leistungsfähigkeit des Bulk-Fill-Komposits QuiXfil mit der des bewährten Hybrid-Kompositen Tetric Ceram in posterioren ein- oder mehrflächigen Kavitäten zu vergleichen.

Material und Methode: 46 QuiXfil (Xeno III) und 50 Tetric Ceram (Syntac classic) Komposit-Restaurationen wurden in 14 kaulasttragende Klasse I und 82 Klasse II Kavitäten in ersten oder zweiten Molaren gelegt. Die klinische Bewertung erfolgte zu Beginn und nach bis zu 10 Jahren anhand von modifizierten Kriterien des US Public Health Service. Im letzten Recall-Zeitraum wurden 26 QuiXfil- und 30 Tetric Ceram-Restaurationen in 11 belasteten Kavitäten der Klasse I und 45 Kavitäten der Klasse II beurteilt.

Ergebnisse: Zehn defekte Restaurationen wurden innerhalb des Nachbeobachtungszeitraums beobachtet, vier Tetric Ceram-Restaurationen versagten aufgrund von Sekundärkaries (2), Zahnfraktur (1) und Bulk-Fraktur kombiniert mit Sekundärkaries (1), während sechs QuiXfil-Restaurationen aufgrund von Sekundärkaries (1), Zahnfraktur (2), Sekundärkaries kombiniert mit Restorationsfraktur (1), Restorationsfraktur (1) und postoperativer Sensibilität (1) versagten. Der exakte Test nach Fisher ergab keinen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Materialien ($p=0,487$).

Schlussfolgerung: Beide Materialien, Bulk-Fill-QuiXfil-Restaurationen und Tetric Ceram-Restaurationen, zeigten eine hohe klinische Effizienz während der 10-jährigen Nachbeobachtungszeit.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29636239/>

- 2.2.4 Originalarbeit: Hoffmann L, Neuerer C, Heck K, Kunzelmann KH (2021) Bulk-fill composites compared to a nanohybrid composite in class II cavities – a two year follow-up study. J Adhes Dent 23 (5):389-396. doi:10.3290/j.jad.b2000185 (IF 2020: 2.359)**

Zusammenfassung

Ziel: Ziel dieser Studie war es, verschiedene Konzepte direkter Komposit-Restaurationen in Klasse-II-Kavitäten unter Verwendung von Bulk-Fill-Kompositen und einem konventionellen Komposit mit unterschiedlichen Schichtstärken in einer klinischen Studie über einen Zeitraum von 2 Jahren zu vergleichen.

Material und Methode: Ein niedrigvisköses (SDR), ein hochvisköses Bulk-Fill (Tetric EvoCeram Bulk-Fill) und ein konventionelles Nanohybrid-Komposit (Tetric EvoCeram) wurden randomisiert und in unterschiedlichen Schichtstärken bis zu 4 mm in 160 Klasse-II-Kavitäten bei 94 Patienten eingesetzt. Die Restaurationen wurden zu Studienbeginn (n=160), nach 12 (n=150) und 24 Monaten (n=148) klinisch untersucht und nach acht ausgewählten FDI-Kriterien bewertet. Bei vollständigem Verlust der Restauration oder irreversiblen pulpitischen Symptomen wurde die Restauration als Misserfolg bewertet; eine Reparatur wurde als relativer Misserfolg angesehen.

Ergebnisse: Die untersuchten Materialien zeigten keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich der FDI-Scores und der Ausfallrate während der gesamten Nachbeobachtungszeit. Nach 12 Monaten wurden 7 Ausfälle und nach 24 Monaten insgesamt 8 Ausfälle beobachtet. Nach 2 Jahren zeigten Tetric EvoCeram Bulk-Fill mit 4 mm Schichtdicke und SDR in Kombination mit Tetric EvoCeram Bulk-Fill mit 2 mm Schichtdicke eine nicht-signifikante Tendenz zu einer erhöhten Hypersensibilität (FDI-Score 5) im Vergleich zum Referenzmaterial Tetric EvoCeram mit 2 mm Schichtdicke ($p=0,051$; Kruskal-Wallis-Test).

Schlussfolgerung: Die klinische Stabilität von Bulk-Fill-Materialien in Schichten bis zu 4 mm ist nach 2 Jahren vergleichbar mit Nanohybrid-Kompositen.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34549922>

3 Diskussion

3.1 Neuartige Entwicklungen in der Kariesdiagnostik

3.1.1 Vergleich Röntgensensoren mit CCD- und neuer CMOS-Sensor-Technologie zur Diagnostik früher approximaler Läsionen

Die derzeit etablierteste Methode als ergänzende Methode zur visuellen Kariesdiagnose ist die Bissflügelröntgenaufnahme (BF) und diese ist daher in vielen Studien untersucht worden [47, 67]. Diese Untersuchungen bestätigten im Wesentlichen die Beobachtungen, dass die BF im Allgemeinen nicht zur Erkennung von früher Karies zu empfehlen ist, weder für okklusale noch für proximale Läsionen [180]. Allerdings differenzieren die meisten klinischen Studien nicht zwischen den Sensortypen, welche sich in ihrer Technik unterscheiden. So wurden früher Röntgenbilder mittels analoger Röntgenfilme aufgenommen und später durch digitale Röntgensensoren abgelöst, was erfreulicherweise zu einer Reduktion der Strahlenbelastung für den Patienten führte. Aktuelle Entwicklungen dieser digitalen Sensoren führten weg von der CCD-Sensor-Technologie, hin zur CMOS-Technologie. Mittelweile sind für die digitale intraorale Röntgentechnik nur noch CMOS-Sensoren auf dem Markt erhältlich, während die Vermarktung der CCD-Sensortypen weitgehend eingestellt wurde. Diese CMOS-Sensoren versprechen, aufgrund kleinerer Pixelgrößen von ca. 15 µm und Steigerung auf 12 Bit, kontrastreichere Bilder. Die älteren CCD-Sensoren erreichen eine Auflösung von 8 Bit und weisen dahingegen eine höhere Pixelgröße von ca. 19 µm, welche zu einem Cluster von 39 µm zusammengefasst werden, auf. Dieses sogenannte Binning der ursprünglichen Pixel zu einem einzigen größeren Pixel führt zwar zu einem gewissen Informationsverlust, reduziert aber das Bildrauschen und verbessert somit die Bildqualität. Da das menschliche Auge nur etwa 30 Graustufen unterscheiden kann, bedeutet die Steigerung von 8 auf 12 Bit keinen direkten Nutzen. Sie bietet aber eine Grundlage für eine umfangreichere Datenverarbeitung, z. B. Filterfunktionen [146, 193].

In der Originalarbeit „In vitro comparison of two types of digital X-ray sensors for proximal caries detection validated by micro-computed tomography“ wurde daher untersucht, ob neuere Röntgensensoren mit CMOS-Detektor signifikant bessere Ergebnisse bei der Detektion von früher Approximalkaries erreichen, als ältere CCD-basierte Röntgensensoren erreichen können (2.1.1 Originalarbeit) [78]. Der Erkennung von approximaler Schmelzkaries und beginnender Dentinkaries wurde hierbei besondere Bedeutung beigemessen, da es für den Zahnarzt schwierig ist, diese Art von Läsionen mit den zur Verfügung stehenden diagnostischen

Methoden zu erkennen und zu bewerten [180]. Die Schwierigkeiten der BF, frühe Karies zuverlässig zu erkennen, sind hierbei vielfältig. Der Mineralverlust von Initiailläsionen ist oft zu gering, um mit zahnärztlichen Röntgenbildern dargestellt zu werden [50]. Ein großes Problem stellen aber auch Überlagerungen dar, die durch benachbarte, in Kontakt stehende Zähne entstehen.

Für die vorliegende Studie wurde eigens ein universelles Phantom zur detaillierten Untersuchung von digitalen BF entwickelt. Dies erlaubt eine Untersuchung mit sowie ohne eingestellten Approximalkontakt. Mit der Darstellung von antagonistischen Zahnquadranten wurde die Konstellation eines durchschnittlichen Bissflügelbildes möglichst genau nachgebildet. Auf diese Weise wurde die Grauwertverteilung nicht digital, sondern analog homogenisiert, um die sonst von der Belichtungsautomatik verursachte Überbelichtung bei dunklem Hintergrund und der Aufnahme eines einzelnen Zahns zu vermeiden. Alle Röntgenbilder wurden auf 8-Bit-Bilder reduziert und mit der Histogramm-Funktion von Image J auf mögliche Sättigungen (hohe Anzahl von Pixeln mit Grauwert 255) untersucht [175]. Eine kleine Einschränkung dieses Röntgenphantoms ist die Vernachlässigung des durchschnittlichen radiologischen Widerstandes des Wangengewebes eines Patienten. Daher wurden die Proben mit 0,12 s statt der vom Hersteller empfohlenen 0,16 s bestrahlt. Alternativ hätte eine 14,5 mm dicke Acrylglasplatte dieses Defizit einfach kompensiert [178].

Obwohl Bilder mit als auch ohne Kontakt zum Nachbarzahn angefertigt wurden, basiert aufgrund der hohen Anzahl an Überlagerungsartefakten die statistische Auswertung nur auf Röntgenaufnahmen von Präparaten ohne Nachbildung der Kontaktflächen. Diese hohe Anzahl an approximalen Überlagerungen in unserem In-vitro-Experiment war kein Artefakt, das durch unser Phantom-Modell verursacht wurde. Im Gegenteil, sie ist sogar ein Beweis dafür, wie gut das Phantommodell die klinische Realität abbilden kann. Um diese Aussage zu untermauern, haben wir 697 klinische digitale Bissflügelröntgenaufnahmen ausgewertet, die aus einer Stichprobe von 4500 anonymisierten Röntgenaufnahmen ausgewählt wurden, die zwischen 2008 und 2019 in unserer Zahnklinik aufgenommen wurden. Nur 12,3 % (n = 68) dieser klinischen Bissflügelröntgenaufnahmen erwiesen sich als frei von Approximalüberlagerungen. Es scheint also nicht nur unter klinischen, sondern auch unter Laborbedingungen schwierig zu sein, das "perfekte" digitale Bissflügel-Röntgenbild ohne proximale Überlagerungen von Nachbarzähnen zu erhalten. Darüber hinaus beobachteten wir ein Phänomen im Zusammenhang mit diesen proximalen Überlagerungen, dass die diagnostische Auswertung weiter erschwerte. Die überlagerten Bereiche waren von Artefakten umgeben, die vom CMOS-

Sensor mit höherem Kontrast dargestellt wurden als vom CCD-Sensor. Wahrscheinlich werden diese durch die Vorverarbeitung der Sensordaten mit digitalen Filtern verursacht.

Als Referenzstandard wurde die Microcomputertomographie gewählt, da sich diese als valide Methode erwiesen hat, um die tatsächliche Kariesausdehnung innerhalb einer Probe zu bestimmen, ohne sie zu zerstören [24, 153, 189]. Die damit gewonnene dreidimensionale Information ermöglichte es, das Verhältnis zwischen der Schmelz-Dentin-Grenze und den Umrissen der Pulpakammer präzise zu bestimmen. Zur Verbesserung der Auswertung wurde eine Segmentierung und Mittellinienbestimmung für Dentin und Schmelz des 3D-Bildes durchgeführt. Hierzu wurde mit der Bildbearbeitungssoftware Image J der Schmelzbereich segmentiert und ein binäres Skelett erstellt, anhand dessen die Mittellinie im Schmelz gefunden werden konnte. Die Mittellinie im Dentin wurde dahingegen nach Segmentierung mittels Distanztransformation bestimmt [89, 158, 175]. Auf diese Weise konnte die Ausdehnung einer Kariesläsion sehr genau bestimmt werden.

Die veränderte Technologie der beiden Sensortypen geht allerdings mit einer Erhöhung der Belichtungszeit bzw. der Spannung einher, was auf das Konstruktionsprinzip des Sensors zurückzuführen ist. Die Schaltkreise von CMOS bestehen aus mehreren Materialschichten, weshalb der Sensor in einem Schichtenstapel aufgebaut ist. Dies führt dazu, dass vor allem ältere CMOS-Sensoren einen geringeren Ladungsumsatz haben und eine längere Belichtungszeit benötigen als der CCD-Sensor. So wird für die Aufnahme von BF mit dem CCD-Sensor eine Belichtungszeit von 0,08 s bei 60 kV empfohlen, während für den CMOS-Sensor Belichtungszeiten von entweder 0,16 s bei 60 kV oder 0,08 s bei 70 kV empfohlen werden. Eine Erhöhung der Belichtungszeit von 0,08 s auf 0,16 s bei unveränderten 60 kV für die verwendete Röntgenröhre geht mit einer Verdoppelung der Strahlendosis einher (6 mGy x cm² auf 12 mGy x cm²). Die Erhöhung der Spannung auf 70 kV bei gleicher Belichtungszeit von 0,08 s führt immerhin noch zu einer Erhöhung der Dosis um den Faktor 1,3. Diese Erhöhung der Strahlendosis steht im Widerspruch zum deutschen Strahlenschutzgesetz, das eine möglichst geringe Strahlenexposition für Patienten fordert und kann nur durch eine bessere diagnostische Leistung gerechtfertigt werden [29].

Von den CMOS-Sensoren wird erwartet, dass sie das Rauschen reduzieren und den visuellen Eindruck der Bilder durch die höhere Bittiefe der Pixel verbessern. Dies soll zu einer besseren Diagnostik führen. Tatsächlich war der visuelle Eindruck aufgrund des reduzierten Rauschens im Bild mit den neuen Sensoren besser (auch bei geringeren Belichtungszeiten). Dass die bessere Datenqualität auch zu einer besseren Diagnosequalität führt, konnte in der vorliegenden

Studie nicht nachgewiesen werden, da die Sensitivitätswerte nicht signifikant anstiegen und die Spezifitätswerte für alle Untersuchungsmethoden und Schwellenwerte gleich gut waren (Tabelle 1 und Tabelle 2). Allerdings konnte eine leichte Verbesserung der Inter-Untersucher-Zuverlässigkeit festgestellt werden. Die Übereinstimmungen aller Untersuchungsmethoden waren für alle Methoden aber bereits als „fast perfekt“ zu bewerten, so dass diese Verbesserung nur marginal ist. Mit der Bildverarbeitungssoftware Image J konnten die Unterschiede zwischen den Sensoren jedoch sichtbar gemacht werden. Nach der Datenreduktion von 10 auf 8 Bit wurden die Histogramme entsprechender Röntgenbilder verschiedener Sensoren übereinandergelegt und dabei ein deutlicher Unterschied in der Grauwertverteilung sichtbar. Nach Anwendung der Subtraktionsfunktion von Image J zwischen den Bildern, wurden noch das Dentingewebe, die Pulpa und die kariösen Dentinläsionen kontrastiert. Welchen Einfluss die Filterprogramme der Software auf die Grauwert- und Pixelverarbeitung haben, ist unklar, da es sich bei den verwendeten Algorithmen um Interna der Firmen handelt und nicht als Open Source öffentlich zugänglich sind. Eigentlich sollte man bei einem Gerät für die medizinische Diagnostik erwarten, dass alle Algorithmen, die zur Verbesserung der Sensordaten verwendet werden, offengelegt werden. Auch wenn dies für den praktizierenden Zahnarzt selbst nicht direkt relevant ist, ist die Kenntnis dieser Algorithmen für die Forschung und Weiterentwicklung der Röntgendiagnostik wichtig.

Mit dem Fokus auf die Approximalkariesdetektion wurde in dieser Studie nur ein diagnostischer Zweck digitaler intraoraler Sensoren analysiert, alle anderen wurden nicht berücksichtigt. In Bezug auf die Kariologie haben diagnostische Studien bereits darauf hingewiesen, dass eine zuverlässige Erkennung von okklusaler Schmelzkaries durch BF in den meisten Fällen nicht möglich ist [180]. Zukünftige Studien könnten diese These mit dem Studiendesign der vorliegenden Studie untersuchen.

Die Ergebnisse dieser Studie konnten zeigen, dass kein signifikanter Unterschied der diagnostischen Leistung für die proximale Schmelzkariesdetektion zwischen den verschiedenen Sensoren und Belichtungszeiten besteht. Hohe Werte für die Spezifität konnten für alle Untersuchungsbedingungen festgestellt werden, unabhängig davon, ob es sich um Schmelzkaries, Dentinkaries oder Karies im Allgemeinen handelt. Allerdings wurde bei allen Methoden nur eine geringe Sensitivität erreicht. Insbesondere die Schmelzkariesdiagnostik erreichte sehr niedrige Werte (Tabelle 1). Das CMOS-basierte System zeigte bei längeren Belichtungszeiten zwar subjektiv kontrastreichere Bilder, was jedoch mit einer erhöhten Strahlendosis einhergeht. Trotz der höheren Strahlendosis zeigten dagegen sowohl die

Sensitivitätswerte als auch die AUCs keine signifikanten Unterschiede bei der Erkennung kariöser Läsionen. Die digitale BF ist unabhängig von der verwendeten Sensortechnologie noch nicht zur zuverlässigen Erkennung früher approximaler Schmelzkaries geeignet, zeigt aber dennoch das Potenzial, gesunde Approximalflächen mit hohen Spezifitätswerten zu identifizieren.

3.1.2 Kariesdiagnostik mittels nahinfraroter Transillumination

Die nahinfrarote Transillumination (NIRT) ist eine neuartige, alternative diagnostische Methode, die nicht auf ionisierender Röntgenstrahlung basiert und vielversprechend erscheint, da diese beliebig wiederholbar und auch bei Kindern einsetzbar ist. Technisch wird über zwei Lichtaustrittsfenster, die jeweils bukkal und oral in Höhe des Alveolarknochens positioniert werden, Nahinfrarotlicht durch den Alveolarknochen in die Zahnhartsubstanz übertragen. Hierbei lässt die Lichtstreuung im Dentin den Dentinkern als homogene Lichtquelle erscheinen, die die gesamte Zahnoberfläche gleichmäßig von innen beleuchtet. Kariöse Läsionen im Schmelz erscheinen mit NIRT dunkel, da aufgrund der Lichtstreuung im kariösen Bereich weniger Licht den CCD-Sensor erreicht, der die Okklusalfäche des Zahnes aufnimmt. So können Kariesläsionen, die sich zwischen dem Dentinkern und der Zahnoberfläche befinden, effizient erkannt werden.

Im Jahr 2012 erfolgte die europäische Markteinführung des ersten diagnostischen Gerätes zur Kariesdiagnostik mittels NIRT unter dem Namen Diagnocam (Kavo, Biberach, Germany). Gleichzeitig wurde dieses Gerät unter dem Namen CariVu (DEXIS, Hatfield, PA, USA) auf dem amerikanischen Markt eingeführt. Dieses Diagnosegerät verwendet eine 780-nm-Laserdiode als Belichtungsquelle. Die Diode emittiert ein hochkohärentes Licht, das sich auf Bildern als körnige Struktur zeigt, bekannt als Laserspeckle-Phänomen. LEDs als Belichtungsquelle zeigen diesen Effekt dahingegen nicht. Im klinischen Einsatz wird dieses Artefakt durch lichtstreuende Gewebe wie Zahnfleisch oder Alveolarknochen kompensiert, die durchstrahlt werden müssen, bevor sie die Zahnwurzel erreichen. Erste klinische Erfahrungsberichte zur Diagnostik von approximalen aber auch okklusalen Karies wurden ab 2014 publiziert [2, 18, 23, 115, 140, 152, 173, 188]. Es gab jedoch keine Studie, die NIRT unter In-vitro-Bedingungen für die Diagnose von Okklusalkaries validiert, und nur eine Studie, die die Validität der Approximalkariesdiagnostik untersuchte [4].

3.1.2.1 Approximalkariesdiagnostik mittels NIRT

In der Originalarbeit „In vitro validation of near-infrared transillumination at 780 nm for the detection of caries on proximal surfaces“ wurde daher unter In-vitro-Bedingungen die Validität der Kariesdiagnostik mittels NIRT mit der Diagnocam überprüft (2.1.2 Originalarbeit). Ebenfalls wurde die Reliabilität der Methode bewertet, sowie in der Originalarbeit „Inter- and intraexaminer reliability of bitewing radiography and near-infrared light transillumination for proximal caries detection and assessment“ in vivo bewertet (2.1.3 Originalarbeit).

Zur Untersuchung der Validität der NIRT wurde ein In-vitro-Modell entwickelt, das ähnliche In-vivo-Beleuchtungsbedingungen ermöglicht, da die von der Diagnocam verwendete Laserdiode Laserspeckle-Muster auf den Bildern erzeugt, wenn sie direkt auf extrahierte Zähne positioniert wird. Die einfachste Möglichkeit, diese lichtbrechenden Eigenschaften in vitro zu simulieren, bestand darin, das Laserlicht durch ein Kolloid oder eine Emulsion zu leiten, bevor es auf den Zahn trifft. Aufgrund der Eigenschaften von Kolloiden, wie z. B. dem Tyndall-Effekt und der Brownschen Bewegung, wird das Laserlicht an den Kolloidkügelchen mehrfach gestreut, und die Fleckenbildung wird reduziert [169]. In Vorversuchen stellte sich homogenisierte Milch mit einem Fettgehalt von 4 % als geeignete lichtstreuende Flüssigkeit heraus. Die Bildqualität wird durch diese Streuung nicht beeinträchtigt, da das Licht zwischen der Lichtquelle und dem Objekt und nicht zwischen dem Objekt und dem CMOS-Sensor gestreut wird. Diese Konfiguration ermöglicht die Umwandlung eines Laserlichtstrahls in eine diffuse Lichtquelle, deren Größe dem Wurzeldurchmesser bzw. dem Dentinkern entspricht. Da die klinische Spitze der Diagnocam nicht in die für den Versuch entwickelte emulsionsgefüllte Küvette passte, wurde als Lichtleiter eine 780 nm Laserdiode seitlich in die Küvette eingeführt. Durch ein auf der Oberfläche angebrachtes Schaumstoffband konnte die Zahnwurzel in das Kolloid eingetaucht werden, während die Zahnkrone mit der Diagnocam untersucht werden konnte. Der Versuchsaufbau verhinderte direkten Lichteinfall in die Kamera, durch Nutzung einer abgedeckten Küvette. Alle Untersuchungen wurden zusätzlich in einem abgedunkelten Raum durchgeführt, so dass die Kamera nur das durch die Zahnwurzel zur Zahnkrone geleitete Licht aufnehmen konnte. Auf die Verwendung eines Nachbarzahnes wurde verzichtet, da sich in Vorversuchen gezeigt hatte, dass die Simulation eines Nachbarzahns die Qualität der Transillumination nicht verbessert.

Als Referenztest diente, wie in allen In-vitro-Untersuchungen zur Kariesdiagnostik dieser Habilitationsschrift, die Microcomputertomographie, da diese sich als geeignetste Methode

erwiesen hat, um die tatsächliche Kariesausdehnung innerhalb einer Probe zu bestimmen, ohne sie zu zerstören (vgl. Kapitel 3.1.1) [24, 153, 189].

Die Ergebnisse der In-vitro-Studie zeigten, dass mit NIRT und BF gesunde Bereiche mit hoher Spezifität (0,95) erkannt werden konnten. Allerdings zeigte die Sensitivität für die Detektion von kariösen Läsionen mit NIRT (0,80) deutlich bessere Werte im Vergleich zur BF (0,59) (Tabelle 1). Diese Beobachtung steht mit der von Abogazalah et al. im Einklang, welche ebenfalls eine geringe Sensitivität der BF (0,50) im Vergleich zur NIRT für die Detektion von approximaler Karies (0,68) in vitro berichteten (Tabelle 1) [4]. Die Läsionen reichten in dieser Studie allerdings höchstens bis zum äußeren Drittel des Dentins.

Aber auch bei der Detektion von Schmelz- und Dentinkaries erreichte NIRT deutlich bessere Werte als BF. NIRT konnte etwa zwei Drittel der Schmelzläsionen korrekt erkennen, während dies im BF nur für ein Drittel der Schmelzläsionen zutraf. Trotzdem wurden einige Schmelzläsionen mit NIRT nicht erkannt. Dies liegt vermutlich an der sehr hohen Sensitivität und Spezifität der Referenzmethode, der Microtomographie, welche zwischen 0,9 und 1 angenommen wird. Dies bedeutet, dass selbst eine kleine, mit NIRT nicht sichtbare Schmelzdemineralisation in μ CT-Bildern nachweisbar ist und als kariös eingestuft wurde [153].

Bei der Erkennung von Dentinkaries konnte NIRT etwa eine doppelt so hohe Sensitivität wie BF erreichen. Dies lag vermutlich an der Wahl des Cut-off-Wert für Dentinläsionen, der bereits ab einem ausgedehnten Kontakt der Karies mit der Dentin-Schmelz-Grenze festgelegt wurde. Die Spezifität, d.h. die Fähigkeit, Dentinkaries korrekt auszuschließen, war für beide Methoden nahezu perfekt. Es ist jedoch zu beachten, dass dieser Cut-off-Wert sowohl beginnende Dentinläsionen als auch fortgeschrittene Läsionen mit Nähe zur Pulpa einschloss. Eine genaue Bestimmung der Läsionstiefe mit NIRT in Dentin ist in den meisten Fällen nicht möglich. Karies im Dentin ist in der Regel nicht sichtbar, da die Lichtstreuung in Schmelz und Dentin aufgrund ihrer Zusammensetzung unterschiedlich ist. Der erhöhte Anteil an Wasser und Proteinen im Dentin sowie die Dentintubuli haben einen großen Einfluss auf die optischen Eigenschaften. Die Lichtstreuung in Dentin ist im sichtbaren und NIR-Bereich stark, während im Schmelz die Lichtstreuung bei Wellenlängen zwischen 543 nm und 1060 nm sehr gering ist [62]. Im Schmelz nimmt der Streukoeffizient mit zunehmender Wellenlänge ab und wird im NIR-Bereich sehr niedrig, während er im Dentin relativ stabil bleibt [107]. Aufgrund der Streuung im Dentin ist die Pulpa in der NIRT nicht sichtbar und kann nicht als Referenz dienen.

Verschiedene In-vivo-Studien berichten ebenfalls über eine hohe Sensitivität der NIRT bei der Detektion von approximaler Karies, allerdings in Verbindung mit einer eher geringen Spezifität (Tabelle 1) [110, 152]. Dies könnte allerdings daran liegen, dass die Studien zur klinischen Bewertung durchgeführt wurden und daher eine große Anzahl Dentinkaries aufwies. Dies führte vermutlich zu einer höheren Rate an echten Positivbefunden und nur einer geringen Anzahl an falsch-positiven Befunden [152]. Betrachtet man die In-vivo-Ergebnisse für Schmelz- und Dentinkaries getrennt, so zeigte NIRT eine hohe Empfindlichkeit für Schmelzkaries, aber weniger für Dentinkaries [110]. Dies bestätigt auch eine weitere Studie von Rusotto et al. Ein direkter Vergleich von In-vitro-Ergebnissen und In-vivo-Studien ist allerdings vorsichtig zu ziehen, da im Gegensatz zu Laborbedingungen am Patienten eine komplette Lichtblockierung und Speichelfreiheit der Zähne nicht zu erreichen ist. Die Hydratation der Zähne, Verfärbungen und das Vorhandensein von Gingiva können die Leistung des NIRT ebenfalls beeinflussen. Die Arbeit in einer Laborumgebung kann die Leistung jeder Karieserkennungsmethode in der In-vitro-Umgebung verbessern. Aber auch der Referenzstandard der Microtomographie, der sogar kleinste Demineralisierungen detektieren kann, hat einen deutlichen Einfluss. Dies erklärt die etwas schlechter Sensitivität der Schmelzkariesdiagnostik in der Studie. Eine Übersicht der Sensitivitäts- und Spezifitätswerte, der im Rahmen dieser Habilitation durchgeführten Kariesdiagnostikstudien und die in der Literatur berichteten Werte für NIRT, für Approximalkaries sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Zur Bewertung einer Untersuchungsmethode ist allerdings nicht nur die Validität als Gütekriterium entscheidend, sondern auch die Reliabilität. In der im Rahmen dieser Habilitation durchgeführten In-vitro-Studie waren die Untersuchungsbedingungen standardisiert. Zwei erfahrene Untersucher unterzogen sich einer Kalibrierung, um Unsicherheiten in Bezug auf die Klassifizierungssysteme aller Methoden zu verringern. Die Untersucher verwendeten für ihre Bewertungen die gleichen kalibrierten Monitor- und Lichtbedingungen, was sich in der nahezu perfekten Übereinstimmung zwischen den Untersuchern und innerhalb der Untersucher für NIRT widerspiegelt (Tabelle 2) [117]. Weitere In-vitro-Studien anderer Forschungsgruppen konnten nur eine moderate Intra- und Inter-Untersucher-Zuverlässigkeit in Bezug auf die Beurteilung von Karies mittels NIRT zeigen (Tabelle 2) [4]. Unsere nahezu perfekte Inter-Untersucher-Übereinstimmung könnte auf die Bewertung durch nur zwei statt drei oder mehr Untersucher, die Beurteilung von aufgenommenen Bildern, statt Live-Bildern, und eine einfachere und klarere Klassifizierung zurückzuführen sein.

Interessant ist aber nicht nur die Zuverlässigkeit unter In-vitro-Bedingungen, sondern vor allem auch unter In-vivo-Bedingungen, da dies der spätere tägliche Einsatz einer klinischen Kariesdiagnostikmethode ist. Daher wurde in der Publikation „Inter- and intraexaminer reliability of bitewing radiography and near-infrared light transillumination for proximal caries detection and assessment“ die Reliabilität unter klinischen Bedingungen untersucht (2.1.3 Originalarbeit).

Eine Gruppe von 12 Zahnärzten mit unterschiedlichem beruflichem Status und klinischer Erfahrung nahm an dieser Studie teil. Vier Zahnärzte hatten weniger als 2 Jahre klinische Erfahrung, vier Zahnärzte hatten zwischen 2 und 5 Jahren klinische Erfahrung und vier von ihnen hatten mehr als 10 Jahre klinische Erfahrung. Die meisten der Untersucher (n = 8) waren an verschiedenen Universitäten beschäftigt, während die übrigen vier Untersucher in Privatpraxen arbeiteten. Vor Teilnahme erhielten die Zahnärzte eine halbtägige theoretische und praktische Schulung, bei der sie in die NIRT-Methode eingeführt wurden und ihnen das Studiendesign sowie die Bewertungskriterien für die Detektion von Approximalkaries erläutert wurden. Im Anschluss erfolgte von jedem Teilnehmer unabhängig die Auswertung der BF- und NIRT-Aufnahmen. Nach vier Wochen erfolgte eine weitere selbständige Bewertung der Aufnahmen.

Im Allgemeinen zeigten beide Diagnosemethoden eine gute Zuverlässigkeit. Beim Vergleich der Zuverlässigkeit der beiden Methoden wurden moderate Übereinstimmungen für die Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit von BF gefunden und sogar erhebliche Übereinstimmungen für NIRT Bilder, die statistisch signifikant waren (Tabelle 2). Die bessere Zuverlässigkeit der NIRT im Vergleich zu BF unter In-vivo-Bedingungen wurde in bereits früher, aber auch aktuelleren veröffentlichten Studien berichtet (Tabelle 2) [2, 18, 23, 110, 115]. Allerdings berichtet eine Studie von Ozkan et al. nur mäßige Werte für die Inter-Untersucher-Zuverlässigkeit, begründen dies aber mit der unzureichenden Kenntnis der diagnostischen Kriterien durch die Untersucher in Bezug auf ihre auf dem Scoring basierenden Messungen [152].

Weiterhin haben wir den Einfluss von bestimmten Kovariablen auf die Zuverlässigkeit analysiert. Das logistische Regressionsmodell zeigte, dass nur der Untersuchungszyklus der Untersuchung und die Diagnostikmethode einen signifikanten Einfluss auf die Reliabilität hatte. Die klinische Erfahrung der Untersucher oder der Zahntyp hatten hingegen keinen signifikanten Einfluss auf die Genauigkeit der Diagnose. So konnte mittels NIRT (aOR 0,82) im Vergleich zu BF (aOR 1,00) Karies mit einer höheren Wahrscheinlichkeit richtig

diagnostiziert werden. Allerdings waren die NIRT-Diagnosen des zweiten Auswertungszyklus (aOR 1,12) im Vergleich zum ersten Auswertungszyklus (aOR 1,00) eher falsch. Eigentlich könnte man einen moderaten Anstieg der Zuverlässigkeit zwischen dem ersten und zweiten Auswertungszyklus aufgrund von Lern- und Gedächtniseffekten in einer solchen Studie erwarten. Somit sind die deutlich niedrigeren Zuverlässigkeitswerte der NIRT-Bilder schwer zu erklären. Eine unbewiesene Hypothese könnte sein, dass alle Untersucher bei der ersten Untersuchung größere Anstrengungen unternommen haben, die NIRT-Bilder richtig zu beurteilen und die Bedeutung des zweiten Verlaufs vernachlässigt haben. Diese Annahme steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen der BF. Allerdings erfolgt die Beurteilung von BF im klinischen Alltag des Zahnarztes regelmäßig und häufig, während die NIRT im Rahmen der Studie eine neue Methode für die Untersucher war, die nicht regelmäßig wiederholt und somit trainiert wird.

NIRT ist besser in der Lage frühe proximale kariöse Läsionen im Schmelz zu erkennen als die BF. Die Empfindlichkeit von NIRT für Dentinkaries ist ebenfalls hoch, allerdings kann in den meisten Fällen nur die Dentinbeteiligung, nicht aber die Läsionstiefe im Dentin bestimmt werden. Der wichtigste Indikator scheint die Beteiligung der Schmelz-Dentin-Grenze zu sein, die häufig mit der rechteckigen Konfiguration der Demineralisation im Schmelz einhergeht. Wenn das Ausmaß der Karies tiefere Bereiche im Dentin erreicht, kann die Transluzenz des Dentins reduziert sein, was zur Sichtbarkeit der Läsion als dunkler Schatten auf NIRT-Bildern führt. Daher scheint NIRT besonders für die Erkennung von proximalen beginnenden und Schmelz- und Dentinläsionen geeignet zu sein, während für eine genaue Bestimmung der Läsionstiefe im Dentin eine Röntgendiagnostik erforderlich ist. Die Zuverlässigkeit der NIRT ist sehr hoch, was sie zu einer geeigneten Methode für die proximale, nicht kavitierte Kariesdiagnostik mit guter Sensitivität und Spezifität im klinischen Alltag befähigt.

3.1.2.2 Okklusalkariesdiagnostik mittels NIRT

In der Originalarbeit „Near-infrared transillumination with high dynamic range imaging for occlusal caries detection in vitro“ wurde unter In-vitro-Bedingungen die Validität der Kariesdiagnostik mittels NIRT überprüft (2.1.4 Originalarbeit).

Ziel der Studie war es, die diagnostische Leistung der NIRT mit HDRI für die Erkennung von okklusaler Karies in permanenten Molaren zu untersuchen und sie mit zwei etablierten Karieserkennungsmethoden zu vergleichen, dem International Caries Detection and

Assessment System II (ICDAS) und BF unter Verwendung der Mikrocomputertomographie (μ CT) als Referenzstandard. NIRT ist für die Detektion von Approximalkaries bereits eine sehr vielversprechende Methode, aber nur sehr wenige Studien haben sich mit ihrem Potenzial für die Detektion von Okklusalkaries befasst [114, 195].

Wie bereits berichtet, tritt bei direkter Transillumination extrahierter Zähne mit der Laserdiode ein Speckle-Effekt auf. Lederer et al. entwickelten ein Modell, das diesen Effekt reduziert und zusätzlich eine Verbesserung der Bildqualität durch High Dynamic Range Imaging (HDRI) erreicht [120]. Dieser Prototyp wurde auch in dieser Studie verwendet. Die Optimierung mittels HDRI wurde gewählt, da dies zu einem höheren Kontrast von NIRT-Bildern beiträgt und nur mit wenig zusätzlichem technischen Aufwand in den Versuchsaufbau integriert werden kann.

Der Sensitivitätswert für die Erkennung von Schmelzläsionen war in dieser Studie für ICDAS am höchsten, während er bei der BF niedrig war. NIRT zeigte in dieser Kategorie ebenfalls eine geringe Sensitivität, aber höhere Spezifitätswerte. Bei der Erkennung von Dentinläsionen wies NIRT die besten Sensitivitätswerte, aber die niedrigsten Spezifitätswerte im Vergleich zu den anderen getesteten Methoden auf (Tabelle 3). Tassoker et al. verglichen die NIRT mit der visuellen Karieserkennung und der Laserfluoreszenzmessung *in vitro* sowie *in vivo*, anhand zur Extraktion vorgesehener Weisheitszähne. Es zeigte sich, dass die NIRT bei der okklusalen Karieserkennung *in vitro* als auch *in vivo* besser abschnitt als die visuelle Inspektion, da sie die höchsten Sensitivitätswerte und die beste Korrelation mit der Histologie aufwies. Dies war allerdings gepaart mit einer geringeren Spezifität, die *in vivo* etwas geringer als *in vitro* war (Tabelle 3) [195].

In der Originalarbeit „Comparison of novel and established caries diagnostic methods: a clinical study on occlusal surfaces“ wurde unter *In-vivo*-Bedingungen die Validität der Kariesdiagnostik mittels NIRT, visuell, Laserfluoreszenz, Wechselstrom-Impedanz-Spektroskopie und BF überprüft. Zusätzlich wurden die Kombination der visuellen Methode mit den jeweiligen geräteunterstützten Diagnostikmethoden untersucht (2.1.5 Originalarbeit).

LF und ACIS wiesen eine hohe Sensitivität für Karies im Allgemeinen und eine mäßige Spezifität für Dentinkaries auf, während die Sensitivität für Schmelzkaries niedrig war. Beide Methoden zeigen hohe Spezifitätswerte für alle drei Diagnoseschwellen. NIRT zeigte niedrigere Spezifitätswerte bei der Gesamt- und Dentinkaries, jedoch in Verbindung mit hervorragenden Sensitivitätswerten. Bei Schmelzkaries zeigte NIRT niedrige Sensitivitätswertewerte in Kombination mit mäßiger Spezifität. Die beste diagnostische

Leistung bei der Erkennung von Schmelzkaries wurde von ACIS erreicht, gefolgt von LF, beide als Zusatzmethoden zur visuellen Inspektion (Tabelle 3).

Die Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit zeigte in beiden Studien gute bis sehr gute Übereinstimmung für NIRT, in vivo war diese allerdings geringer als in vitro. Schäfer et al. fanden eine ähnliche Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit für NIRT in vivo und Tassoaker et al. berichteten sogar über eine höhere Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit (Tabelle 4) [174, 195]. Die etwas geringere Zuverlässigkeit im Vergleich zu ICDAS liegt vermutlich an Schwierigkeiten bei der Auswertung von NIRT-Bildern, über die die Untersucher berichteten, da in einigen Fällen die verwendeten Bewertungskriterien nicht eindeutig erfüllt waren. Aber auch die fehlende Erfahrung mit der NIRT-Methode im Vergleich zu ICDAS der Prüfer trug sicherlich dazu bei. Darüber hinaus basiert die ICDAS auf gut definierten Kriterien, die eine Voraussetzung für eine hohe Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit bilden [101].

Während ICDAS und BF eher zu einer Unterschätzung der Läsionstiefe führen, überschätzt NIRT eine beträchtliche Anzahl der Proben in Bezug auf den Kariesbefall. Die Fehlinterpretationen liegen allerdings meist nur zwischen den Kategorien gesund und Schmelzkaries und weniger in Richtung Dentinkaries. Diese Fehlinterpretationen können durch okklusale Verfärbungen gesunder Molaren verursacht worden sein. Dies wurde bereits in einer Studie von Ng et al. beschrieben, die zeigte, dass Verfärbungen auf Zähnen den Läsionskontrast bei Wellenlängen unter 1150 nm erheblich stören [145]. Als therapeutische Konsequenz könnten die NIRT-Befunde von Kauflächen also eher zu einer verstärkten Prophylaxe führen, da sich die Läsionen in remineralisierbaren Schmelzbereichen befinden. Umgekehrt wäre es ein großes Problem, wenn es zu einer Überschätzung von Dentinkariesläsionen käme, da dies möglicherweise unnötige invasive Eingriffe auslösen könnte, was mit NIRT aber nicht der Fall ist.

Aufgrund der Ergebnisse unserer Studien kann die NIRT jedoch nicht für den alleinigen Nachweis von Okklusalkaries empfohlen werden, sondern nur als Ergänzung zur visuellen Untersuchung, insbesondere zur Erkennung von versteckter Dentinkaries. Da die NIRT bereits in der klinischen Praxis als geeignete Methode für die Erkennung von Approximalkaries eingesetzt wird, sollten beim Einsatz der NIRT zur Kariesdetektion nicht nur die interdentalen, sondern auch die okklusalen Flächen untersucht werden, um alle möglichen Informationen zu sammeln und Zufallsbefunde wie okklusal versteckte Karies zu erkennen.

3.1.3 Approximalkariesdiagnostik mittels nahinfraroter Reflexion

Die nahinfrarote Reflexion (NIRR) ist nicht mit der Nahinfrarot-Transillumination (NIRT) zu verwechseln, da es sich um völlig unterschiedliche Methoden handelt. Obwohl beide Methoden nahinfrarotes (NIR) Licht zur Visualisierung von Kariesläsionen verwenden, unterscheiden sie sich in den optischen Prinzipien, auf denen sie beruhen. Bei beiden Methoden wird das NIR-Licht am kariösen Zahnschmelz gestreut, was bei der NIRR zu einer stärkeren Reflexion zurück zum Sensor führt. Infolgedessen ist die lokale Lichtintensität an einer kariösen Läsion im Vergleich zum angrenzenden gesunden Schmelz erhöht, wodurch Karies im NIRR-Bild heller erscheint als der umgebende gesunde Schmelz. Im Gegensatz dazu erscheinen kariöse Läsionen mit NIRT dunkel, da aufgrund der Lichtstreuung im kariösen Bereich weniger Licht den Detektor erreicht. Bei der NIRR wird das Licht nicht gleichmäßig am Dentinkern reflektiert. Die Menge des reflektierten Lichts hängt vom Winkel zwischen dem einfallenden Licht und der Dentinoberfläche ab. Wenn das NIR-Licht senkrecht auf die Oberfläche trifft, erreicht die Menge des reflektierten Lichts ein Maximum. Wenn das Licht in einem kleinen Winkel auf die Dentinoberfläche trifft, z. B. an der approximalen Oberfläche des Zahns, wird nur eine geringe Lichtmenge reflektiert. Die Menge des reflektierten Lichts ist proportional zum Kosinus des Winkels zwischen dem einfallenden Licht und der Dentinoberfläche. So lassen sich auch die unterschiedlichen Ergebnisse früherer In-vivo-Studien zur NIRT und NIRR erklären, bei denen die NIRT zufriedenstellende Ergebnisse bei der Erkennung von Approximalkaries erzielte, während die NIRR schlechtere Ergebnisse und eine geringe Empfindlichkeit zeigte [100, 115, 140]. Allerdings gab es bisher keine Studien, die die NIRR zur approximalen Kariesdiagnostik unter kontrollierten In-Vitro-Bedingungen untersucht haben.

In den Originalarbeiten „In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection“ (2.1.6 Originalarbeit) und „Diagnostic validity of proximal caries detection using near-infrared imaging technology on 3D range data of posterior teeth“ (2.1.7 Originalarbeit) wurde daher die Leistungsfähigkeit der beiden aktuell auf dem Markt erhältlichen NIRR-Geräte in vitro untersucht.

Diese Geräte sind die VistaCam iX mit dem Proxi-Wechselkopf (Dürr Dental, Bietigheim-Bissingen, Deutschland) und der iTero Element 5D Scanner (Align, San José, CA, USA). Beide Geräte arbeiten mit einer Wellenlänge von 850 nm, unterscheiden sich aber in ihrer Technik. Im optischen System der seit 2013 erhältlichen VistaCam iX mit Proxi-Wechselkopf sind zwei Infrarot-LEDs installiert, welche jeweils den mesialen und distalen Schmelzbereich zweier benachbarter Zähne beleuchten. Bei Betätigung des Aufnahmerings wird dann ein Bild erzeugt.

Das reflektierte Licht wird hierbei vom optischen System erfasst und als Schwarz-Weiß-Bild mit dem Bildgebungsprogramm DBSWIN oder VistaSoft ausgewertet [100]. Der iTero Element 5D-Scanner, der 2019 auf dem Dentalmarkt eingeführt wurde, ermöglicht hingegen die Erfassung dreidimensionaler (3D) Daten des Gebisses bei gleichzeitiger Aufnahme von Bildern der Zähne mit nahezu konfokaler Bildgebung. Eine zusätzlich integrierte NIR-LED, die Licht bei 850 nm emittiert, ermöglicht die Erkennung von proximalen Kariesläsionen mittels NIRR. Im Vergleich zu einem roten Laser der Klasse 1 bei 680 nm und einer weißen LED bei 530 – 600 nm, die ebenfalls in den Scanner integriert sind, hat nur dieses NIR-Licht ein erhöhtes diagnostisches Potenzial. Die Kombination aus 3D-Scanner und Diagnosefunktion mit konfokaler Beleuchtung ist eine Innovation. Die exakte Position der zweidimensionalen (2D-) Bilder im Verhältnis zu den 3D-Daten ermöglicht es, die 2D-Daten auf die 3D-Oberflächenrekonstruktion zu projizieren, um ein sogenanntes Texture Mapping durchzuführen [80]. Da die Bilder aus verschiedenen Winkeln aufgenommen werden, kann die Zahnoberfläche von allen Seiten erfasst werden. Der interessierende Bereich kann dann auf dem Monitor aus vielfältigen Richtungen in einer übersichtlichen Darstellung betrachtet werden. Die 2D-Projektion ist jedoch nur der erste Schritt im Sinne eines Proof-of-Concept. Die Daten haben das Potenzial, eine echte 3D-Lokalisierung von kariösen Defekten im Sinne der optischen Tomographie zu ermöglichen [13, 40, 41].

Da kommerzielle Geräte aufgrund fehlender öffentlich zugänglicher Informationen zu verwendeten optischen Bauteilen und Bildverarbeitungsroutinen jedoch nicht geeignet sind, um Hilfestellung bei der Bewertung eines physikalischen Prinzips zu geben, wurde in der Originalarbeit „Near-infrared reflection at 780 nm for detection of early proximal caries in posterior permanent teeth in vitro“ (2.1.8 Originalarbeit) anhand eines selbst entwickelten optimierten In-vitro-Modells das Potenzial der NIRR zur Erkennung früher Approximalkaries untersucht. Diese optimalen Bedingungen für die NIRR-Analyse wurden durch eine koaxiale Beleuchtung, Polarisationsfilter und kalibrierte Diagnosemonitore erreicht. Polarisationsfilter wurden verwendet, um Reflexionsartefakte aufgrund der spiegelnden Zahnoberfläche zu reduzieren [22, 52]. Lichtreflexionen können für eine schlechte diagnostische Unterscheidung verantwortlich sein, da sie den Graustufenbereich für die Kariesdiagnose aufgrund der automatischen Belichtungskorrektur der meisten Kamerasysteme einschränken.

Die NIRR mit den auf dem Markt befindlichen Geräten mit 850 nm sowie im Laboraufbau mit 780 nm erreichte in unseren Untersuchungen nur geringe Sensitivitätswerte für die Detektion von approximaler Karies. Diese Ergebnisse werden von anderen Autoren ebenfalls in In-vitro-

aber auch In-vivo-Studien bestätigt [100, 197]. Eine weitere In-vivo-Studie berichtet über hohe Sensitivitätswerte, allerdings wurden in dieser nur Zähne untersucht, die bereits auf dem BF eine Karies zeigten [5]. Der Ansatz, die NIRR aus verschiedenen Blickwinkeln zu kombinieren (trilateral) erhöhte die Genauigkeit der Kariesdetektion, allerdings mit sinkender Spezifität. Die NIRR zeigte insgesamt vergleichbare Ergebnisse zur BF bei der Erkennung von früher Approximalkaries. Allerdings ergab die BF-Auswertung eine stärkere Unterschätzung der Karies und eine vergleichsweise geringe Überschätzung, während NIRR in der Okklusalan sicht eine hohe Unterschätzung sowie eine relativ hohe Überschätzung zeigte. Eine trilaterale Betrachtung mit NIRR führte zu einem leichten Rückgang der Unterschätzung, aber die Überschätzung von Karies stieg an (Tabelle 1).

Die hohe Falsch-positive-Rate, die mit NIRR erzielt wurde, wird vor allem durch Artefakte verursacht, die in zahlreichen NIRR-Bildern aller untersuchter Geräte vorhanden waren. Dieses Artefakt war ein weißer Rand um den Zahn im Bereich der okklusalen Randleiste. Es wird vermutet, dass dieses Phänomen auf die sphärische Oberflächenkrümmung der Randleiste zurückzuführen ist. Die Neigung der Schmelzoberfläche beeinflusst die Richtung, in der das vom Dentinkern reflektierte Licht gebeugt wird. Das Vorhandensein dieses weißen Randes erschwerte die Erkennung von Karies im äußeren Teil des Schmelzes, da sich die beiden Bereiche bei der Projektion auf die Kamera überlappten. Bei der Auswertung von Bildern aus diesem Bereich ist es daher leichter, Karies zu übersehen.

Ein weiterer möglicher Grund für die hohe Falsch-positive-Rate der trilateralen NIRR-Bewertung ist insbesondere die Verfärbung. Es wurde berichtet, dass Licht unterhalb von 1100 nm, insbesondere Licht bei 780 nm, von Farbpigmenten absorbiert wird [7]. Diese Absorption trägt mehr zum Läsionskontrast bei als die erhöhte Streuung aufgrund der Demineralisierung [145]. Obwohl diese Artefakte eine potenzielle Fehlerquelle darstellen, sind sie nicht für die schlechte diagnostische Leistung der NIRR in dieser Studie verantwortlich, da unsere Proben kaum Verfärbungen aufwiesen.

Weitere Artefakte waren vor allem mit der Vistacam iX in Form von störenden Reflexionen zu beobachten. Durch wiederholtes Abwinkeln des Lichtstrahls ist es zwar oft möglich, einen bestimmten Bereich reflexionsfrei zu betrachten, aber in den meisten Fällen ist es nicht möglich, den gesamten Approximalbereich reflexionsfrei zu visualisieren. Diese Artefakte sind ein Problem der Methode selbst und treten bei der Transillumination von Zähnen nicht auf. Die Verwendung von Kreuzpolarisationsfiltertechniken, bei denen Polarisationsfilter an der Lichtquelle und der Kamera angebracht werden, verhindern diese Reflexionen. Diese

Spiegelartefakte wurden daher in unserem Laboraufbau nicht mehr beobachtet, da dieser diese Filter verwendete. Der iTero Element 5D-Scanner scheint ebenfalls solche Filter zu verwenden, da auch hier keine Reflexionsartefakte auftraten.

Auch die Opazität des Schmelzgewebes beeinflusst die Erkennung von Karies. So erschwert beispielsweise ein stark opaker Schmelz die Erkennung von Karies oder macht sie sogar unmöglich. Der beschreibende Begriff "opak" entspricht physikalisch gesehen einer stärkeren Lichtstreuung. Wenn der gesamte Schmelz das Licht stärker streut, ist es schwierig, die durch die Initialkaries verursachte Helligkeit von der inhärenten Helligkeit des normalen Schmelzes zu unterscheiden. Studien mit NIRT haben dieses Phänomen bereits beschrieben [1, 188]. Gründe hierfür könnten hyper- oder hypomineralisierter Schmelz sein oder eine Veränderung der Oberflächenschicht des Schmelzes mit zunehmendem Alter, zum Beispiel durch die Ablagerung von Pigmenten. Darüber hinaus wurde festgestellt, dass Hydroxylapatitkristalle mit dem Alter größer werden, was einen Einfluss auf die Zahnhelligkeit hat und auch die optischen Eigenschaften beeinflussen könnte [46, 122, 147]. Bisher gibt es allerdings keine Studien über die Veränderung der optischen Eigenschaften des Zahnschmelzes mit zunehmendem Alter, daher sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Auch der Abstand zwischen Okklusalfäche und Läsion kann die Sichtbarkeit von approximaler Karies erheblich beeinflussen, da NIR-Licht beim Durchgang durch das Zahngewebe abgeschwächt wird. Der Kontrast nimmt mit zunehmender Schmelzdicke deutlich ab und ist in Schichten von mehr als 4 mm weniger ausgeprägt. Daher können mehr zervikal gelegene Läsionen nicht visualisiert werden [102].

Ein weiteres Problem der NIRR ist die nicht zufriedenstellende Darstellung der Schmelz-Dentin-Grenze und somit fehlender Diskriminierung zwischen Schmelz und Dentin. Bei einer Wellenlänge von 780 nm konnte dies nur in 22 % der Fälle gelingen, bei einer Wellenlänge von 850 nm in 47 % der Fälle. Diese Beobachtung wird auch von Jablonski-Momeni et al. bestätigt, die ebenfalls ein geringes Potenzial der NIRR zur Unterscheidung des Schmelzes bei 850 nm beobachteten [100]. Darüber hinaus beobachteten wir, dass die Differenzierung der Schmelz-Dentin-Grenze bei Prämolaren signifikant besser war als bei Molaren, was wahrscheinlich auf das Vorhandensein einer dünneren Schmelzschicht bei Prämolaren oder auf die Größe oder den Radius der approximalen Kontaktfläche zurückzuführen ist. Es wurde bereits berichtet, dass der Kontrast mit zunehmender Schmelzdicke signifikant abnimmt [102]. Eine Klassifizierung der Karies mittels NIRR in Abhängigkeit vom Abstand zwischen Pulpa und Schmelz und Dentin zu klassifizieren ist aufgrund der unzuverlässigen Unterscheidung von Schmelz und

Dentin nicht sinnvoll. Folglich können NIRR-Befunde nur dichotom in gesund oder erkrankt unterschieden werden. Eine genauere Klassifizierung des Schweregrads der Läsion wäre wahrscheinlich in NIR-Bereichen mit höheren Wellenlängen von etwa 1300 nm möglich, da der Abschwächungskoeffizient des Schmelzes mit zunehmender Wellenlänge abnimmt und der Schmelz bei höheren Wellenlängen visuell transparenter erscheint.

Auffallend war bei Studie mit dem iTero Element 5D Scanner, dass Entkalkungen im Zahnschmelz auffallend hell und fast strahlend erschienen. Entkalkungsbänder in der bukkalen oder lingualen Region erschienen sehr hell und kontrastreich. Dies könnte auf die etwas längere Wellenlänge von 850 nm zurückzuführen sein. Alternativ könnte die Helligkeit der Entkalkungen durch die gleichzeitige Beleuchtung des Zahns mit einer 680-nm-Laserdiode, die für den 3D-Scanner verwendet wurde, in Kombination mit einer 850-nm-NIR-LED verursacht werden. Rotes Laserlicht könnte, zusätzlich zur Beleuchtung durch reine Reflexion, Fluoreszenz anregen. Seit den 1990er Jahren gelten Diagnosegeräte, die Laserfluoreszenz bei einer Wellenlänge von 655 nm verwenden, als empfindliche Diagnoseinstrumente für den Nachweis von Approximalkaries. Das emittierte Licht induziert die Fluoreszenz von bakteriellen Porphyrinen, wobei die Intensität proportional zur Tiefe der Demineralisierung oder der bakteriellen Kontamination zunimmt. Da jedoch keine detaillierten Informationen über die vom Hersteller bevorzugte Beleuchtungsstrategie vorliegen, kann diese Hypothese nicht geprüft werden.

Die NIRR erreichte in unseren Untersuchungen vergleichbare diagnostische Ergebnisse wie die BF. Aufgrund optischer Prinzipien hat die NIRR mit Wellenlängen bis 850 nm allerdings kein hohes Potenzial für die Erkennung von Approximalkaries. Dies gilt insbesondere für beginnende Läsionen, die sich unter dem weißen Randartefakt im Bereich der Randleiste befinden. Fortgeschrittene Läsionen sind leichter zu erkennen. Trilaterale NIRR-Bewertungen überschätzten das Vorhandensein von Approximalkaries und zeigten höhere Sensitivitätswerte für die Erkennung von initialen Kariesläsionen als die BF. Im Gegensatz zur BF kann sie aber keine verlässliche Empfehlung für oder gegen eine invasive Therapie bei Überschreitung der Schmelz-Dentin-Grenze unterstützen.

Die Verwendung höherer Wellenlängen könnte das diagnostische Potenzial der NIRR verbessern. Es gibt mehrere Grundlagenstudien zur NIR-Transillumination und -Reflexion mit verschiedenen Wellenlängen, aber aufgrund der Existenz von Patenten auf NIR-Transillumination im Bereich von 795 bis 1600 nm verwenden die Hersteller niedrigere Wellenlängen [28, 121, 145, 184, 185, 190, 217, 220]. Da die NIRR von diesen Patenten nicht

betroffen ist und die benötigten Indium-Gallium-Arsenid-Sensoren aufgrund technischer Möglichkeiten und Nachfrage des Marktes günstiger werden, könnten zukünftige Geräte mit einer höheren Wellenlänge und hohem diagnostischen Potential hergestellt werden.

3.2 Neuartige Entwicklungen in der Kariestherapie

3.2.1 Glasionomerzemente

Klinische Untersuchungen von Restaurationsmaterialien sind unerlässlich, um die klinische Leistung und das langfristige Überleben unter In-vivo-Bedingungen zu bewerten. Es gibt allerdings nur wenige Studien über hochvisköse Glasionomerzemente als definitive Restaurationen für Klasse-II-Kavitäten im bleibenden Gebiss. Frühere Studien an primären Molaren oder mit ART-Techniken zeigten vielversprechende Ergebnisse für Glasionomerzement (GIZ)-Restaurationen in Klasse-II-Kavitäten [35, 39, 49, 66, 91]. Weitere Studien mit hochviskösem GIZ für das bleibende Gebiss mit einer Untersuchungszeit von bis zu 3 Jahren zeigten ebenfalls überwiegend positive Ergebnisse für das Langzeitüberleben [44, 56, 57, 65, 69, 142]. Für GIZ, die über einen Zeitraum von 4 Jahren hinausgehen, sind jedoch bisher nur wenige Langzeitstudien veröffentlicht worden, die unterschiedliche Ergebnisse zeigten (Tabelle 5)[19, 70-72, 109, 177, 199].

Mehrere Studien zu verschiedenen anderen hochviskösen GIZ in Klasse-II-Restaurationen haben eine recht hohe Versagensrate berichtet, die teilweise auf die geringe Bruchzähigkeit des Materials zurückzuführen ist [57, 177]. Manhart et al. berichteten in ihrer Übersichtsarbeit über eine jährliche Versagensrate (annual failure rate - AFR) von konventionellem GIZ zwischen 1,4 % und 14,3 % [135]. Hochvisköse GIZ wurden zwischenzeitlich aber auch weiterentwickelt und es wurde die Empfehlung gegeben, diese in der ersten Phase der Aushärtung mittels einem nanogefüllten lichthärtenden Coating zu überziehen.

Daher untersuchten wir in den Originalarbeiten „Corrigendum: A 3-year controlled randomized clinical study on the performance of two glass-ionomer cements in Class II cavities of permanent teeth“ (2.2.1 Originalarbeit) und „Six-year results of a randomized controlled clinical trial of two glass ionomer cements in class II cavities“ (2.2.2 Originalarbeit) anhand einer longitudinalen, doppelblinden, randomisierten, kontrollierten klinische Studie die Leistung von zwei GIZ (Equia Fil / Equia Coat und Fuji IX GP Fast / Fuji Coat LC) in zwei-

oder dreiflächig belasteten Seitenzahnkavitäten über einen Beobachtungszeitraum von 3 und 6 Jahren.

In der Studie wurden bei den Equia Fil / Equia Coat-Restaurationen nach einem Jahr in situ keine Ausfälle beobachtet, während zwei Füllungen mit Fuji IX GP Fast / Fuji Coat LC ersetzt werden mussten (6,9 %). Nach 2 Jahren versagte eine Equia Fil / Equia Coat-Restauration, während die Gesamtversagensrate nach 3 Jahren auf 10,7 % (n=3) anstieg. Beim Kontrollmaterial versagten nach 3 Jahren ebenfalls insgesamt drei Restaurationen (12,0 %). Diese Ergebnisse sind mit den Ergebnissen anderer Studien vergleichbar. Basso et al. wiesen für Equia Fil / Equia Coat-Restaurationen in Klasse II-Kavitäten nach 48 Monaten eine Gesamtversagensrate von 10,0 % nach [19]. Klinke et al. fanden in einer prospektiven Feldstudie eine überlegene Leistung des Equia Fil-Konzepts in Klasse-II-Kavitäten nach 4 Jahren [109]. Allerdings beschrieben sie auch einen hohen Prozentsatz an unbefriedigenden bis schlechten Klasse-II-Restaurationen für die getesteten Materialien. Im Gegensatz zu den oben genannten Ergebnissen gibt es jedoch eine Reihe von Studien über das Equia Fil-Restaurationskonzept, in denen eine Erfolgsrate von 100 % bzw. 92,8 % in kleinen Klasse-II-Kavitäten nach 2 Jahren festgestellt wurde [65, 105]. Gurgan et al. verglichen das Equia Fil-Konzept mit einem mikrogefüllten Hybridkomposit und stellten eine Überlebensrate von 100 % des Equia Fil-Restaurationskonzepts nach 2 Jahren, 92,3 % nach 4 Jahren und keine zusätzlichen Ausfälle nach 6 Jahren fest, womit es im Vergleich zum Hybridkomposit gleich gut abschnitt (Tabelle 5) [69-71]. Nach 6 Jahren wurde in unserer Studie insgesamt ein Versagen von acht Restaurationen, davon vier mit Equia Fil / Equia Coat und vier mit Fuji IX GP Fast / Fuji Coat LC festgestellt. Im Zeitraum von 3 bis 6 Jahren versagte also nur eine Füllung in jeder Gruppe. Die Gesamtüberlebensraten für Equia Fil und Fuji IX GP Fast nach 6 Jahren liegen beide bei 81,8 %. Scholtanus und Huysmans stellten in ihrer Studie mit dem hochviskösen GIZ Fuji IX GP eine geringere Überlebensrate von 60 % von Klasse-II-Restaurationen nach 6 Jahren fest [177]. Eine weitere klinische Studie von Türkün und Kanik, die Equia Fil über einen Zeitraum von 6 Jahren untersuchte, kam zu dem Ergebnis, dass Equia Fil eine akzeptable klinische Leistung aufweist, lieferte aber leider keine Überlebensdaten [199]. Kürzlich veröffentlichten Gurgan et al. weitere Daten zu Equia Fil in Kavitäten der Klassen I und II nach 10 Jahren. Unter idealen Bedingungen erzielte das Material nach 10 Jahren eine Erfolgsquote von 100 % und eine kumulative Überlebensrate von 96,83 %. Alle Restaurationen wurden bei Patienten ohne Risikofaktoren wie Bruxismus oder hohes Kariesrisiko gelegt. Allerdings waren diese Klasse-II-Restaurationen auch klein, und alle

Ränder lagen im Schmelz. Daher geben die Autoren auch an, dass ihre Ergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren seien [72].

In der von uns durchgeführten Studie müssen bei der Analyse der Ergebnisse einige Einschränkungen berücksichtigt werden. Dazu gehören die Stichprobengröße aufgrund der begrenzten Dauer der Patientenrekrutierung von 1 Jahr und die Recall-Rate von 62,4 % nach 3 Jahren sowie 51,8 % nach 6 Jahren, was zu einer geringeren statistischen Aussagekraft der Studie führte. Das Problem schlechter Nachbeobachtungsraten in Langzeitstudien ist allerdings hinlänglich bekannt und nimmt mit zunehmender Nachbeobachtungszeit zu [26]. Aufgrund der langen Studiendauer kann es vorkommen, dass die Patienten umziehen oder ihr Interesse daran verlieren, zur Nachuntersuchung zurückzukehren [79, 211]. Daher ist die niedrige Nachuntersuchungsrate nach 6 Jahren sicherlich nicht ungewöhnlich, kann aber die Misserfolgsrate erheblich beeinflussen und zu Verzerrungen führen [21]. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen jedoch eine Tendenz in der Leistung dieser Materialien, wie sie in ähnlichen GIZ-Studien beschrieben wurde [19, 109].

Innerhalb von 3 Jahren mussten 3 von 25 Fuji IX GP Fast- und 3 von 28 Equia Fil-Füllungen aufgrund von Materialfrakturen ersetzt werden. Eine Fuji IX GP Fast-Füllung versagte aufgrund einer mesio-distalen Fraktur und bei den übrigen Frakturen beider Materialien handelte es sich um Bulk-Frakturen am Übergang von der okklusalen zur approximalen Kavität. Eine weitere Equia Fill-Restaurations zeigte im Beobachtungszeitraum von 3 bis 6 Jahren (nach 5 Jahren) eine Bulk-Fraktur. Bulk-Frakturen wurden von Hickel et al. als einer der Hauptgründe für den Austausch von GIZ beschrieben [83]. Diese Frakturen wurden mit der Größe der Kavität in Verbindung gebracht, wobei größere Klasse-II-Kavitäten viel häufiger versagen als kleinere [109, 199]. Diese Tendenz wurde auch in einer Übersichtsarbeit von Kielbassa et al. über Equia-Fil-Restaurations beschrieben, konnte aber in der vorliegenden Studie nicht ausgewertet werden, da es sich bei den meisten Restaurations um zweiflächige Kavitäten handelte [106]. Darüber hinaus fanden Basso et al. heraus, dass die Wahrscheinlichkeit eines Misserfolgs umso größer ist, je größer die Breite des approximalen Kastens ist, wobei Prämolaren ein höheres Misserfolgsrisiko aufweisen als Molaren [19]. In der von uns durchgeführten Studie traten Misserfolge nur bei Prämolaren auf, die jedoch die Mehrheit der restaurierten Zähne ausmachten (74 %). Die Ergebnisse konnten jedoch keinen statistisch signifikanten Einfluss des Parameters Zahnart auf das Versagen der Restaurations nachweisen, was wahrscheinlich auf den geringen Stichprobenumfang bei Molaren zurückzuführen ist.

Zusätzliche Informationen konnten aus vorhandenen Röntgenbildern gewonnen werden, die später aus anderen diagnostischen Gründen angefertigt wurden. So wurden beispielsweise einige Lücken an der Unterseite der approximalen Füllungsänder festgestellt, die sich im Laufe der Zeit vergrößerten und zu Abplatzungen, Frakturen und Versagen führten. Diese Beobachtung wurde bereits von weiteren Autoren beschrieben [17, 177]. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung könnte die Verwendung von Metallmatrizen beim Legen der Restaurationen sein. Es ist bekannt, dass GIZ das Potenzial hat, chemisch an Metall zu haften [17, 177]. Beim Entfernen der unbeschichteten Matrizen, unmittelbar nach der vom Hersteller empfohlenen Aushärtungszeit, haftete der GIZ teilweise am Metall, und es musste ein gewisser Kraftaufwand betrieben werden, um die Matrize zu entfernen. In diesem frühen Stadium nach der Applikation war der GIZ noch nicht vollständig ausgereift, was zu Mikrorissen in der approximalen Füllungsfläche oder sogar zu einem teilweisen Debonding des Materials am Boden führen konnte, was den GIZ empfindlicher gegenüber chemischen Angriffen und okklusaler Belastung machte. Um dies zu vermeiden, sollte die Verwendung von beschichteten Metallbändern oder einer dünnen Isolierung der Metallmatrizen in Betracht gezogen werden, wie es in den aktuellen Equia Forte-Richtlinien empfohlen wird.

Eine weitere Überlegung zu dieser Problematik ist das Auftragen des Coatings, welches nach okklusalen Anpassungen aufgebracht wurde. Dabei wurde keine Zahnseide verwendet, um das Coating bis in den approximalen Kontaktbereichen aufzutragen. Da sich in den approximalen Bereichen einige nicht mit Coating überzogene Anteile befanden, bestand dort nach der ersten Aushärtungsphase kein Schutz vor Wasseraufnahme. Verschiedene Studien haben gezeigt, dass ein Coating die mechanische Festigkeit und Verschleißfestigkeit von GIZ-Restaurationen verbessert [44, 131, 142, 183].

Eine interessante klinische Beobachtung betrifft einige Schwierigkeiten bei der Anwendung des GIZ aufgrund des Winkels und des Durchmessers der Applikationsspitze der Kapsel. In kleinen approximalen Kavitäten war es aufgrund des größeren Durchmessers der Spitze schwierig, das Material auf den Boden der Kavität aufzubringen. Außerdem war die Platzierung des GIZ aufgrund der geringen Abwinkelung der Spitze mit zunehmender posteriorer Position des zu restaurierenden Zahns anspruchsvoller. Diese Faktoren machten es manchmal schwierig, eine gute Haftung am Boden der approximalen Box zu gewährleisten und Lufteinschlüsse in der approximalen Füllung zu vermeiden. Diese Beobachtungen waren klinisch nicht nachweisbar, sondern waren Zufallsbefunde bei Röntgenaufnahmen, die aus anderen diagnostischen Gründen gemacht wurden. So waren Inhomogenitäten (Hohlräume) im

approximalen Bereich der Restaurationen in Bissflügelröntgenaufnahmen zu sehen. Interessanterweise waren diese Defekte zu den verschiedenen Zeitpunkten der Bewertung durch die Untersucher klinisch nicht nachweisbar. In zwei Fällen führten diese Unregelmäßigkeiten jedoch zu einer Unterminierung und Schwächung der Restauration, was sich später durch Frakturen der Restauration unter Kaubelastung bemerkbar machte.

Wie auch für Komposite beschrieben, können kleine Lufteinschlüsse in GIZ-Füllmaterialien auch auf den Mischprozess oder den Applikationsprozess zurückgeführt werden und zu einer durchschnittlichen Porosität von 0,5 – 3 % führen [116]. Diese Poren können die Ermüdung und die mechanischen Eigenschaften negativ beeinflussen.

Des Weiteren ist auch eine Auflösung des GIZ möglich. Andersson-Wenckert et al. beschrieben eine Auflösung in großflächigen offenen Sandwich-Restaurationen, die aus kunststoffmodifiziertem Glasionomermaterial als Basismaterial bestehen, nach 5 bis 6 Jahren [8]. Darüber hinaus beschrieben Scholtanus und Huysmans in einer 6-Jahres-Studie an Klasse-II-Fuji IX GP-Restaurationen das Auflösungsphänomen bei hochviskosen Glasionomermaterialien [177]. Da die Auflösung dem Prozess der Kariesentwicklung ähnlich zu sein scheint, vermuteten sie, dass der Materialverlust durch die Säurebildung aufgrund von Plaque und der Säureempfindlichkeit des Materials verursacht wurde [177]. Der approximale Plaqueindex in unserer Studienpopulation lag jedoch nur bei 20,6 %, was einer guten Mundhygiene entspricht. Eine Auflösung aufgrund von Plaque ist aus diesem Grund in unserer Studie weniger wahrscheinlich.

Allerdings zeigten In-vitro-Studien auch, dass GIZ unter anderem auf Orangen- und Apfelsaft reagieren können. Es wurde festgestellt, dass nicht der niedrige pH-Wert für die Auflösung verantwortlich ist, sondern vielmehr die chelatbildenden Karbonsäuren in den Säften. Im Vergleich dazu hat Phosphorsäure, die auch in dem Erfrischungsgetränk Cola enthalten ist, keine auflösende Wirkung. Es ist daher möglich, dass das Auflösungsphänomen durch besondere Ernährungsgewohnheiten, insbesondere durch den Verzehr von säurehaltigen Lebensmitteln oder Getränken, verstärkt werden könnte [141]. Ein Coating ist daher vorteilhaft. Darüber hinaus hat der Hersteller GC eine neue, weniger säureanfällige Version, Equia Forte, entwickelt.

Nur eine Füllung versagte aufgrund von Sekundärkaries. Dies geschah nach 60 Monaten und ist somit ein typisches spätes Füllungsversagen. Der Grund für die geringe Inzidenz dieser Art von Misserfolg könnte zum einen auf die Fluoridfreisetzung durch GIZ und zum anderen auf

den niedrigen approximalen Plaqueindex der Studienpopulation zurückzuführen sein, was auch in mehreren anderen Studien berichtet wurde [111, 149, 150]. Darüber hinaus gab es keine Probleme in Bezug auf die Zahnintegrität. Auch konnte während des Beobachtungszeitraums keine Hypersensibilität der behandelten Zähne festgestellt werden, was mit den Ergebnissen anderer Studien übereinstimmt [19, 44, 70].

Nach drei Jahren traten bei 31 % (fünf Molaren, vier Prämolaren) der Equia Fil-Restaurationen und bei 12 % (drei Molaren) der Fuji IX GP Fast-Restaurationen kleinere Abplatzungen auf. Alle Abplatzungen wurden am äußeren Bereich der Randleiste der Füllung beobachtet, beeinträchtigten aber nicht die Funktion der Füllungen. In der vorliegenden Studie wiesen Molaren eine höhere Tendenz zu kleineren Abplatzungen auf als Prämolaren, während Basso et al. die Mehrzahl der Abplatzungen bei Prämolaren beschrieben. Diese Abplatzungen können eine Folge der geringeren Bruchzähigkeit von GIZ sein [19].

Eine Veränderung des Oberflächenglanzes konnte bei beiden Materialien bereits nach 1 Jahr beobachtet werden. Diese Beobachtung lässt sich wahrscheinlich durch den Verlust des Coatings erklären, der zu einem stumpfen Aussehen des Materials führt, ohne dass ein klinischer Eingriff erforderlich ist. Turkun und Kanik beschrieben dieses Phänomen ebenfalls, wobei die Beschichtung fast aller GIZ-Füllungen nach 6 Monaten abgenutzt war, was jedoch keine Auswirkungen auf die klinische Leistung hatte, da der Glasionomerezement in der Zwischenzeit vollständig ausgereift war und seine maximale Festigkeit erreichte [199]. Bei der visuellen Analyse der okklusalen Kontur und der Abnutzung der getesteten Materialien nach 3 Jahren konnten keine signifikanten Veränderungen festgestellt werden. Dies wurde auch von Gurgan et al. nach 4 und 6 Jahren beobachtet [70, 71]. Dennoch kann eine visuelle Untersuchung der Abnutzung nur grobe Diskrepanzen des Materialverlusts erkennen, weshalb sie nicht als detaillierte und hochpräzise Methode zur Analyse von Abnutzung und okklusaler Kontur empfohlen werden kann. Eine kombinierte 3D-Abdruckanalyse kann immer genauere Ergebnisse liefern [86, 87].

Das Equia-Restorationssystem wurde als dauerhaftes Füllungsmaterial für Seitenzähne beworben und stellt durchaus eine Alternative zu Amalgam dar. Wie Kielbassa et al. feststellten, hat in der Literatur eine beachtliche Anzahl von prospektiven und retrospektiven Studien gezeigt, dass dieses Material im Vergleich zu den Kontrollmaterialien, die von GIZ bis zu Kompositmaterialien reichen, recht gut abschneidet [106]. Allerdings wurde eine hohe Tendenz zum Versagen bei Kavitäten der Klasse II festgestellt.

Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es einige Anwendungsprobleme gab, deren klinische Auswirkungen von den Anwendern während des Einsetzens oder der Baseline-Bewertung nicht erkannt wurden, sind einige Misserfolge möglicherweise nicht auf die Materialeigenschaften selbst zurückzuführen, sondern eher auf die in der Studie definierten Anwendungsverfahren. Inzwischen wurde das Material zu einem Glashybrid weiterentwickelt und als Equia Forte auf den Markt gebracht. Die voluminöseren Glasfüllstoffe werden durch kleinere, hochreaktive Glasfüllstoffe ergänzt. Dies führt zu einer besseren Handhabung des Materials mit verbesserter Verdichtbarkeit und geringerer Klebrigkeit sowie zu einer erhöhten Biegefestigkeit und Säurestabilität.

3.2.2 Bulk-Fill Komposite

Bis vor kurzem galt die inkrementelle 2-mm-Schichttechnik als Goldstandardverfahren für direkte Kompositrestaurationen im Seitenzahnbereich, um die Polymerisationsschrumpfung zu reduzieren, eine ausreichende Aushärtungstiefe zu erreichen und die Elution von Monomeren zu verringern [79, 98, 157, 171]. Die Einführung von Bulk-Fill-Kompositmaterialien bietet nun die Möglichkeit einer ausreichenden Polymerisation von Inkrementen von mindestens 4 mm und daher eine deutliche Zeitersparnis [79, 96, 97]. Aufgrund ihrer unterschiedlichen klinischen Anwendungen können Bulk-Fill-Komposite entweder in niedrigvisköse, fließfähige Materialien oder hochvisköse, modellierbare Materialien kategorisiert werden [98]. Niedrigvisköse Bulk-Fill-Komposite ermöglichen eine gute Platzierung und Anpassung in tiefen Kavitäten. Aufgrund ihres geringeren Füllstoffgehalts, der zu einer geringeren Verschleißfestigkeit und schlechteren mechanischen Eigenschaften führt, muss dieses Bulk-Fill-Komposit jedoch mit einem herkömmlichen Komposit abgedeckt werden (zweistufige Bulk-Technik). Hochvisköse Bulk-Fill-Komposites hingegen haben einen höheren Füllstoffgehalt, der sie verschleißfest macht. Daher können diese Bulk-Fill-Materialien ohne jegliche Abdeckung in die Kavität eingebracht werden (Bulk-Technik) [9, 74, 97].

Die Entwicklungen in der Komposittechnologie und die regelmäßige Einführung neuer Produkte waren in den letzten Jahrzehnten rasant. Zwar wurden seit der Markteinführung von Bulk-Fill-Kompositen zahlreiche Studien durchgeführt, aber klinische Langzeitdaten über 10-Jahre für Komposite sind nur selten verfügbar und für Bulk-Fill-Kompositmaterialien existierten diese bisher nicht. Die bisher vorliegenden Langzeitstudien zu Kompositen zeigen eine unterschiedliche Versagensrate während der Alterung von Kompositrestaurationen und

weisen auf die Notwendigkeit längerer Beobachtungszeiträume hin [12, 26, 82, 155]. Studien, in denen die unterschiedlichen Eigenschaften von konventionellen und Bulk-Fill-Kompositen verglichen wurden, erzielten ebenfalls widersprüchliche Ergebnisse [125]. Daher sind klinisch tätige Zahnärzte immer noch unsicher, ob sie diese neue Materialklasse in der klinischen Praxis einsetzen sollen [9].

Im Allgemeinen wird in klinischen Studien über Zahnersatzmaterialien zwischen frühen Ausfällen (0-6 Monate), Ausfällen über einen mittleren Zeitraum (6 bis 24 Monate) und späten Ausfällen nach zwei Jahren unterschieden [87, 139]. Frühe Ausfälle sind meist auf Behandlungsfehler zurückzuführen (z. B. postoperative Überempfindlichkeit, Verlust der Restauration, allergische Nebenwirkungen), während mittlere Ausfälle (Randverfärbung, Verfärbung/Fleckenbildung des Materials, Abplatzen des Materials und/oder Bulk-Frakturen) und späte Ausfälle (Bulk-Frakturen, Zahnfrakturen, Sekundärkaries, übermäßige Abnutzung des Materials oder des Gegenzahns, parodontale Nebenwirkungen) eher auf die Materialeigenschaften zurückzuführen sind.

Daher wurde in der Originalarbeit „Clinical evaluation of the bulk fill composite QuiXfil in molar class I and II cavities: 10-year results of a RCT“ (2.2.3 Originalarbeit) anhand einer longitudinalen, randomisierten, kontrollierten klinischen Studie die Leistung eines der ersten auf dem Markt erhältlichen Bulk-Fill-Komposite – QuiXfil – in Klasse II Kavitäten im Seitenzahnbereich über einen langen Beobachtungszeitraum von 10 Jahren untersucht und mit dem gut etablierten Hybridkomposit Tetric Ceram verglichen. Weiterhin untersuchten wir in der Originalarbeit „Bulk-fill composites compared to a nanohybrid composite in class II cavities – a two year follow-up study“ (2.2.4 Originalarbeit) verschiedene Konzepte für direkte Kompositrestaurationen, ebenfalls in Klasse II Kavitäten, in einer klinischen Studie über einen mittleren Nachbeobachtungszeitraum von zwei Jahren.

Unsere Untersuchungen zum Langzeitüberleben eines Bulk-Fill-Materials der ersten Generation im Vergleich zur Kontrollgruppe, zeigten nach 10 Jahren klinisch akzeptable Ergebnisse (2.2.3 Originalarbeit). Im Untersuchungszeitraum versagten zehn Restaurationen (sechs QuiXfil und vier Tetric Ceram). Die Hauptgründe für das Versagen waren Sekundärkaries und Randverfärbungen, gefolgt von Zahnfrakturen, Restorationsbrüchen, postoperativer Sensibilität und einer Verschlechterung der Randintegrität. Die Ergebnisse stimmen mit der Klassifizierung von Misserfolgen nach Hickel et al. überein, da Sekundärkaries, Zahnfrakturen und Restorationsbrüche hauptsächlich als Spätversagen nach mehr als 2 Jahren auftreten [84, 85, 87]. Die statistische Analyse ergab keinen Unterschied

zwischen den Materialien in Bezug auf die Versagensrate oder die Art des Versagens; allerdings gab es bei "großen Kavitäten" statistisch gesehen mehr Versagen als bei "kleinen Kavitäten", unabhängig vom Material. Es wurde kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen QuiXfil- und Tetric Ceram-Restaurationen in großen Kavitäten festgestellt. Höhere Versagensraten bei großen Kavitäten wurden in vielen Studien beschrieben [26, 36, 37, 150, 151, 210]. Opdam et al. fanden heraus, dass das Risiko eines Misserfolgs um 40 % pro Füllungsfläche ansteigt [150].

Sekundärkaries war der Hauptgrund für das Versagen von Restaurationen in dieser Studie. Demarco et al. stellten ebenfalls fest, dass die Hauptgründe für Misserfolge in Langzeitstudien Sekundärkaries und Frakturen sind. Eine Metaanalyse von Heintze und Rousson bestätigte, dass Randkaries frühestens nach 2 Jahren auftrat, und Astvaldsdottir stellte fest, dass mehr als 75 % der Sekundärkaries nach 3 Jahren auftrat, was auf die Notwendigkeit einer angemessenen Nachbeobachtungszeit hinweist [12, 42, 82].

Zwei große QuiXfil-Restaurationen brachen, eine nach 18 Monaten und eine weitere nach 120 Monaten, keine der Tetric Ceram-Restaurationen zeigte eine Verschlechterung der Integrität der Restauration. Mahmoud et al. beschrieben ebenfalls Frakturen der Restauration als Hauptursache für das Versagen von QuiXfil-Restaurationen nach 3 Jahren [134]. Die Gründe für die Fraktur von Restaurationen wurden im Zusammenhang mit der Biegefestigkeit, der Bruchzähigkeit und der Ermüdungsfestigkeit der Restaurationsmaterialien sowie mit patientenbezogenen Variablen wie Bruxismus und Parafunktionen beschrieben [54, 81]. Da die Patienten zum Zeitpunkt der Patientenrekrutierung nicht nach Bruxismus kategorisiert wurden, war keine zusätzliche multivariate Analyse möglich. Tatsächlich traten alle Restaurationsfrakturen in der QuiXfil-Gruppe auf, obwohl die Biegefestigkeit und Bruchzähigkeit von QuiXfil mit der von Tetric Ceram vergleichbar ist und die Biegeermüdungsgrenze bei Tetric Ceram deutlich niedriger liegt [15, 43, 95].

Während des Beobachtungszeitraums kam es zu drei Zahnfrakturen. Ein Zahn mit einer großen Tetric Ceram Versorgung frakturierte nach 36 Monaten, einer mit einer kleinen QuiXfil Versorgung ebenfalls nach 36 Monaten und ein weiterer mit einer kleinen QuiXfil Versorgung nach 48 Monaten. Eine mögliche Ursache hierfür können Parafunktionen wie Bruxismus sein, da mehrere Studien eine Korrelation zwischen Patienten mit Bruxismus und Zahnfrakturen nachgewiesen haben und Patienten mit Bruxismus in dieser Studie nicht ausgeschlossen wurden [201, 202]. Da die Restaurationsmaterialien mit unterschiedlichen Adhäsivsystemen (self-etch und etch-and-rinse) verwendet wurden, könnten die Misserfolge bei den kleinen QuiXfil-

Restaurationen auch auf das verwendete self-etch Adhäsiv zurückzuführen sein. Siso et al. stellten eine höhere Bruchfestigkeit bei endodontisch behandelten Prämolaren fest, wenn ein Total-Etch-Zwei-Schritt-Adhäsiv im Vergleich zu einem Ein-Schritt-Adhäsiv verwendet wurde [187].

Bei QuiXfil-Restaurationen, welche mit einem self-etch Adhäsiv angewendet wurden, wurde nach 10 Jahren eine signifikante Zunahme der Randverfärbung (46,2 % bravo, 3,8 % charlie und 3,8 % delta) und eine geringere Randintegrität (46,2 % bravo) im Vergleich zum Ausgangswert festgestellt. In ähnlicher Weise zeigten die mit einem etch-and-rinse Adhäsivsystem gelegten Tetric Ceram-Restaurationen nach 10 Jahren signifikant mehr Randverfärbungen (23,3 % Bravo und 10 % Delta) und eine Verschlechterung der Randintegrität (23,3 % Bravo und 3,3 % Charlie). Der Verlust der marginalen Integrität bei der Baseline könnte durch Schrumpfstress, die Auswirkungen der Kavitätengeometrie auf den C-Faktor oder eine fehlerhafte Adaption des Restaurationsmaterials an die Kavitätenwände verursacht worden sein [58, 138, 154]. Hickel et al. beschrieben, dass die Verschlechterung der Ränder in der Regel über eine mittlere Nutzungsdauer erfolgt [87]. Eine mögliche Ursache für die Verschlechterung der Randadaption und der Randverfärbung im Laufe der Zeit könnte die Hydrolyse des Adhäsivs sein. Wasser, aber auch Chemikalien, könnten von den Monomeren des Adhäsivs aufgenommen worden sein und zu chemischen und physikalischen Prozessen geführt haben, die zu einer Auflösung des Adhäsivverbunds geführt haben könnten [11, 75, 133].

Die Gesamterfolgsrate dieser Langzeitstudie zeigt, dass das Bulk-Fill-Material QuiXfil (76,9 %) und das Hybridkomposit Tetric Ceram (86,7 %) im Seitenzahnbereich ohne signifikante Unterschiede recht gut abschneiden (Tabelle 5). Beide Materialien zeigten über einen Zeitraum von 10 Jahren klinisch akzeptable Leistungen, wobei große Restaurationen unabhängig vom Material signifikant häufiger versagten als kleine ($p = 0,025$). Bei größeren Kavitäten der Klasse II (drei und mehr Oberflächen) lag die jährliche Versagensrate (AFR – annual failure rate) bei 3 % für QuiXfil und 4 % für Tetric Ceram, während die AFR bei allen Kavitäten der Klasse II bei 2,5 % für QuiXfil und 1,6 % für Tetric Ceram lag (Tabelle 5).

In der Originalarbeit „Bulk-fill composites compared to a nanohybrid composite in class II cavities – a two year follow-up study“ konnte nach einem mittleren Nachbeobachtungszeitraum von zwei Jahren ebenfalls festgestellt werden, dass die Ergebnisse der getesteten Bulk-Fill-Kompositen mit denen von klassischen Nanohybrid-Kompositen vergleichbar sind (2.2.4 Originalarbeit).

In der Studie wurden verschiedene Konzepte für direkte Kompositrestaurationen miteinander verglichen. Wir untersuchten: (1.) die Kombination eines niedrigviskösen Bulk-Fill-Komposits mit einer hochviskösen Bulk-Fill-Deckschicht (SDR / Tetric EvoCeram Bulk Fill), (2.) ein hochvisköses Bulk-Fill-Komposit als alleiniges Füllungsmaterial (Tetric EvoCeram Bulk Fill), welches nach den Vorgaben des Herstellers mit einer Schichtdicke von 4 mm aufgetragen wurde, (3.) das hochvisköses Bulk-Fill-Komposit als alleiniges Füllungsmaterial (Tetric EvoCeram Bulk Fill), das wie ein konventionelles Komposit mit maximal 2 mm aufgetragen wurde und (4.) ein Nanohybrid-Komposit (Tetric EvoCeram) als Referenzmaterial.

Bei der 12-monatigen Nachuntersuchung wurden 7 Füllungen (4,5 %) als Misserfolg eingestuft, und zwar aufgrund von 5 Zähnen mit pulpitischen Symptomen (was zu 4 Wurzelbehandlungen und 1 Extraktion führte) und 2 verlorenen Füllungen (beide Füllungen gingen bei demselben Patienten verloren). Bei der 24-monatigen Nachuntersuchung wurde ein weiterer Misserfolg aufgrund eines pulpitischen Zahns (der eine Wurzelbehandlung erforderte) beobachtet, was zu insgesamt 8 Misserfolgen (5,4 %) führte.

Alle Pulpitiden traten in den Bulk-Fill-Gruppen mit 4 mm Schichtstärke auf (n=3 SDR / Tetric EvoCeram Bulk Fill; n=3 Tetric EvoCeram Bulk Fill). Bis heute ist die Polymerisationsschrumpfung eine Schwachstelle von Kompositen auf Kunststoffbasis. Sie kann zur Ablösung von den Kavitätenwänden, zur Bildung von Grenzflächenspalten und zu Mikroleckagen führen. Es kann zu klinisch verfärbten Restaurationsrändern, rezidivierender Karies, Schmelzrissen und sogar zu postoperativen Überempfindlichkeiten kommen [53, 108, 194, 212, 213].

Kaisarly et al. wiesen in einer In-vitro-Studie nach, dass die Art der Applikation von Bulk-Fill-Kompositen die Polymerisationsschrumpfung beeinflusst. Sie verglichen SDR, das in einer Schichtdicke von 4 mm aufgetragen wurde, mit SDR und Tetric EvoFlow, das in einer Schichtdicke von 2 mm aufgetragen wurde. Sie fanden heraus, dass die 4 mm Technik zu größeren Werten der Schrumpfungsvektoren und einer höheren Tendenz zur Ablösung am Kavitätenboden führte [104]. In Bezug auf die Ergebnisse von Kaisarly et al. könnte die erhöhte Polymerisationsschrumpfung in den von uns untersuchten 4-mm-Gruppen zu einem Debonding an der Grenzfläche zwischen Restauration und Zahn geführt haben, was zu einer erhöhten Hypersensitivität geführt haben könnte.

Allerdings waren in unserer Studie aber auch die mit dem Bulk-Fill SDR und Tetric EvoCeram Bulk Fil gefüllten Kavitäten signifikant tiefer als die Kavitäten der Kontrollgruppe. Diese

Kavitäten waren im okklusalen Bereich 0,5 mm und im approximalen Kasten 1 mm tiefer. Ausgehend von den anatomischen Standardwerten eines Molaren von ca. 2 mm Schmelz und 2,5 – 3 mm Dentin ist jedoch eine mittlere Kavitätentiefe im okklusalen Bereich von $3,0 \pm 0,7$ mm als tiefe Kavität zu betrachten. Somit könnten Hypersensibilitäten aufgrund der Reizung der Pulpa aufgetreten sein, unabhängig vom verwendeten Material. Es wäre jedoch schwer zu erklären, warum die Hypersensibilität nicht unmittelbar nach der Präparation, sondern erst später bei der Nachuntersuchung auftrat. Es scheint daher wahrscheinlicher, dass die Hypersensibilität im Laufe der Zeit durch höhere Spannungen aufgrund der Polymerisationsschrumpfung und des Debonding dickerer Kompositsschichten verursacht wurde.

Auch das verwendete Dentinadhäsiv ist in Bezug auf die entstandenen postoperativen Hypersensibilitäten zu betrachten. In der vorliegenden Studie wurde das Universaladhäsiv AdheSE Universal für alle Materialgruppen im „self-etch“-Verfahren appliziert, d.h. eine Vorbehandlung der Zahnhartsubstanz mit Phosphorsäure fand nicht statt. Die aktuelle Studienlage hierzu zeigt, dass bei Verwendung von Universaladhäsiven eine selektive Vorbehandlung des Schmelzes („selective-etch“-Verfahren) dessen Haftwerte verbessern kann [164, 191, 198]. Weitere klinische Studien zeigten hingegen auch, dass das angewandte Adhäsivsystem keine Auswirkung auf die postoperative Hypersensibilität hat [34, 182, 204]. Somit kann kein kausaler Zusammenhang zwischen den in der vorliegenden Studie aufgetretenen Hypersensibilitäten und dem verwendeten Dentinadhäsiv hergestellt werden.

Beim Bulk-Fill Material Tetric EvoCeram Bulk Fil versagte jeweils in der 2-mm-Inkrementgruppe sowie der 4-mm-Bulkgruppe eine Füllung durch Retentionsverlust - allerdings bei demselben Patienten. Da die Füllungen kurz nach dem Legen der Füllung verloren gingen und kein Materialbruch beobachtet wurde, können eher Handhabungsprobleme bei der Anwendung (Kontamination mit Blut oder Speichel) als eine Schwäche des Materials vermutet werden.

Die mit dem Bulk-Fill SDR / Tetric EvoCeram Bulk Fil gefüllten Kavitäten erzielten schlechtere Ergebnisse für "ästhetische anatomische Form" und "Materialbruch und Retention" (FDI-Score 4). Die schlechteren Ergebnisse könnten damit zu erklären sein, dass die Überkappungsschicht mit Tetric EvoCeram Bulk Fil den niedrigen Elastizitätsmodul der darunter liegenden SDR-Füllung nicht kompensieren kann. Da die Überkappungsschicht mit nur 2 mm relativ dünn am Zahn befestigt ist, können die Mikrorisse bei starken Kaukräften

sogar zu einem Bruch der gesamten Füllung führen (FDI-Score 4 "Ästhetische anatomische Form" und "Material- und Retentionsbruch" - erforderte eine Reparatur der Füllungen) [192].

Die Kaplan-Meier-Analyse zeigte keinen signifikanten Unterschied für das Überleben der unterschiedlichen Füllungsmaterialien bzw. Füllungskonzepte. Dies stimmt mit anderen Untersuchungen zu Bulk-Fill und konventionellen Kompositen überein, die ebenfalls keinen signifikanten Unterschied in der klinischen Leistung finden konnten [6, 16, 33, 134, 219]. Die AFR verbesserte sich von 4,5 % nach 12 Monaten auf 2,7 % nach 24 Monaten für alle Materialien. Der häufigste Grund für das Versagen waren pulpitische Symptome, die im ersten Nachuntersuchungszeitraum bis 12 Monate bei den Bulk-Fill-Gruppen mit 4 mm auftraten. Das Referenzmaterial war das einzige Material, das während der gesamten Nachbeobachtungszeit keine Ausfälle aufwies. Die Gesamterfolgsrate für die Kontrollgruppe lag somit bei 100 %, während das Bulk-Fill Tetric EvoCeram Bulk in 2 mm Applikationsstärke eine Überlebensrate von 97,2 % erreichte und mit 4 mm noch eine Überlebensrate von 88,9 %. Das niedrigvisköse Bulk-Fill mit der Abdeckschicht eines hochviskösen Bulk-Fill (SDR / Tetric EvoCeram Bulk Fil) erreichte eine Überlebensrate von 97,2 % nach 2 Jahren (Tabelle 5). In einer Studie von van Dijken et al. zeigte SDR ebenfalls eine gute Beständigkeit im Fünfjahres-Recall von 93,0 % und nach 6 Jahren von 93,9 % [206, 207]. Tetric EvoCeram Bulk Fil zeigte in einer Studie von Yazici et al. nach 3 und 6 Jahren eine vergleichbare klinische Leistung zu einem konventionellen Nanofüllerkomposit (Filtek Ultimate, 3M ESPE). Nach 3 Jahren wurde keine Restauration als Misserfolg eingestuft, nach 6 Jahren erreichte die Kontrollgruppe weiterhin eine Erfolgsrate von 100 % und Tetric EvoCeram Bulk Fill eine Überlebensrate von 97,1 % [218, 219].

Sowohl Bulk-Fill-Komposite als auch konventionelle Komposite eignen sich für die Restauration von Kavitäten im Seitenzahnbereich. Weitere Langzeitstudien zu verschiedenen Materialien sind allerdings für eine bessere Evidenz notwendig.

4 Zusammenfassung

Kontinuierliche Forschung und Fortschritte in der Diagnostik von Karies als auch der restaurativen Zahnheilkunde eröffnen gegenwärtig immer neue Wege, um Karies in einem früheren Stadium zu detektieren und zu überwachen sowie Zahnhartsubstanz bei einer notwendigen restaurativen Therapie zu schonen. Allerdings stellt die Detektion der Approximalkaries im Frühstadium sowie die von versteckter okklusaler Karies den Behandler weiterhin vor Herausforderungen, da die im klinischen Alltag etablierten Methoden, die visuelle Inspektion und die Bissflügelröntgenaufnahme, für diese Indikation nur schwache diagnostische Sensitivitätswerte liefern [110, 114, 159, 162, 168, 180, 215].

Die vorliegende Habilitationsschrift beschäftigt sich daher im ersten Teil mit dem Thema neuartiger Kariesdiagnostikmethoden zur Detektion von früher Approximalkaries sowie versteckter okklusaler Dentinkaries.

Im Rahmen der ersten In-vitro-Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die aktuelle Entwicklung der digitalen Röntgensensoren von der CCD-Sensor-Technologie hin zur CMOS-Technologie zwar subjektiv kontrastreichere Bilder liefert, aber kein signifikanter Unterschied der diagnostischen Leistung für die proximale Schmelzkariesdetektion zwischen den verschiedenen Sensoren und Belichtungszeiten besteht. Allerdings wurde bei allen Methoden nur eine geringe Sensitivität erreicht. Insbesondere die Schmelzkariesdiagnostik erreichte sehr niedrige Werte. Die digitale Bissflügelröntgenaufnahme ist daher, unabhängig von der verwendeten Sensortechnologie, noch nicht zur zuverlässigen Erkennung früher approximaler Schmelzkaries geeignet, zeigt aber dennoch das Potenzial, gesunde Approximalflächen mit hohen Spezifitätswerten zu identifizieren.

Alternative, nicht-ionisierende zusätzliche Detektionsmethoden zur Diagnose von kariösen Läsionen werden seit Jahren entwickelt und bereits in der klinischen Praxis eingesetzt. Die aktuellsten Entwicklungen beruhen auf nahinfrarotem Licht und nutzen das physikalische Prinzip der Transillumination sowie Reflexion. Allerdings gab es bisher nur wenige Daten zur Validität und Reliabilität dieser neuen Methoden (Tabelle 1 bis Tabelle 4).

In unseren In-vitro- und In-vivo-Studien zur approximalen Kariesdiagnostik mit Nahinfrarot-Transillumination konnten wir zeigen, dass diese im Vergleich zur Bissflügelröntgenaufnahme besser in der Lage ist, frühe proximale kariöse Läsionen im Schmelz zu erkennen. Die Empfindlichkeit von NIRT für Dentinkaries ist ebenfalls hoch, allerdings kann in den meisten

Fällen nur die Dentinbeteiligung, nicht aber die Läsionstiefe im Dentin bestimmt werden. Für eine genaue Bestimmung der Läsionstiefe im Dentin ist weiterhin eine Röntgendiagnostik erforderlich. Die Zuverlässigkeit der NIRT ist *in vitro* und auch *in vivo* sehr hoch, was sie zu einer geeigneten Methode für die approximale, nicht kavitierte, Kariesdiagnostik mit guter Sensitivität und Spezifität im klinischen Alltag befähigt.

Aber auch für die Okklusalkariesdiagnostik scheint die Nahinfrarot-Transillumination Potential zu haben. Unsere *In-vitro*-Untersuchung zeigte zwar nur geringe Sensitivitätswerte für die Erkennung von Schmelzkaries, aber hohe Sensitivitätswerte bei der Erkennung von Dentinläsionen. Für Dentinkaries zeigte die Sensitivität bessere Werte als die visuelle Diagnostik und die Bissflügelröntgenaufnahme. Dies bestätigt auch unsere *In-vivo*-Studie, die ebenfalls die höchsten Sensitivitätswerte für NIRT bei der Dentinkariesdiagnostik im Vergleich zu den anderen untersuchten Methoden zeigte, allerdings gepaart mit niedrigeren Spezifitätswerten. NIRT kann daher nicht für den alleinigen Nachweis von Okklusalkaries empfohlen werden, sondern nur als Ergänzung zur visuellen Untersuchung, insbesondere zur Erkennung von versteckter Dentinkaries. Da die NIRT bereits in der klinischen Praxis als geeignete Methode für die Erkennung von Approximalkaries eingesetzt wird, sollten beim Einsatz der NIRT zur Kariesdetektion nicht nur die interdentalen, sondern auch die okklusalen Flächen untersucht werden, um alle möglichen Informationen zu sammeln und Zufallsbefunde wie okklusal versteckte Karies zu erkennen.

Die Nahinfrarot-Reflexion ist die neueste Methode zur Kariesdiagnostik und wurde von uns in *In-vitro*-Untersuchungen zur Approximalkariesdiagnostik validiert. Die NIRR, mit den auf dem Markt befindlichen Geräten mit 850 nm sowie im Laboraufbau mit 780 nm, erreichte in unseren Untersuchungen nur geringe Sensitivitätswerte für die Detektion von approximaler Schmelzkaries. Der Ansatz, die NIRR aus verschiedenen Blickwinkeln zu kombinieren (trilateral) erhöhte die Genauigkeit der Kariesdetektion, allerdings mit sinkender Spezifität. Die NIRR zeigte insgesamt vergleichbare Ergebnisse zur Bissflügelröntgenaufnahme bei der Erkennung von früher Approximalkaries. Bissflügelröntgen unterschätzte eher Karies, während NIRR diese mit einem hohen Anteil ebenfalls unterschätzte aber auch überschätzte. Aufgrund optischer Prinzipien hat die NIRR mit Wellenlängen bis 850 nm allerdings kein hohes Potenzial für die Erkennung von Approximalkaries. Dies gilt insbesondere für beginnende Läsionen, die sich unter optischen Artefakten im Bereich der Randleiste befinden. Fortgeschrittene Läsionen sind hingegen leichter zu erkennen. Die Verwendung höherer Wellenlängen könnte das diagnostische Potenzial der NIRR allerdings verbessern.

Die restaurative Versorgung von fortgeschrittenen kariösen Läsionen hat sich ebenfalls weiterentwickelt. Der forcierte Ersatz von Amalgam, welches sich als langlebiges und günstiges direktes Restaurationsmaterial im Seitenzahnbereich bewährt hat, führte zur Entwicklung neuer Materialien und Restaurationskonzepte [181]. Das mittlerweile etablierte Kompositmaterial hat jedoch den Nachteil der teuren, zeitaufwendigen und techniksensitiven Anwendung [135]. Daher wurden Bulk-Fill-Komposite aber auch hochvisköse Glasionomerezemente entwickelt, die diese Nachteile kompensieren sollen [123, 124, 135, 136].

Im zweiten Teil dieser Habilitationsschrift wurden daher diese neuen Restaurationsmaterialien und -konzepte klinisch sowie in vitro untersucht.

Unsere Untersuchung zum Langzeitüberleben von neuen hochviskösen Glasionomerezementen mit Coating in Klasse II Kavitäten zeigen, dass diese eine Alternative zu anderen direkten Materialien darstellen. Nach 3 Jahren versagten 10,7 %, nach 6 Jahren insgesamt 18,2 % der Restaurationen. Dies resultiert in einem Gesamtüberleben von 81,8 % und einer jährlichen Ausfallrate von 3 % nach 6 Jahren. Hauptgründe für das Versagen der Restaurationen waren Frakturen, die nicht reparabel waren. Ursächlich hierfür könnten die Verwendung unbeschichteter Metallmatrizen, an denen der Glasionomerezement ebenfalls chemisch haften kann, aber auch Handhabungsprobleme bei der Applikation des Materials gewesen sein. Inzwischen wurde das Material zu einem Glashybrid weiterentwickelt, was zu einer besseren Handhabung des Materials mit verbesserter Verdichtbarkeit und geringerer Klebrigkeit sowie zu einer erhöhten Biegefestigkeit und Säurestabilität führt. Daher sollte in weiteren Studien geklärt werden, ob diese Weiterentwicklung zu einer Reduktion der Misserfolge und einer höheren Langzeitüberlebensrate im klinischen Einsatz führt.

Bulk-Fill-Komposite zeigten in unseren Untersuchungen ebenfalls ein hohes Langzeitüberleben. So konnte eines der ersten auf dem Markt befindlichen Bulk-Fill-Materialien eine Überlebensrate von 76,9 % nach 10 Jahren erreichen, was einer jährlichen Ausfallrate von 2,5 % entspricht. Das Vergleichsmaterial, welches aus einem konventionellem Komposit bestand, zeigte ein ähnliches Überleben (86,7 %, AFR 1,60) und unterschied sich nicht signifikant zu dem Bulk-Fill. Sekundärkaries war der Hauptgrund für das Versagen von Restaurationen in dieser Studie, dies könnte aber auch mit der Wirksamkeit der Bondingsysteme zusammenhängen. Weiterhin verglichen wir über einen mittleren Nachbeobachtungszeitraum von zwei Jahren verschiedene Konzepte und Materialien für direkte Kompositrestaurationen miteinander. Die Gesamterfolgsrate für die Kontrollgruppe lag bei 100 %, während das Bulk-Fill Tetric EvoCeram Bulk in 2 mm Applikationsstärke eine

Überlebensrate von 97,2 % erreichte und mit 4 mm noch eine Überlebensrate von 88,9 %. Das niedrigvisköse Bulk-Fill mit der Abdeckschicht eines hochviskösen Bulk-Fill (SDR / Tetric EvoCeram Bulk Fil) erreichte eine Überlebensrate von 97,2 % nach 2 Jahren. Es konnte hierbei kein signifikanter Unterschied für das Überleben der unterschiedlichen Füllungsmaterialien bzw. Füllungskonzepte gefunden werden. Hauptgrund für das Versagen in der Studie waren Pulpitiden, welche allerdings nur in den 4-mm-Bulk-Fill-Gruppen auftraten. Die Kavitätentiefen in dieser Gruppe waren aber auch tiefer, als in der 2-mm-Inkrement-Gruppe, was möglicherweise einen Einfluss gehabt haben könnte.

Bulk-Fill-Komposite sowie hochvisköse Glasionomerezemente zeigten insgesamt in den von uns durchgeführten klinischen Studien eine gute Überlebensrate und kommen daher als Restaurationsmaterial für Klasse II Kavitäten in Frage (Tabelle 5). Für große Klasse II Restaurationen gibt es allerdings Einschränkungen für die Empfehlung von Glasionomerezementen.

5 Tabellen

Tabelle 1: Übersicht *Sensitivität (SN)* und *Spezifität (SP)* der im Rahmen dieser Habilitation (*) durchgeführten Studien zu Bissflügelröntgen, NIRT und NIRR sowie in der Literatur berichtete Werte zu NIRT und NIRR für *Approximalkaries*.

Jahr	Studie	Studientyp	Validierung	Diagnostische Methode	Gerät	Läsion	SN	SP
2021	Heck et al. [78] *	In vitro	μ CT	BF	Intraoral II CCD	Karies	0,27	1,00
						Schmelzkaries	0,09	0,94
						Dentinkaries	0,16	1,00
					Xios XG 0,08 s	Karies	0,38	0,98
						Schmelzkaries	0,15	0,94
						Dentinkaries	0,36	0,99
					Xios XG 0,12 s	Karies	0,26	0,99
						Schmelzkaries	0,06	0,94
						Dentinkaries	0,16	0,99
2021	Litzenburger et al. [126] *	In vitro	μ CT	NIRR	ITero Element 5D	Karies	0,33	0,84
				NIRR (trilateral)	ITero Element 5D	Karies	0,47	0,75
				BF	Intraoral II CCD	Karies	0,27	1,00
2021	Ahrari et al. [5]	In vivo	Visuell (nach Separation)	NIRR	Vistacam iX	Karies	0,89	0,15
				LF	Diagnodent Pen	Karies	0,44	0,62
2021	Heck et al. [77] *	In vitro	μ CT	NIRR	780 nm Laboraufbau	Karies	0,29	0,84
				NIRR (trilateral)	780 nm Laboraufbau	Karies	0,63	0,70
				BF	Intraoral II CCD	Karies	0,27	1,00
2020	Kocak et al. [110]	In vivo	Hybrid visuell / BF / invasiv	BF	Proscanner Planmeca	Karies	0,96	0,77
						Schmelzkaries	0,96	0,00
						Dentinkaries	0,97	0,00
				LF	Diagnodent Pen	Karies	0,38	0,66
						Schmelzkaries	0,37	0,00
						Dentinkaries	0,41	0,00
				NIRT	Diagnocam	Karies	0,77	0,33
						Schmelzkaries	0,86	0,00
						Dentinkaries	0,57	0,00

5 Tabellen

Jahr	Studie	Studientyp	Validierung	Diagnostische Methode	Gerät	Läsion	SN	SP
2019	Lederer et al. [118] *	In vitro	μ CT	NIRT	Diagnocam	Karies	0,80	0,95
						Schmelzkaries	0,59	0,94
						Dentinkaries	0,82	0,98
				BF	Intraoral II CCD	Karies	0,59	0,98
						Schmelzkaries	0,36	0,91
						Dentinkaries	0,41	0,99
2019	Lederer et al. [119] *	In vitro	μ CT	NIRR	VistaCam iX	Karies	0,50	0,98
						Schmelzkaries	0,13	0,95
						Dentinkaries	0,55	0,98
				BF	Intraoral II CCD	Karies	0,53	0,97
						Schmelzkaries	0,31	0,94
						Dentinkaries	0,55	1,00
2019	Tonkaboni et al. [197]	In vitro	Histologie	VI	ICDAS	Karies	0,49	0,99
						Schmelzkaries	0,38	0,99
						Dentinkaries	0,51	0,99
				BF	Insight Kodak	Karies	0,53	1,00
						Schmelzkaries	0,38	1,00
						Dentinkaries	0,56	1,00
				NIRR	Vistacam iX	Karies	0,63	0,96
						Schmelzkaries	0,69	0,96
						Dentinkaries	0,62	0,96
2018	Lederer et al. [120]	In vitro	μ CT	NIRT	Diagnocam	Karies	0,79	0,94
						Schmelzkaries	0,57	0,93
						Dentinkaries	0,82	0,98
				NIRT	780 nm Laboraufbau mit HDR	Karies	0,79	0,96
						Schmelzkaries	0,62	0,92
						Dentinkaries	0,71	0,99
2017	Abogazalah et al. [4]	In vitro	μ CT	BF	Schick 33 CDR	Karies	0,50	0,64
				NIRT	Carivu	Karies	0,68	0,93
2017	Ozkan et al. [152]	In vivo	Klinisch invasiv	BF	Vistascan Mini Easy	Karies	0,83	0,60
				LF	LF Pen	Karies	0,60	0,20
				NIRT	Diagnocam	Karies	0,82	0,20
2017	Jablonski-Momeni et al. [100]	In vivo	BF	NIRR	Vistacam iX	Schmelzkaries	0,50	n. b.

5 Tabellen

Jahr	Studie	Studientyp	Validierung	Diagnostische Methode	Gerät	Läsion	SN	SP
2016	Russotto et al. [173]	In vivo	Hybrid visuell / BF / NIRT	NIRT	Diagnocam	Karies	0,46	0,98
						Schmelzkaries D1	0,31	n. b.
						Schmelzkaries D2	0,57	n. b.
						Dentinkaries D3/D4	0,52	n. b.
				BF	n. b.	Karies	0,59	0,93
						Schmelzkaries D1	0,44	n. b.
						Schmelzkaries D2	0,56	n. b.
						Dentinkaries D3/D4	0,81	n. b.
2016	Kühnisch et al. [115]	In vivo	Hybrid visuell / BF / NIRT	NIRT	Diagnocam	Karies	0,99	n. b.
				BF	Intraoral II CC	Karies	0,96	n. b.

Tabelle 2: Übersicht *Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit* der im Rahmen dieser Habilitation (*) durchgeführten Studien zu Bissflügelröntgen, NIRT und NIRR sowie in der Literatur berichtete Werte zu NIRT und NIRR für *Approximalkaries*.

Jahr	Studie	Studientyp	Diagnostische Methode	Gerät	Läsion	Inter-Untersucher	Intra-Untersucher
2021	Heck et al. [78] *	In vitro	BF	Intraoral II CCD	Karies	0,85	0,90 / 0,91
				Xios XG 0,08 s	Karies	0,96	0,95 / 0,98
				Xios XG 0,12 s	Karies	0,96	0,95 / 0,96
2021	Litzenburger et al. [126] *	In vitro	NIRR	ITero Element 5D	Karies	0,97	0,82 / 0,76
			NIRR (trilateral)	ITero Element 5D	Karies	0,96	0,69 / 0,65
			BF	Intraoral II CCD	Karies	0,85	0,90 / 0,91
2021	Heck et al. [77] *	In vitro	NIRR	780 nm Laboraufbau	Karies	0,95	0,78 / 0,74
			NIRR (trilateral)	780 nm Laboraufbau	Karies	0,95	0,75 / 0,76
			BF	Intraoral II CCD	Karies	0,85	0,90 / 0,91
2020	Kocak et al. [110]	In vivo	BF	Proscanner Planmeca	Karies	0,91	0,86 / 0,86
			LF	Diagnodent Pen	Karies	0,62	0,92 / 0,88
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,80	0,84 / 0,85
2019	Lederer et al. [118] *	In vitro	NIRT	Diagnocam	Karies	0,90	0,96 / 0,92
			BF	Intraoral II CCD	Karies	0,87	0,87 / 0,73
2019	Lederer et al. [119] *	In vitro	NIRR	VistaCam iX	Karies	0,89	0,84 / 0,88
			BF	Intraoral II CCD	Karies	0,93	0,89 / 0,80
2018	Lederer et al. [120]	In vitro	NIRT	Diagnocam	Karies	0,90	0,96 / 0,91
			NIRT	780 nm Laboraufbau mit HDR	Karies	0,96	0,90 / 0,93
2018	Litzenburger et al. [127] *	In vivo	BF	Intraoral II CCD	Karies	0,77	0,74 / 0,76
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,84	0,86 / 0,82

5 Tabellen

Jahr	Studie	Studientyp	Diagnostische Methode	Gerät	Läsion	Inter-Untersucher	Intra-Untersucher
2018	Abdelaziz et al. [2]	In vivo	BF	CS 7600 Carestream	Karies	0,91	n. b.
					Schmelzkaries	0,78	n. b.
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,90	n. b.
					Schmelzkaries	0,89	n. b.
2017	Abogazalah et al. [4]	In vitro	BF	Schick 33 CDR	Karies	0,86	0,86
			NIRT	Carivu	Karies	0,71	0,71
2018	Berg et al. [23]	In vivo	BF	RVG Kodak	Karies	0,98	n. b.
			NIRT	CariVu	Karies	0,87	n. b.
2017	Ozkan et al. [152]	In vivo	BF	Vistascan Mini Easy	Karies	0,35	0,38 / 0,63
			LF	LF Pen	Karies	0,52	0,62 / 0,55
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,44	0,66 / 0,65
2017	Baltacioglu et al. [18]	In vivo	BF	Digore Optime	Karies	0,67	0,65 / 0,55
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,75	0,79 / 0,88
2016	Kühnisch et al. [115]	In vivo	BF	Intraoral II CCD	Karies	0,74	0,81 / 0,81
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,81	0,91 / 0,85

Tabelle 3: Übersicht *Sensitivität (SN) und Spezifität (SP)* der im Rahmen dieser Habilitation (*) durchgeführten Studien zu Bissflügelröntgen, NIRT und NIRR sowie in der Literatur berichtete Werte zu NIRT und NIRR für *Okklusalkaries*.

Jahr	Studie	Studientyp	Validierung	Diagnostische Methode	Gerät	Läsion	SN	SP
2021	Litzenburger et al. [129] *	In vivo	Hybrid	VI	-	Karies	0,94	1,00
						Schmelzkaries	1,00	0,61
						Dentinkaries	0,00	1,00
				BF	Intraoral II CCD	Karies	0,44	1,00
						Schmelzkaries	0,00	1,00
						Dentinkaries	0,70	1,00
				NIRT	Diagnocam	Karis	1,00	0,27
						Schmelzkaries	0,21	0,65
						Dentinkaries	0,97	0,67
				LF	Diagnodent Pen	Karies	0,77	1,00
						Schmelzkaries	0,11	0,95
						Dentinkaries	0,76	0,86
				ACIS	CarieScan Pro	Karies	0,75	0,98
						Schmelzkaries	0,37	0,88
						Dentinkaries	0,64	0,95
				VI / BF	- / Intraoral II CCD	Karies	1,00	1,00
						Schmelzkaries	1,00	0,87
						Dentinkaries	0,70	1,00
				VI / NIRT	- / Diagnocam	Karies	1,00	0,27
						Schmelzkaries	0,21	0,65
						Dentinkaries	0,97	0,67
				VI / LF	- / Diagnodent Pen	Karies	0,96	1,00
						Schmelzkaries	0,53	0,92
						Dentinkaries	0,76	0,86
				VI / ACIS	- / CarieScan Pro	Karies	0,98	0,98
						Schmelzkaries	0,84	0,84
						Dentinkaries	0,64	0,95

5 Tabellen

Jahr	Studie	Studientyp	Validierung	Diagnostische Methode	Gerät	Läsion	SN	SP
2020	Litzenburger et al. [128] *	In vitro	μCT	BF	Intraoral II CCD	Karies	0,59	0,85
						Schmelzkaries	0,00	0,96
						Dentinkaries	0,69	0,90
				NIRT	Diagnocam	Karies	0,98	0,30
						Schmelzkaries	0,33	0,65
						Dentinkaries	0,78	0,72
2020	Tassoaker et al. [195]	In vivo	Histologie	ICDAS	-	Karies	0,86	0,85
				LF	Diagnodent	Karies	0,81	0,77
				NIRT	Diagnocam	Karies	0,94	0,69
		In vitro	Histologie	ICDAS	-	Karies	0,87	0,85
				LF	Diagnodent	Karies	0,92	0,77
				NIRT	Diagnocam	Karies	0,96	0,62

Tabelle 4: Übersicht *Inter- und Intra-Untersucher-Zuverlässigkeit* der im Rahmen dieser Habilitation (*) durchgeführten Studien zu Bissflügelröntgen, NIRT und NIRR sowie in der Literatur berichtete Werte zu NIRT und NIRR für *Okklusalkaries*.

Jahr	Studie	Studientyp	Diagnostische Methode	Gerät	Läsion	Inter-Untersucher	Intra-Untersucher
2021	Litzenburger et al. [129] *	In vitro	BF	Intraoral II CCD	Karies	0,89 / 0,88	0,93 / 0,92
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,84 / 0,94	0,75 / 0,84
2020	Litzenburger et al. [128] *	In vitro	ICDAS	-	Karies	0,92	0,91 / 0,85
			BF	Intraoral II CCD	Karies	0,77	0,80 / 0,85
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,72	0,76 / 0,78
2020	Tassoaker et al. [195]	In vivo / in vitro	NIRT	Diagnocam	Karies	n. b.	0,94
2018	Schäfer et al. [174]	In vivo	BF	Intraoral II CCD	Karies	0,75	0,78 / 0,81
			NIRT	Diagnocam	Karies	0,79	0,82 / 0,85

Tabelle 5: Zusammenstellung klinischer Studien zu hochviskösem GIZ mit Coating und Bulk-Fill-Kompositen in *Klasse-II-Kavitäten* und deren jeweiligen Überlebensraten sowie jährlichen Ausfallraten (AFR). Studien, die im Rahmen dieser Habilitation durchgeführt wurden, sind mit einem * markiert.

Jahr	Studie	Studien-design	Nachuntersuchungszeitraum (Jahre)	Materialgruppe	Material	Technik	Überlebensrate (%)	AFR (%)
2021	Hoffmann et al. [90] *	RCT	2	Bulk-Fill + Komposit	SDR flow + Tetric EvoCeram Bulk-Fill	Zwei Schritt Bulk	92,1	3,95
				Bulk-Fill	Tetric EvoCeram Bulk-Fill	Bulk	88,9	5,56
				Bulk-Fill	Tetric EvoCeram Bulk-Fill	Inkrement	97,2	1,39
				Komposit	Tetric EvoCeram	Inkrement	100	0,00
2021	Yazi et al [219]	RCT	6	Bulk-Fill	Tetric EvoCeram Bulk-Fill	Bulk	100	0,00
				Komposit	Filtek Ultimate	Inkrement	97,1	0,50
2020	Akman et al. [6]	RCT	1	GIZ	Equia Fil	Bulk	97,1	2,94
				Bulk-Fill	SonicFill	Bulk	100	0,00
				Bulk-Fill	X-tra fil	Bulk	100	0,00
				Komposit	Filtek Z550	Inkrement	100	0,00
2020	Balkaya et al. [16]	RCT	2	Komposit	Charisma Smart	Inkrement	100	0,00
				Bulk-Fill	Filtek Bulk-Fill Posterior	Bulk	100	0,00
				GIZ	Equia Forte Fil	Bulk	54,3	22,85
2020	Frascano et al. [59]	RCT	1	Komposit	Peak universal	Inkrement	n. b.	n. b.
				Bulk-Fill + Komposit	Filtek Bulk Fill Flow + Filtek Z350XT	Zwei Schritt Bulk	n. b.	n. b.
				Bulk-Fill + Komposit	SureFil SDR + TPH3	Zwei Schritt Bulk	n. b.	n. b.
2020	Heck et al. [76] *	RCT	6	GIZ	Equia Fil	Bulk	81,8	3,03
				GIZ	Fuji IX GP Fast	Bulk	81,8	3,03
2019	Balkaya et al. [17]	RCT	1	Komposit	Charisma Smart	Inkrement	100	0,00
				Bulk-Fill	Filtek Bulk-Fill Posterior	Bulk	100	0,00
				GIZ	Equia Forte Fil	Bulk	69,0	31,0
2019	Fotiadou et al. [56] *	RCT	3	GIZ	Equia Fil	Bulk	89,7	3,43
				GIZ	Fuji IX GP Fast	Bulk	88,0	4,00
2019	Gurgan et al. [72]	RCT	10	GIZ	Equia Fil	Bulk	100	0,00
				Komposit	Gradia Direct	Inkrement	100	0,00
2018	Heck et al. [79] *	RCT	10	Komposit	Tetric Ceram	Inkrement	86,7	1,60
				Bulk-Fill	QuiXfil	Bulk	76,9	2,50

5 Tabellen

Jahr	Studie	Studien- design	Nachunter- suchungs- zeitraum (Jahre)	Material- gruppe	Material	Technik	Über- lebens- rate (%)	AFR (%)
2017	Bayraktar et al. [20]	RCT	1	Komposit	Clearphil Phot Posterior	Inkrement	n. b.	n. b.
				Bulk-Fill + Komposit	Filtek Bulk Fill Flow + Filtek P60	Zwei Schritt Bulk	n. b.	n. b.
				Bulk-Fill	Tetric EvoCeram Bulk-Fill	Bulk	n. b.	n. b.
				Bulk-Fill	SonicFill	Bulk	n. b.	n. b.
2017	Colak et al. [33]	RCT	1	Komposit	Tetric EvoCeram	Inkrement	100	0,00
				Bulk_Fill	Tetric EvoCeram Bulk-Fill	Bulk	100	0,00
2017	Gurgan et al. [71]	RCT	6	GIZ	Equia Fil	Bulk	100	0,00
				Komposit	Gradia Direct	Inkrement	100	0,00
2017	van Dijken et al. [207]	RCT	6	Komposit	Ceram X mono	Inkrement	93,9	1,00
				Bulk-Fill + Komposit	SDR flow + Ceram X mono	Zwei Schritt Bulk	93,9	1,00
2017	Yazici et al. [218]	RCT	3	Komposit	Filtek Ultimate	Inkrement	100	0,00
				Bulk-Fill	Tetric EvoCeram Bulk-Fill	Bulk	100	0,00
2016	Turkun et al. [199]	RCT	6	GIZ	Equia Fil	Bulk	n. b.	n. b.
				GIZ	Riva self cure	Bulk	92,1	1,33
2016	van Dijken et al. [206]	RCT	5	Komposit	Ceram X mono	Imkremnet	89,5	2,10
				Bulk-Fill + Komposit	SDR flow + Ceram X mono	Zwei Schritt Bulk	93,0	1,40
2015	Basso et al. [19]	Einzel- gruppe	4	GIZ	Equia Fil	Bulk	90,0	2,50
2015	Gurgan et al. [70]	RCT	4	GIZ	Equia Fil	Bulk	92,3	1,93
				Komposit	Gradia Direct	Inkrement	10	0,00
2013	Klinke et al. [109]	RCT	4	GIZ	Equia Fil	Bulk	n. b.	n. b.
				GIZ	Fuji GP Fast	Bulk	n. b.	n. b.
2013	Mahmoud et al. [134]	RCT	3	Komposit	Filtek P90	Inkrement	94,9	1,70
				Bulk-Fill	QuiXfil	Bulk	96,2	1,23
2013	Miletic et al. [142]	Einzel- gruppe	1	GIZ	Equia Fil	Bulk	100	0,00
2011	Friedl et al. [65]	Einzel- gruppe	2	GIZ	Equia Fil	Bulk	92,8	3,60
2010	Arhun et al. [10]	RCT	2	Komposit	Grandio	Inkrement	n. b.	n. b.
				Bulk-Fill	QuiXfil	Bulk	n. b.	n. b.
2010	Manhart et al. [138]	RCT	4	Komposit	Tetric Ceram	Inkrement	97,8	0,55
				Bulk-Fill	QuiXfil	Bulk	89,2	2,70

5 Tabellen

Jahr	Studie	Studien- design	Nachunter- suchungs- zeitraum (Jahre)	Material- gruppe	Material	Technik	Über- lebens- rate (%)	AFR (%)
2009	Manhart et al. [137]	RCT	3	Komposit	Tetric Ceram	Inkrement	97,8	0,73
				Bulk-Fill	QuiXfil	Bulk	92,5	2,50
2008	Manhart et al. [139]	RCT	1,5	Komposit	Tetric Ceram	Inkrement	100	0,00
				Bulk-Fill	QuiXfil	Bulk	97,8	1,47

6 Literaturverzeichnis

1. Abdelaziz M and Krejci I (2015) DIAGNOcam--a Near Infrared Digital Imaging Transillumination (NIDIT) technology. *Int J Esthet Dent* 10 (1):158-65
2. Abdelaziz M, Krejci I, Perneger T, Feilzer A and Vazquez L (2018) Near infrared transillumination compared with radiography to detect and monitor proximal caries: A clinical retrospective study. *J Dent* 70:40-45. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.12.008>
3. Abdelaziz M, Rizzini AL, Bortolotto T, Rocca GT, Feilzer AJ, Garcia-Godoy F and Krejci I (2016) Comparing different enamel pretreatment options for resin-infiltration of natural non-cavitated carious lesions. *Am J Dent* 29 (1):3-9
4. Abogazalah N, Eckert GJ and Ando M (2017) In vitro performance of near infrared light transillumination at 780-nm and digital radiography for detection of non-cavitated approximal caries. *J Dent* 63:44-50. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2017.05.018>
5. Ahrari F, Akbari M, Mohammadi M, Fallahrastegar A and Najafi MN (2021) The validity of laser fluorescence (LF) and near-infrared reflection (NIRR) in detecting early proximal cavities. *Clin Oral Investig* 25 (8):4817-4824. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-03786-y>
6. Akman H and Tosun G (2020) Clinical evaluation of bulk-fill resins and glass ionomer restorative materials: A 1-year follow-up randomized clinical trial in children. *Niger J Clin Pract* 23 (4):489-497. https://doi.org/10.4103/njcp.njcp_519_19
7. Almaz EC, Simon JC, Fried D and Darling CL (2016) Influence of stains on lesion contrast in the pits and fissures of tooth occlusal surfaces from 800-1600-nm. Book title. International Society for Optics and Photonics,
8. Andersson-Wenckert IE, Folkesson UH and van Dijken JW (1997) Durability of a polyacid-modified composite resin (compomer) in primary molars. A multicenter study. *Acta Odontol Scand* 55 (4):255-60. <https://doi.org/10.3109/00016359709115424>
9. Arbildo-Vega HI, Lapinska B, Panda S, Lamas-Lara C, Khan AS and Lukomska-Szymanska M (2020) Clinical Effectiveness of Bulk-Fill and Conventional Resin Composite Restorations: Systematic Review and Meta-Analysis. *Polymers (Basel)* 12 (8):1786. <https://doi.org/10.3390/polym12081786>

10. Arhun N, Celik C and Yamanel K (2010) Clinical evaluation of resin-based composites in posterior restorations: two-year results. *Oper Dent* 35 (4):397-404.
<https://doi.org/10.2341/09-345-C>
11. Armstrong SR, Vargas MA, Chung I, Pashley DH, Campbell JA, Laffoon JE and Qian F (2004) Resin-dentin interfacial ultrastructure and microtensile dentin bond strength after five-year water storage. *Oper Dent* 29 (6):705-12
12. Astvaldsdottir A, Dagerhamn J, van Dijken JW, Naimi-Akbar A, Sandborgh-Englund G, Tranaeus S and Nilsson M (2015) Longevity of posterior resin composite restorations in adults - A systematic review. *J Dent* 43 (8):934-54.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2015.05.001>
13. Babayoff N, Glaser-Inbari I, inventors;, Cadent Ltd., Or Yehuda (IL) and assignee. Imaging a three-dimensional structure by confocal focussing an array of light beams. US patent US 6,697,164 B1. 2004 Feb 24
14. Baelum V (2010) What is an appropriate caries diagnosis? *Acta Odontol Scand* 68 (2):65-79. <https://doi.org/10.3109/00016350903530786>
15. Bagheri R, Azar MR, Tyas MJ and Burrow MF (2010) The effect of aging on the fracture toughness of esthetic restorative materials. *Am J Dent* 23 (3):142-6
16. Balkaya H and Arslan S (2020) A Two-year Clinical Comparison of Three Different Restorative Materials in Class II Cavities. *Oper Dent* 45 (1):E32-E42.
<https://doi.org/10.2341/19-078-C>
17. Balkaya H, Arslan S and Pala K (2019) A randomized, prospective clinical study evaluating effectiveness of a bulk-fill composite resin, a conventional composite resin and a reinforced glass ionomer in Class II cavities: one-year results. *Journal of applied oral science : revista FOB* 27:e20180678. <https://doi.org/10.1590/1678-7757-2018-0678>
18. Baltacioglu IH and Orhan K (2017) Comparison of diagnostic methods for early interproximal caries detection with near-infrared light transillumination: an in vivo study. *BMC Oral Health* 17 (1):130. <https://doi.org/10.1186/s12903-017-0421-2>

19. Basso M. BE, Benites M.G., Giovannardi M., Ionescu A.C. (2015) Glass ionomer cement for Permanent dental restorations: a 48-months, multi-centre, prospective clinical trial. *Stoma Edu J* 2 (1):25-35
20. Bayraktar Y, Ercan E, Hamidi MM and Colak H (2017) One-year clinical evaluation of different types of bulk-fill composites. *J Investig Clin Dent* 8 (2):e12210.
<https://doi.org/10.1111/jicd.12210>
21. Beck F, Lettner S, Graf A, Bitriol B, Dumitrescu N, Bauer P, Moritz A and Schedle A (2015) Survival of direct resin restorations in posterior teeth within a 19-year period (1996-2015): A meta-analysis of prospective studies. *Dent Mater* 31 (8):958-85.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.05.004>
22. Benson PE, Ali Shah A and Robert Willmot D (2008) Polarized versus nonpolarized digital images for the measurement of demineralization surrounding orthodontic brackets. *Angle Orthod* 78 (2):288-93. <https://doi.org/10.2319/121306-511.1>
23. Berg SC, Stahl JM, Lien W, Slack CM and Vandewalle KS (2018) A clinical study comparing digital radiography and near-infrared transillumination in caries detection. *J Esthet Restor Dent* 30 (1):39-44. <https://doi.org/10.1111/jerd.12346>
24. Boca C, Truyen B, Henin L, Schulte AG, Stachniss V, De Clerck N, Cornelis J and Bottenberg P (2017) Comparison of micro-CT imaging and histology for approximal caries detection. *Sci Rep* 7 (1):6680. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-06735-6>
25. Brullmann DD, Kempkes B, d'Hoedt B and Schulze R (2013) Contrast curves of five different intraoral X-ray sensors: a technical note. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol* 115 (6):e55-61. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2013.03.007>
26. Brunthaler A, König F, Lucas T, Sperr W and Schedle A (2003) Longevity of direct resin composite restorations in posterior teeth. *Clin Oral Investig* 7 (2):63-70.
<https://doi.org/10.1007/s00784-003-0206-7>
27. Bucuta S and Ilie N (2014) Light transmittance and micro-mechanical properties of bulk fill vs. conventional resin based composites. *Clin Oral Investig* 18 (8):1991-2000.
<https://doi.org/10.1007/s00784-013-1177-y>

28. Bühler CM, Ngaotheppitak P and Fried D (2005) Imaging of occlusal dental caries (decay) with near-IR light at 1310-nm. *Opt Express* 13 (2):573-582
29. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (2017) Strahlenschutzgesetz - StrlSchG. <https://www.gesetze-im-internet.de/strlschg/StrlSchG.pdf>. Accessed 2 Juni 2020
30. Burke FJ (2004) Amalgam to tooth-coloured materials--implications for clinical practice and dental education: governmental restrictions and amalgam-usage survey results. *J Dent* 32 (5):343-50. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2004.02.003>
31. Chan KH, Mai Y, Kim H, Tong KC, Ng D and Hsiao JC (2010) Review: Resin Composite Filling. *Materials* 3 (2):1228-1243. <https://doi.org/10.3390/ma3021228>
32. Chung S, Fried D, Staninec M and Darling CL (2011) Multispectral near-IR reflectance and transillumination imaging of teeth. *Biomed Opt Express* 2 (10):2804-14. <https://doi.org/10.1364/BOE.2.002804>
33. Colak H, Tokay U, Uzgur R, Hamidi MM and Ercan E (2017) A prospective, randomized, double-blind clinical trial of one nano-hybrid and one high-viscosity bulk-fill composite restorative systems in class II cavities: 12 months results. *Niger J Clin Pract* 20 (7):822-831. <https://doi.org/10.4103/1119-3077.212449>
34. Costa T, Rezende M, Sakamoto A, Bittencourt B, Dalzochio P, Loguercio AD and Reis A (2017) Influence of Adhesive Type and Placement Technique on Postoperative Sensitivity in Posterior Composite Restorations. *Oper Dent* 42 (2):143-154. <https://doi.org/10.2341/16-010-C>
35. da Mata C, Allen PF, McKenna G, Cronin M, O'Mahony D and Woods N (2015) Two-year survival of ART restorations placed in elderly patients: A randomised controlled clinical trial. *J Dent* 43 (4):405-11. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2015.01.003>
36. da Rosa Rodolpho PA, Cenci MS, Donassollo TA, Loguercio AD and Demarco FF (2006) A clinical evaluation of posterior composite restorations: 17-year findings. *J Dent* 34 (7):427-35. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2005.09.006>
37. Da Rosa Rodolpho PA, Donassollo TA, Cenci MS, Loguercio AD, Moraes RR, Bronkhorst EM, Opdam NJ and Demarco FF (2011) 22-Year clinical evaluation of the

performance of two posterior composites with different filler characteristics. *Dent Mater* 27 (10):955-63. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.06.001>

38. Darling CL, Huynh G and Fried D (2006) Light scattering properties of natural and artificially demineralized dental enamel at 1310 nm. *J Biomed Opt* 11 (3):034023

39. de Amorim RG, Leal SC and Frencken JE (2012) Survival of atraumatic restorative treatment (ART) sealants and restorations: a meta-analysis. *Clin Oral Investig* 16 (2):429-41. <https://doi.org/10.1007/s00784-011-0513-3>

40. Dehghani H, Eames ME, Yalavarthy PK, Davis SC, Srinivasan S, Carpenter CM, Pogue BW and Paulsen KD (2008) Near infrared optical tomography using NIRFAST: Algorithm for numerical model and image reconstruction. *Commun Numer Methods Eng* 25 (6):711-732. <https://doi.org/10.1002/cnm.1162>

41. Dehghani H, Pogue BW, Poplack SP and Paulsen KD (2003) Multiwavelength three-dimensional near-infrared tomography of the breast: initial simulation, phantom, and clinical results. *Appl Opt* 42 (1):135-45. <https://doi.org/10.1364/ao.42.000135>

42. Demarco FF, Correa MB, Cenci MS, Moraes RR and Opdam NJ (2012) Longevity of posterior composite restorations: not only a matter of materials. *Dent Mater* 28 (1):87-101. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.09.003>

43. Dentsply DeTrey (2003) Scientific Compendium: QuiXfil posterior restorative. <http://dentsplymea.com/sites/default/files/Scientific%20Compendium%20Quixfil.pdf>. Accessed 9 October 2018

44. Diem VT, Tyas MJ, Ngo HC, Phuong LH and Khanh ND (2014) The effect of a nano-filled resin coating on the 3-year clinical performance of a conventional high-viscosity glass-ionomer cement. *Clin Oral Investig* 18 (3):753-9. <https://doi.org/10.1007/s00784-013-1026-z>

45. Durao MA, Andrade AKM, Santos M, Montes M and Monteiro GQM (2021) Clinical Performance of Bulk-Fill Resin Composite Restorations Using the United States Public Health Service and Federation Dentaire Internationale Criteria: A 12-Month Randomized Clinical Trial. *Eur J Dent* 15 (2):179-192. <https://doi.org/10.1055/s-0040-1718639>

46. Eimar H, Marelli B, Nazhat SN, Abi Nader S, Amin WM, Torres J, de Albuquerque RF, Jr. and Tamimi F (2011) The role of enamel crystallography on tooth shade. *J Dent* 39 Suppl 3:e3-10. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2011.11.008>
47. Ekstrand KR, Gimenez T, Ferreira FR, Mendes FM and Braga MM (2018) The International Caries Detection and Assessment System - ICDAS: A Systematic Review. *Caries Res* 52 (5):406-419. <https://doi.org/10.1159/000486429>
48. El-Damanhoury H and Platt J (2014) Polymerization shrinkage stress kinetics and related properties of bulk-fill resin composites. *Oper Dent* 39 (4):374-82. <https://doi.org/10.2341/13-017-L>
49. Ersin NK, Candan U, Aykut A, Oncag O, Eronat C and Kose T (2006) A clinical evaluation of resin-based composite and glass ionomer cement restorations placed in primary teeth using the ART approach: results at 24 months. *J Am Dent Assoc* 137 (11):1529-36. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.2006.0087>
50. Espelid I and Tveit AB (1984) Radiographic diagnosis of mineral loss in approximal enamel. *Caries Res* 18 (2):141-8. <https://doi.org/10.1159/000260762>
51. European Union Commission (2004) Radiation Protection 136. European Guidelines on radiation protection in dental radiology. Book title.,
52. Everett MJ, Colston Jr BW, Sathyam US, Da Silva LB, Fried D and Featherstone JD (1999) Noninvasive diagnosis of early caries with polarization-sensitive optical coherence tomography (PS-OCT). Book title. International Society for Optics and Photonics,
53. Feilzer AJ, De Gee AJ and Davidson CL (1987) Setting stress in composite resin in relation to configuration of the restoration. *J Dent Res* 66 (11):1636-9. <https://doi.org/10.1177/00220345870660110601>
54. Ferracane JL (2013) Resin-based composite performance: are there some things we can't predict? *Dent Mater* 29 (1):51-8. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.06.013>
55. Forsten L (1991) Fluoride release and uptake by glass ionomers. *Scand J Dent Res* 99 (3):241-5. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0722.1991.tb01891.x>
56. Fotiadou C, Frasheri I, Reymus M, Diegritz C, Kessler A, Manhart J, Hickel R, Klinke T and Heck K (2019) Corrigendum: A 3-year controlled randomized clinical study on the

performance of two glass-ionomer cements in Class II cavities of permanent teeth.

Quintessence Int 51 (1):e1-e11. <https://doi.org/10.3290/j.qi.a43755>

57. Frankenberger R, Garcia-Godoy F and Krämer N (2009) Clinical Performance of Viscous Glass Ionomer Cement in Posterior Cavities over Two Years. Int J Dent 2009:781462. <https://doi.org/10.1155/2009/781462>

58. Frankenberger R, Krämer N, Lohbauer U, Nikolaenko SA and Reich SM (2007) Marginal integrity: is the clinical performance of bonded restorations predictable in vitro? J Adhes Dent 9 Suppl 1:107-16

59. Frascino S, Fagundes TC, Silva U, Rahal V, Barboza A, Santos PH and Briso A (2020) Randomized Prospective Clinical Trial of Class II Restorations Using Low-shrinkage Flowable Resin Composite. Oper Dent 45 (1):19-29. <https://doi.org/10.2341/18-230-C>

60. Fried D (2019) Near-Infrared Reflectance Imaging of Caries Lesions. In: Ferreira Zandona A and Longbottom C, editors. Detection and Assessment of Dental Caries. Switzerland: Springer; p. 189-197.

61. Fried D, Featherstone JD, Darling CL, Jones RS, Ngaotheppitak P and Buhler CM (2005) Early caries imaging and monitoring with near-infrared light. Dent Clin North Am 49 (4):771-93, vi. <https://doi.org/10.1016/j.cden.2005.05.008>

62. Fried D, Glens RE, Featherstone JD and Seka W (1995) Nature of light scattering in dental enamel and dentin at visible and near-infrared wavelengths. Appl Opt 34 (7):1278-85. <https://doi.org/10.1364/AO.34.001278>

63. Fried D and Jones R (2006) Near-infrared transillumination for the imaging of early dental decay. US patent 20060223032. (11/347637)

64. Fried D, Xie J, Shafi S, Featherstone JD, Breunig TM and Le C (2002) Imaging caries lesions and lesion progression with polarization sensitive optical coherence tomography. J Biomed Opt 7 (4):618-27. <https://doi.org/10.1117/1.1509752>

65. Friedl K, Hiller KA and Friedl KH (2011) Clinical performance of a new glass ionomer based restoration system: a retrospective cohort study. Dent Mater 27 (10):1031-7. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2011.07.004>

66. Gao W, Peng D, Smales RJ and Yip KH (2003) Comparison of atraumatic restorative treatment and conventional restorative procedures in a hospital clinic: evaluation after 30 months. *Quintessence Int* 34 (1):31-7
67. Gomez J, Tellez M, Pretty IA, Ellwood RP and Ismail AI (2013) Non-cavitated carious lesions detection methods: a systematic review. *Community Dent Oral Epidemiol* 41 (1):54-66. <https://doi.org/10.1111/cdoe.12021>
68. Guney T and Yazici AR (2020) 24-Month Clinical Evaluation of Different Bulk-Fill Restorative Resins in Class II Restorations. *Oper Dent* 45 (2):123-133. <https://doi.org/10.2341/18-144-C>
69. Gurgan S, Firat E and Kutuk Z (2013) Two-year study on the clinical performance of the glass ionomer-based restorative system EQUIA. *J Minim Intervent Dent* 6 (6):81-86
70. Gurgan S, Kutuk ZB, Ergin E, Oztas SS and Cakir FY (2015) Four-year randomized clinical trial to evaluate the clinical performance of a glass ionomer restorative system. *Oper Dent* 40 (2):134-43. <https://doi.org/10.2341/13-239-C>
71. Gurgan S, Kutuk ZB, Ergin E, Oztas SS and Cakir FY (2017) Clinical performance of a glass ionomer restorative system: a 6-year evaluation. *Clin Oral Investig* 21 (7):2335-2343. <https://doi.org/10.1007/s00784-016-2028-4>
72. Gurgan S, Kutuk ZB, Yalcin Cakir F and Ergin E (2020) A randomized controlled 10 years follow up of a glass ionomer restorative material in class I and class II cavities. *J Dent* 94:103175. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2019.07.013>
73. Han SH, Sadr A, Shimada Y, Tagami J and Park SH (2019) Internal adaptation of composite restorations with or without an intermediate layer: Effect of polymerization shrinkage parameters of the layer material. *J Dent* 80:41-48. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2018.10.013>
74. Han SH, Sadr A, Tagami J and Park SH (2016) Internal adaptation of resin composites at two configurations: Influence of polymerization shrinkage and stress. *Dent Mater* 32 (9):1085-94. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.06.005>

75. Hashimoto M, Ohno H, Kaga M, Endo K, Sano H and Oguchi H (2000) In vivo degradation of resin-dentin bonds in humans over 1 to 3 years. *J Dent Res* 79 (6):1385-91. <https://doi.org/10.1177/00220345000790060601>
76. Heck K, Frasher I, Diegritz C, Manhart J, Hickel R and Fotiadou C (2020) Six-year results of a randomized controlled clinical trial of two glass ionomer cements in class II cavities. *J Dent* 97:103333. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2020.103333>
77. Heck K, Litzemberger F, Geitl T and Kunzelmann KH (2021) Near-infrared reflection at 780 nm for detection of early proximal caries in posterior permanent teeth in vitro. *Dentomaxillofac Radiol* 50 (6):20210005. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20210005>
78. Heck K, Litzemberger F, Ullmann V, Hoffmann L and Kunzelmann KH (2021) In vitro comparison of two types of digital X-ray sensors for proximal caries detection validated by micro-computed tomography. *Dentomaxillofac Radiol* 50 (3):20200338. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20200338>
79. Heck K, Manhart J, Hickel R and Diegritz C (2018) Clinical evaluation of the bulk fill composite QuiXfil in molar class I and II cavities: 10-year results of a RCT. *Dent Mater* 34 (6):e138-e147. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2018.03.023>
80. Heckbert PS (1986) Survey of Texture Mapping. *IEEE Computer Graphics and Applications* 6 (11):56-67. <https://doi.org/10.1109/mcg.1986.276672>
81. Heintze SD, Ilie N, Hickel R, Reis A, Loguercio A and Rousson V (2017) Laboratory mechanical parameters of composite resins and their relation to fractures and wear in clinical trials-A systematic review. *Dent Mater* 33 (3):e101-e114. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.11.013>
82. Heintze SD and Rousson V (2012) Clinical effectiveness of direct class II restorations - a meta-analysis. *J Adhes Dent* 14 (5):407-31. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a28390>
83. Hickel R and Manhart J (2001) Longevity of restorations in posterior teeth and reasons for failure. *J Adhes Dent* 3 (1):45-64
84. Hickel R, Peschke A, Tyas M, Mjor I, Bayne S, Peters M, Hiller KA, Randall R, Vanherle G and Heintze SD (2010) FDI World Dental Federation - clinical criteria for the

evaluation of direct and indirect restorations. Update and clinical examples. *J Adhes Dent* 12 (4):259-72. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a19262>

85. Hickel R, Peschke A, Tyas M, Mjor I, Bayne S, Peters M, Hiller KA, Randall R, Vanherle G and Heintze SD (2010) FDI World Dental Federation: clinical criteria for the evaluation of direct and indirect restorations-update and clinical examples. *Clin Oral Investig* 14 (4):349-66. <https://doi.org/10.1007/s00784-010-0432-8>

86. Hickel R, Roulet JF, Bayne S, Heintze SD, Mjor IA, Peters M, Rousson V, Randall R, Schmalz G, Tyas M and Vanherle G (2007) Recommendations for conducting controlled clinical studies of dental restorative materials. *Clin Oral Investig* 11 (1):5-33. <https://doi.org/10.1007/s00784-006-0095-7>

87. Hickel R, Roulet JF, Bayne S, Heintze SD, Mjor IA, Peters M, Rousson V, Randall R, Schmalz G, Tyas M and Vanherle G (2007) Recommendations for conducting controlled clinical studies of dental restorative materials. Science Committee Project 2/98--FDI World Dental Federation study design (Part I) and criteria for evaluation (Part II) of direct and indirect restorations including onlays and partial crowns. *J Adhes Dent* 9 Suppl 1:121-47

88. Hickey D, Sharif O, Janjua F and Brunton PA (2016) Bulk dentine replacement versus incrementally placed resin composite: A randomised controlled clinical trial. *J Dent* 46:18-22. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.01.011>

89. Hildebrand T and Rügsegger P (2003) A new method for the model-independent assessment of thickness in three-dimensional images. *J Microsc* 185 (1):67-75. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2818.1997.1340694.x>

90. Hoffmann L, Neuerer C, Heck K and Kunzelmann KH (2021) Bulk-fill Composites Compared to a Nanohybrid Composite in Class-II Cavities - A Two-year Follow-Up Study. *J Adhes Dent* 23 (5):389-396. <https://doi.org/10.3290/j.jad.b2000185>

91. Hubel S and Mejare I (2003) Conventional versus resin-modified glass-ionomer cement for Class II restorations in primary molars. A 3-year clinical study. *Int J Paediatr Dent* 13 (1):2-8. <https://doi.org/10.1046/j.1365-263x.2003.00416.x>

92. Hwang SY, Choi ES, Kim YS, Gim BE, Ha M and Kim HY (2018) Health effects from exposure to dental diagnostic X-ray. *Environ Health Toxicol* 33 (4):e2018017. <https://doi.org/10.5620/eht.e2018017>

93. Ilie N, Bucuta S and Draenert M (2013) Bulk-fill resin-based composites: an in vitro assessment of their mechanical performance. *Oper Dent* 38 (6):618-25.
<https://doi.org/10.2341/12-395-L>
94. Ilie N and Hickel R (2011) Investigations on a methacrylate-based flowable composite based on the SDR technology. *Dent Mater* 27 (4):348-55.
<https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.11.014>
95. Ilie N, Hickel R, Valceanu AS and Huth KC (2012) Fracture toughness of dental restorative materials. *Clin Oral Investig* 16 (2):489-98. <https://doi.org/10.1007/s00784-011-0525-z>
96. Ilie N, Kessler A and Durner J (2013) Influence of various irradiation processes on the mechanical properties and polymerisation kinetics of bulk-fill resin based composites. *J Dent* 41 (8):695-702. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2013.05.008>
97. Ilie N, Schoner C, Bücher K and Hickel R (2014) An in-vitro assessment of the shear bond strength of bulk-fill resin composites to permanent and deciduous teeth. *J Dent* 42 (7):850-5. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.03.013>
98. Ilie N and Stark K (2014) Curing behaviour of high-viscosity bulk-fill composites. *J Dent* 42 (8):977-85. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.05.012>
99. Ilie N and Stark K (2015) Effect of different curing protocols on the mechanical properties of low-viscosity bulk-fill composites. *Clin Oral Investig* 19 (2):271-9.
<https://doi.org/10.1007/s00784-014-1262-x>
100. Jablonski-Momeni A, Jablonski B and Lippe N (2017) Clinical performance of the near-infrared imaging system VistaCam iX Proxi for detection of approximal enamel lesions. *BDJ Open* 3:17012. <https://doi.org/10.1038/bdjopen.2017.12>
101. Jablonski-Momeni A, Stachniss V, Ricketts DN, Heinzl-Gutenbrunner M and Pieper K (2008) Reproducibility and accuracy of the ICDAS-II for detection of occlusal caries in vitro. *Caries Res* 42 (2):79-87. <https://doi.org/10.1159/000113160>
102. Jones R, Huynh G, Jones G and Fried D (2003) Near-infrared transillumination at 1310-nm for the imaging of early dental decay. *Opt Express* 11 (18):2259-65.
<https://doi.org/10.1364/oe.11.002259>

103. Jones RS and Fried D (2002) Attenuation of 1310- and 1550-nm laser light through sound dental enamel. Book title. International Society for Optics and Photonics,
104. Kaisarly D, El Gezawi M, Kessler A, Rosch P and Kunzelmann KH (2021) Shrinkage vectors in flowable bulk-fill and conventional composites: bulk versus incremental application. *Clin Oral Investig* 25 (3):1127-1139. <https://doi.org/10.1007/s00784-020-03412-3>
105. Khandelwal P. HK, Friedl K. (2011) Clinical Performance of a Glass Ionomer Based Restorative System. *J Dent Res* 90 (Spec Iss A: Abstract#3240(IADR))
106. Kielbassa AM, Glockner G, Wolgin M and Glockner K (2016) Systematic review on highly viscous glass-ionomer cement/resin coating restorations (Part I): Do they merge Minamata Convention and minimum intervention dentistry? *Quintessence Int* 47 (10):813-823. <https://doi.org/10.3290/j.qi.a36884>
107. Kienle A, Michels R and Hibst R (2006) Magnification--a new look at a long-known optical property of dentin. *J Dent Res* 85 (10):955-9. <https://doi.org/10.1177/154405910608501017>
108. Kleverlaan CJ and Feilzer AJ (2005) Polymerization shrinkage and contraction stress of dental resin composites. *Dent Mater* 21 (12):1150-7. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.02.004>
109. Klinker T, Daboul A, Turek A, Frankenberger R, Hickel R and Biffar R (2016) Clinical performance during 48 months of two current glass ionomer restorative systems with coatings: a randomized clinical trial in the field. *Trials* 17 (1):239. <https://doi.org/10.1186/s13063-016-1339-8>
110. Kocak N and Cengiz-Yanardag E (2020) Clinical performance of clinical-visual examination, digital bitewing radiography, laser fluorescence, and near-infrared light transillumination for detection of non-cavitated proximal enamel and dentin caries. *Lasers Med Sci* 35 (7):1621-1628. <https://doi.org/10.1007/s10103-020-03021-2>
111. Kohler B, Rasmusson CG and Odman P (2000) A five-year clinical evaluation of Class II composite resin restorations. *J Dent* 28 (2):111-6. [https://doi.org/10.1016/s0300-5712\(99\)00059-7](https://doi.org/10.1016/s0300-5712(99)00059-7)

112. Krämer N, Lohbauer U, Uebereck C, Wöstmann B and Frankenberger R (2012) Glasionomerzemente für die Kinderzahnheilkunde. *Quintessenz* 63 (5):639-644
113. Kühnisch J, Berger S, Goddon I, Senkel H, Pitts N and Heinrich-Weltzien R (2008) Occlusal caries detection in permanent molars according to WHO basic methods, ICDAS II and laser fluorescence measurements. *Community Dent Oral Epidemiol* 36 (6):475-84. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0528.2008.00436.x>
114. Kühnisch J, Schäfer G, Pitchika V, Garcia-Godoy F and Hickel R (2019) Evaluation of detecting proximal caries in posterior teeth via visual inspection, digital bitewing radiography and near-infrared light transillumination. *Am J Dent* 32 (2):74-80
115. Kühnisch J, Söchtig F, Pitchika V, Laubender R, Neuhaus KW, Lussi A and Hickel R (2016) In vivo validation of near-infrared light transillumination for interproximal dentin caries detection. *Clin Oral Investig* 20 (4):821-9. <https://doi.org/10.1007/s00784-015-1559-4>
116. Kunzelmann K-H and Roesch P (2013) 3D Porosity Quantification in Set Glassionomer Cements Book title., Seattle, Washington
117. Landis JR and Koch GG (1977) The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 33 (1):159-74
118. Lederer A, Kunzelmann KH, Heck K, Hickel R and Litzenburger F (2019) In vitro validation of near-infrared transillumination at 780 nm for the detection of caries on proximal surfaces. *Clin Oral Investig* 23 (11):3933-3940. <https://doi.org/10.1007/s00784-019-02824-0>
119. Lederer A, Kunzelmann KH, Heck K, Hickel R and Litzenburger F (2019) In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection. *Eur J Oral Sci* 127 (6):515-522. <https://doi.org/10.1111/eos.12663>
120. Lederer A, Kunzelmann KH, Hickel R and Litzenburger F (2018) Transillumination and HDR Imaging for Proximal Caries Detection. *J Dent Res* 97 (7):844-849. <https://doi.org/10.1177/0022034518759957>
121. Lee CS, Lee DC, Darling CL and Fried D (2010) Nondestructive assessment of the severity of occlusal caries lesions with near-infrared imaging at 1310 nm. *J Biomed Opt* 15 (4):047011

122. LeGeros RZ, Piliero JA and Pentel L (1983) Comparative Properties of Deciduous and Permanent (Young and Old) Human Enamel. *Gerodontology* 2 (1):1-8.
<https://doi.org/10.1111/j.1741-2358.1983.tb00341.x>
123. Leinfelder KF, Bayne SC and Swift EJ, Jr. (1999) Packable composites: overview and technical considerations. *J Esthet Dent* 11 (5):234-49. <https://doi.org/10.1111/j.1708-8240.1999.tb00405.x>
124. Leprince JG, Palin WM, Vanacker J, Sabbagh J, Devaux J and Leloup G (2014) Physico-mechanical characteristics of commercially available bulk-fill composites. *J Dent* 42 (8):993-1000. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2014.05.009>
125. Lins RBE, Aristilde S, Osorio JH, Cordeiro CMB, Yanikian CRF, Bicalho AA, Stape THS, Soares CJ and Martins LRM (2019) Biomechanical behaviour of bulk-fill resin composites in class II restorations. *J Mech Behav Biomed Mater* 98:255-261.
<https://doi.org/10.1016/j.jmbbm.2019.06.032>
126. Litzenburger F, Heck K, Kaisarly D and Kunzelmann KH (2021) Diagnostic validity of early proximal caries detection using near-infrared imaging technology on 3D range data of posterior teeth. *Clin Oral Investig*. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04032-1>
127. Litzenburger F, Heck K, Pitchika V, Neuhaus KW, Jost FN, Hickel R, Jablonski-Momeni A, Welk A, Lederer A and Kühnisch J (2018) Inter- and intraexaminer reliability of bitewing radiography and near-infrared light transillumination for proximal caries detection and assessment. *Dentomaxillofac Radiol* 47 (3):20170292.
<https://doi.org/10.1259/dmfr.20170292>
128. Litzenburger F, Lederer A, Kollmuss M, Hickel R, Kunzelmann KH and Heck K (2020) Near-infrared transillumination with high dynamic range imaging for occlusal caries detection in vitro. *Lasers Med Sci* 35 (9):2049-2058. <https://doi.org/10.1007/s10103-020-03078-z>
129. Litzenburger F, Schafer G, Hickel R, Kühnisch J and Heck K (2021) Comparison of novel and established caries diagnostic methods: a clinical study on occlusal surfaces. *BMC Oral Health* 21 (1):97. <https://doi.org/10.1186/s12903-021-01465-8>

130. Lohbauer U (2009) Dental Glass Ionomer Cements as Permanent Filling Materials? – Properties, Limitations and Future Trends. *Materials* 3 (1):76-96.
<https://doi.org/10.3390/ma3010076>
131. Lohbauer U, Krämer N, Siedschlag G, Schubert EW, Lauerer B, Muller FA, Petschelt A and Ebert J (2011) Strength and wear resistance of a dental glass-ionomer cement with a novel nanofilled resin coating. *Am J Dent* 24 (2):124-8
132. Lussi A, Hibst R and Paulus R (2004) DIAGNOdent: an optical method for caries detection. *J Dent Res* 83 Spec No C:C80-3. <https://doi.org/10.1177/154405910408301s16>
133. Mahmoud SH and Al-Wakeel Eel S (2011) Marginal adaptation of ormocer-, silorane-, and methacrylate-based composite restorative systems bonded to dentin cavities after water storage. *Quintessence Int* 42 (10):e131-9
134. Mahmoud SH, Ali AK and Hegazi HA (2014) A three-year prospective randomized study of silorane- and methacrylate-based composite restorative systems in class II restorations. *J Adhes Dent* 16 (3):285-92. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a31939>
135. Manhart J, Chen H, Hamm G and Hickel R (2004) Buonocore Memorial Lecture. Review of the clinical survival of direct and indirect restorations in posterior teeth of the permanent dentition. *Oper Dent* 29 (5):481-508
136. Manhart J, Chen HY and Hickel R (2001) The suitability of packable resin-based composites for posterior restorations. *J Am Dent Assoc* 132 (5):639-45.
<https://doi.org/10.14219/jada.archive.2001.0241>
137. Manhart J, Chen HY and Hickel R (2009) Three-year results of a randomized controlled clinical trial of the posterior composite QuiXfil in class I and II cavities. *Clin Oral Investig* 13 (3):301-7. <https://doi.org/10.1007/s00784-008-0233-5>
138. Manhart J, Chen HY and Hickel R (2010) Clinical evaluation of the posterior composite Quixfil in class I and II cavities: 4-year follow-up of a randomized controlled trial. *J Adhes Dent* 12 (3):237-43. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a17551>
139. Manhart J, Chen HY, Neuerer P, Thiele L, Jaensch B and Hickel R (2008) Clinical performance of the posterior composite QuiXfil after 3, 6, and 18 months in Class 1 and 2 cavities. *Quintessence Int* 39 (9):757-65

140. Marinova-Takorova M, Panov V and Anastasova R (2016) Effectiveness of near-infrared transillumination in early caries diagnosis. *Biotechnology & Biotechnological Equipment* 30 (6):1207-1211. <https://doi.org/10.1080/13102818.2016.1232606>
141. McKenzie MA, Linden RW and Nicholson JW (2003) The physical properties of conventional and resin-modified glass-ionomer dental cements stored in saliva, proprietary acidic beverages, saline and water. *Biomaterials* 24 (22):4063-9. [https://doi.org/10.1016/s0142-9612\(03\)00282-5](https://doi.org/10.1016/s0142-9612(03)00282-5)
142. Miletic I, Baraba A., Bago Juric I., Anic I. (2013) Evaluation of a glass-ionomer based restoration system - a one year pilot study. *Journal of Minimum Intervention in Dentistry* 6 (6):87-95
143. Mortada WI, Sobh MA and El-Defrawy MM (2004) The exposure to cadmium, lead and mercury from smoking and its impact on renal integrity. *Med Sci Monit* 10 (3):CR112-6
144. Neuhaus KW, Longbottom C, Ellwood R and Lussi A (2009) Novel lesion detection aids. *Monogr Oral Sci* 21:52-62. <https://doi.org/10.1159/000224212>
145. Ng C, Almaz E, Simon J, Fried D and Darling C (2019) Near-infrared imaging of demineralization on the occlusal surfaces of teeth without the interference of stains. *J Biomed Opt* 24 (3):036002
146. Obuchowicz R, Nurzynska K, Obuchowicz B, Urbanik A and Piorkowski A (2020) Caries detection enhancement using texture feature maps of intraoral radiographs. *Oral Radiol* 36 (3):275-287. <https://doi.org/10.1007/s11282-018-0354-8>
147. Oguro R, Nakajima M, Seki N, Sadr A, Tagami J and Sumi Y (2016) The role of enamel thickness and refractive index on human tooth colour. *J Dent* 51:36-44. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.05.010>
148. Okada K, Tosaki S, Hirota K and Hume WR (2001) Surface hardness change of restorative filling materials stored in saliva. *Dent Mater* 17 (1):34-9. [https://doi.org/10.1016/s0109-5641\(00\)00053-1](https://doi.org/10.1016/s0109-5641(00)00053-1)
149. Opdam NJ, Bronkhorst EM, Loomans BA and Huysmans MC (2010) 12-year survival of composite vs. amalgam restorations. *J Dent Res* 89 (10):1063-7. <https://doi.org/10.1177/0022034510376071>

150. Opdam NJ, Bronkhorst EM, Roeters JM and Loomans BA (2007) Longevity and reasons for failure of sandwich and total-etch posterior composite resin restorations. *J Adhes Dent* 9 (5):469-75
151. Opdam NJ, Bronkhorst EM, Roeters JM and Loomans BA (2007) A retrospective clinical study on longevity of posterior composite and amalgam restorations. *Dent Mater* 23 (1):2-8. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2005.11.036>
152. Ozkan G and Guzel KGU (2017) Clinical evaluation of near-infrared light transillumination in approximal dentin caries detection. *Lasers Med Sci* 32 (6):1417-1422. <https://doi.org/10.1007/s10103-017-2265-z>
153. Ozkan G, Kanli A, Baseren NM, Arslan U and Tatar I (2015) Validation of micro-computed tomography for occlusal caries detection: an in vitro study. *Braz Oral Res* 29 (1):S1806-83242015000100309. <https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2015.vol29.0132>
154. Palaniappan S, Bharadwaj D, Mattar DL, Peumans M, Van Meerbeek B and Lambrechts P (2009) Three-year randomized clinical trial to evaluate the clinical performance and wear of a nanocomposite versus a hybrid composite. *Dent Mater* 25 (11):1302-14. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2009.06.001>
155. Pallesen U and van Dijken JW (2015) A randomized controlled 30 years follow up of three conventional resin composites in Class II restorations. *Dent Mater* 31 (10):1232-44. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2015.08.146>
156. Paris S, Bitter K, Krois J and Meyer-Lueckel H (2020) Seven-year-efficacy of proximal caries infiltration - Randomized clinical trial. *J Dent* 93:103277. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2020.103277>
157. Park J, Chang J, Ferracane J and Lee IB (2008) How should composite be layered to reduce shrinkage stress: incremental or bulk filling? *Dent Mater* 24 (11):1501-5. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2008.03.013>
158. Peters OA, Laib A, Ruegsegger P and Barbakow F (2000) Three-dimensional analysis of root canal geometry by high-resolution computed tomography. *J Dent Res* 79 (6):1405-9. <https://doi.org/10.1177/00220345000790060901>

159. Pitts NB and Rimmer PA (1992) An in vivo comparison of radiographic and directly assessed clinical caries status of posterior approximal surfaces in primary and permanent teeth. *Caries Res* 26 (2):146-52. <https://doi.org/10.1159/000261500>
160. Poggio C, Dagna A, Chiesa M, Colombo M and Scribante A (2012) Surface roughness of flowable resin composites eroded by acidic and alcoholic drinks. *J Conserv Dent* 15 (2):137-40. <https://doi.org/10.4103/0972-0707.94581>
161. Polydorou O, Manolakis A, Hellwig E and Hahn P (2008) Evaluation of the curing depth of two translucent composite materials using a halogen and two LED curing units. *Clin Oral Investig* 12 (1):45-51
162. Poorterman JH, Aartman IH and Kalsbeek H (1999) Underestimation of the prevalence of approximal caries and inadequate restorations in a clinical epidemiological study. *Community Dent Oral Epidemiol* 27 (5):331-7. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0528.1999.tb02029.x>
163. Poorterman JH, Aartman IH, Kieft JA and Kalsbeek H (2002) [Clinical underestimation of the prevalence of approximal dentin lesions and inadequate restorations]. *Ned Tijdschr Tandheelkd* 109 (2):47-50
164. Pouyanfar H, Tabaii ES, Aghazadeh S, Nobari S and Imani MM (2018) Microtensile Bond Strength of Composite to Enamel Using Universal Adhesive with/without Acid Etching Compared To Etch and Rinse and Self-Etch Bonding Agents. *Open Access Maced J Med Sci* 6 (11):2186-2192. <https://doi.org/10.3889/oamjms.2018.427>
165. Pretty IA (2006) Caries detection and diagnosis: novel technologies. *J Dent* 34 (10):727-39. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2006.06.001>
166. Reis AF, Vestphal M, Amaral RCD, Rodrigues JA, Roulet JF and Roscoe MG (2017) Efficiency of polymerization of bulk-fill composite resins: a systematic review. *Braz Oral Res* 31 (suppl 1):e59. <https://doi.org/10.1590/1807-3107BOR-2017.vol31.0059>
167. Rencz A, Hickel R and Ilie N (2012) Curing efficiency of modern LED units. *Clin Oral Investig* 16 (1):173-9. <https://doi.org/10.1007/s00784-010-0498-3>

168. Ricketts D, Kidd E, Weerheijm K and de Soet H (1997) Hidden caries: what is it? Does it exist? Does it matter? *Int Dent J* 47 (5):259-65. <https://doi.org/10.1002/j.1875-595x.1997.tb00786.x>
169. Riechert F, Bastian G and Lemmer U (2009) Laser speckle reduction via colloidal-dispersion-filled projection screens. *Appl Opt* 48 (19):3742-9. <https://doi.org/10.1364/ao.48.003742>
170. Rodrigues JA, Hug I, Diniz MB and Lussi A (2008) Performance of fluorescence methods, radiographic examination and ICDAS II on occlusal surfaces in vitro. *Caries Res* 42 (4):297-304. <https://doi.org/10.1159/000148162>
171. Rothmund L, Reichl FX, Hickel R, Styllou P, Styllou M, Kehe K, Yang Y and Hogg C (2017) Effect of layer thickness on the elution of bulk-fill composite components. *Dent Mater* 33 (1):54-62. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.10.006>
172. Roulet JF (1997) Benefits and disadvantages of tooth-coloured alternatives to amalgam. *J Dent* 25 (6):459-73. [https://doi.org/10.1016/s0300-5712\(96\)00066-8](https://doi.org/10.1016/s0300-5712(96)00066-8)
173. Russotto F, Tirone S, Salzano S, Borga F, Paolino D, Ferraro A and Botasso S (2016) Clinical evaluation of near-infrared light transillumination (NIRT) as an interproximal caries detection tool in a large sample of patients in a private practice. *Journal of Radiology and Imaging* 1 (1):1-5. <https://doi.org/10.14312/2399-8172.2016-1>
174. Schäfer G, Pitchika V, Litzemberger F, Hickel R and Kühnisch J (2018) Evaluation of occlusal caries detection and assessment by visual inspection, digital bitewing radiography and near-infrared light transillumination. *Clin Oral Investig* 22 (7):2431-2438. <https://doi.org/10.1007/s00784-018-2512-0>
175. Schindelin J, Arganda-Carreras I, Frise E, Kaynig V, Longair M, Pietzsch T, Preibisch S, Rueden C, Saalfeld S, Schmid B, Tinevez JY, White DJ, Hartenstein V, Eliceiri K, Tomancak P and Cardona A (2012) Fiji: an open-source platform for biological-image analysis. *Nat Methods* 9 (7):676-82. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2019>
176. Schneiderman A, Elbaum M, Shultz T, Keem S, Greenebaum M and Driller J (1997) Assessment of dental caries with Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination (DIFOTI): in vitro study. *Caries Res* 31 (2):103-10. <https://doi.org/10.1159/000262384>

177. Scholtanus JD and Huysmans MC (2007) Clinical failure of class-II restorations of a highly viscous glass-ionomer material over a 6-year period: a retrospective study. *J Dent* 35 (2):156-62. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2006.07.006>
178. Schropp L, Alyass NS, Wenzel A and Stavropoulos A (2012) Validity of wax and acrylic as soft-tissue simulation materials used in in vitro radiographic studies. *Dentomaxillofac Radiol* 41 (8):686-90. <https://doi.org/10.1259/dmfr/33467269>
179. Schwendicke F and Göstemeyer G (2019) Conventional Bitewing Radiographs. In: Ferreira Zandona A and Longbottom C, editors. *Detection and Assessment of Dental Caries*. Switzerland: Springer; p. 109-117.
180. Schwendicke F, Tzschope M and Paris S (2015) Radiographic caries detection: A systematic review and meta-analysis. *J Dent* 43 (8):924-33. <https://doi.org/10.1016/j.jdent.2015.02.009>
181. Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) (2015) The safety of dental amalgam and alternative dental restoration materials for patients and users. https://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/docs/scenihr_o_046.pdf. Accessed 7 January 2020
182. Scotti N, Bergantin E, Giovannini R, Delbosco L, Breschi L, Migliaretti G, Pasqualini D and Berutti E (2015) Influence of multi-step etch-and-rinse versus self-etch adhesive systems on the post-operative sensitivity in medium-depth carious lesions: An in vivo study. *Am J Dent* 28 (4):214-8
183. Serra MC, Navarro MF, Freitas SF, Carvalho RM, Cury JA and Retief DH (1994) Glass ionomer cement surface protection. *Am J Dent* 7 (4):203-6
184. Simon JC, Chan KH, Darling CL and Fried D (2014) Multispectral near-IR reflectance imaging of simulated early occlusal lesions: variation of lesion contrast with lesion depth and severity. *Lasers Surg Med* 46 (3):203-15. <https://doi.org/10.1002/lsm.22216>
185. Simon JC, Lucas SA, Staninec M, Tom H, Chan KH, Darling CL, Cozin MJ, Lee RC and Fried D (2016) Near-IR transillumination and reflectance imaging at 1,300 nm and 1,500-1,700 nm for in vivo caries detection. *Lasers Surg Med* 48 (9):828-836. <https://doi.org/10.1002/lsm.22549>

186. Simon JC, S AL, Lee RC, Darling CL, Staninec M, Vaderhobli R, Pelzner R and Fried D (2016) Near-infrared imaging of secondary caries lesions around composite restorations at wavelengths from 1300-1700-nm. *Dent Mater* 32 (4):587-95.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2016.01.008>

187. Siso SH, Hurmuzlu M, Turgut M, Altundasar E, Serper A and Er K (2007) Fracture resistance of the buccal cusps of root filled maxillary premolar teeth restored with various techniques. *Int Endod J* 40 (3):161-168

188. Söchtig F, Hickel R and Kühnisch J (2014) Caries detection and diagnostics with near-infrared light transillumination: clinical experiences. *Quintessence Int* 45 (6):531-8.

<https://doi.org/10.3290/j.qi.a31533>

189. Soviero VM, Leal SC, Silva RC and Azevedo RB (2012) Validity of MicroCT for in vitro detection of proximal carious lesions in primary molars. *J Dent* 40 (1):35-40.

<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2011.09.002>

190. Staninec M, Lee C, Darling CL and Fried D (2010) In vivo near-IR imaging of approximal dental decay at 1,310 nm. *Lasers in Surgery and Medicine: The Official Journal of the American Society for Laser Medicine and Surgery* 42 (4):292-298

191. Suda S, Tsujimoto A, Barkmeier WW, Nojiri K, Nagura Y, Takamizawa T, Latta MA and Miyazaki M (2018) Comparison of enamel bond fatigue durability between universal adhesives and two-step self-etch adhesives: Effect of phosphoric acid pre-etching. *Dent Mater J* 37 (2):244-255. <https://doi.org/10.4012/dmj.2017-059>

192. Suh N (1986) *Tribophysics*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ

193. Sund T and Moystad A (2006) Sliding window adaptive histogram equalization of intraoral radiographs: effect on image quality. *Dentomaxillofac Radiol* 35 (3):133-8.

<https://doi.org/10.1259/dmfr/21936923>

194. Tantbirojn D, Versluis A, Pintado MR, DeLong R and Douglas WH (2004) Tooth deformation patterns in molars after composite restoration. *Dent Mater* 20 (6):535-42.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2003.05.008>

195. Tassoker M, Ozcan S and Karabekiroglu S (2020) Occlusal Caries Detection and Diagnosis Using Visual ICDAS Criteria, Laser Fluorescence Measurements, and Near-

Infrared Light Transillumination Images. *Med Princ Pract* 29 (1):25-31.

<https://doi.org/10.1159/000501257>

196. ten Bosch JJ, van der Mei HC and Borsboom PC (1984) Optical monitor of in vitro caries. A comparison with chemical and microradiographic determination of mineral loss in early lesions. *Caries Res* 18 (6):540-7. <https://doi.org/10.1159/000260818>

197. Tonkaboni A, Saffarpour A, Aghapourzangeneh F and Fard MJK (2019) Comparison of diagnostic effects of infrared imaging and bitewing radiography in proximal caries of permanent teeth. *Lasers Med Sci* 34 (5):873-879. <https://doi.org/10.1007/s10103-018-2663-x>

198. Tsujimoto A, Barkmeier WW, Takamizawa T, Watanabe H, Johnson WW, Latta MA and Miyazaki M (2016) Influence of duration of phosphoric acid pre-etching on bond durability of universal adhesives and surface free-energy characteristics of enamel. *Eur J Oral Sci* 124 (4):377-86. <https://doi.org/10.1111/eos.12284>

199. Turkun LS and Kanik O (2016) A Prospective Six-Year Clinical Study Evaluating Reinforced Glass Ionomer Cements with Resin Coating on Posterior Teeth: Quo Vadis? *Oper Dent* 41 (6):587-598. <https://doi.org/10.2341/15-331-C>

200. United Nations Environment Programme (2017) Minamata Convention on Mercury. Text and Annexes.

www.mercuryconvention.org/Portals/11/documents/Booklets/COP1%20version/Minamata-Convention-booklet-eng-full.pdf. Accessed 7 January 2020

201. van Dijken JW and Hasselrot L (2010) A prospective 15-year evaluation of extensive dentin-enamel-bonded pressed ceramic coverages. *Dent Mater* 26 (9):929-39.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2010.05.008>

202. van Dijken JW and Pallesen U (2014) A randomized 10-year prospective follow-up of Class II nanohybrid and conventional hybrid resin composite restorations. *J Adhes Dent* 16 (6):585-92.

<https://doi.org/10.3290/j.jad.a33202>

203. van Dijken JW and Pallesen U (2014) A randomized controlled three year evaluation of "bulk-filled" posterior resin restorations based on stress decreasing resin technology. *Dent Mater* 30 (9):e245-51.

<https://doi.org/10.1016/j.dental.2014.05.028>

204. van Dijken JW and Pallesen U (2015) Eight-year randomized clinical evaluation of Class II nanohybrid resin composite restorations bonded with a one-step self-etch or a two-step etch-and-rinse adhesive. *Clin Oral Investig* 19 (6):1371-9.
<https://doi.org/10.1007/s00784-014-1345-8>
205. van Dijken JW and Pallesen U (2015) Randomized 3-year clinical evaluation of Class I and II posterior resin restorations placed with a bulk-fill resin composite and a one-step self-etching adhesive. *J Adhes Dent* 17 (1):81-8. <https://doi.org/10.3290/j.jad.a33502>
206. van Dijken JW and Pallesen U (2016) Posterior bulk-filled resin composite restorations: A 5-year randomized controlled clinical study. *J Dent* 51:29-35.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2016.05.008>
207. van Dijken JWV and Pallesen U (2017) Bulk-filled posterior resin restorations based on stress-decreasing resin technology: a randomized, controlled 6-year evaluation. *Eur J Oral Sci* 125 (4):303-309. <https://doi.org/10.1111/eos.12351>
208. Van Ende A, De Munck J, Van Landuyt KL, Poitevin A, Peumans M and Van Meerbeek B (2013) Bulk-filling of high C-factor posterior cavities: effect on adhesion to cavity-bottom dentin. *Dent Mater* 29 (3):269-77. <https://doi.org/10.1016/j.dental.2012.11.002>
209. Van Meerbeek B, Yoshida Y, Inoue S, De Munck J, Van Landuyt K and Lambrechts P (2006) Glass-ionomer adhesion: the mechanisms at the interface. *J Dent* 34 (8):615-617.
<https://doi.org/10.1016/j.jdent.2006.01.018>
210. Van Nieuwenhuysen JP, D'Hoore W, Carvalho J and Qvist V (2003) Long-term evaluation of extensive restorations in permanent teeth. *J Dent* 31 (6):395-405.
[https://doi.org/10.1016/s0300-5712\(03\)00084-8](https://doi.org/10.1016/s0300-5712(03)00084-8)
211. Wassell RW, Walls AW and McCabe JF (2000) Direct composite inlays versus conventional composite restorations: 5-year follow-up. *J Dent* 28 (6):375-82.
[https://doi.org/10.1016/s0300-5712\(00\)00013-0](https://doi.org/10.1016/s0300-5712(00)00013-0)
212. Watts DC and Cash AJ (1991) Determination of polymerization shrinkage kinetics in visible-light-cured materials: methods development. *Dent Mater* 7 (4):281-7.
[https://doi.org/10.1016/S0109-5641\(05\)80030-2](https://doi.org/10.1016/S0109-5641(05)80030-2)

213. Watts DC and Marouf AS (2000) Optimal specimen geometry in bonded-disk shrinkage-strain measurements on light-cured biomaterials. *Dent Mater* 16 (6):447-51. [https://doi.org/10.1016/s0109-5641\(00\)00043-9](https://doi.org/10.1016/s0109-5641(00)00043-9)
214. Weerheijm KL, Groen HJ, Bast AJ, Kieft JA, Eijkman MA and van Amerongen WE (1992) Clinically undetected occlusal dentine caries: a radiographic comparison. *Caries Res* 26 (4):305-9. <https://doi.org/10.1159/000261457>
215. Weerheijm KL, Gruythuysen RJ and van Amerongen WE (1992) Prevalence of hidden caries. *ASDC J Dent Child* 59 (6):408-12
216. Weerheijm KL, Kidd EA and Groen HJ (1997) The effect of fluoridation on the occurrence of hidden caries in clinically sound occlusal surfaces. *Caries Res* 31 (1):30-4. <https://doi.org/10.1159/000262370>
217. Wu J and Fried D (2009) High contrast near-infrared polarized reflectance images of demineralization on tooth buccal and occlusal surfaces at $\lambda = 1310\text{-nm}$. *Lasers Surg Med* 41 (3):208-13. <https://doi.org/10.1002/lsm.20746>
218. Yazici AR, Antonson SA, Kutuk ZB and Ergin E (2017) Thirty-Six-Month Clinical Comparison of Bulk Fill and Nanofill Composite Restorations. *Oper Dent* 42 (5):478-485. <https://doi.org/10.2341/16-220-C>
219. Yazici AR, Kutuk ZB, Ergin E, Karahan S and Antonson SA (2021) Six-year clinical evaluation of bulk-fill and nanofill resin composite restorations. *Clin Oral Investig*. <https://doi.org/10.1007/s00784-021-04015-2>
220. Zakian CM, Pretty IA and Ellwood R (2009) Near-infrared hyperspectral imaging of teeth for dental caries detection. *J Biomed Opt* 14 (6):064047
221. Zoergiebel J and Ilie N (2013) Evaluation of a conventional glass ionomer cement with new zinc formulation: effect of coating, aging and storage agents. *Clin Oral Investig* 17 (2):619-26. <https://doi.org/10.1007/s00784-012-0733-1>

7 Danksagung

Meinem Fachmentor, Professor Dr. Reinhard Hickel, Direktor der Zahnerhaltung und Parodontologie, bin ich für die hervorragenden Bedingungen bei der Durchführung dieser Arbeit sowie für die fachliche Diskussion sehr dankbar. Ebenso danke ich Herrn Professor Dr. Edelhoff und Professor Dr. Rudolph für ihre Bereitschaft, diese Arbeit als Fachmentoren zu begleiten und ihre Zeit zur Verfügung zu stellen.

Mein besonderer Dank gilt meinem Kollegen und Mentor, Professor Dr. Karl-Heinz Kunzelmann, für die unermüdliche Bereitschaft zur fachlichen Diskussion und Unterstützung.

Für den fachlichen und wissenschaftlichen Austausch innerhalb der Abteilung danke ich allen meinen sehr geschätzten Kollegen. Hier seien stellvertretend Herr Professor Dr. Jan Kühnisch, Herr Professor Dr. Jürgen Manhart, Frau Privatdozentin Dr. Katharina Bücher, Herr Privatdozent Dr. Marcel Reymus sowie die Kollegen Frau Dr. Friederike Litzenburger, Frau Dr. Christina Fotiadou, Herr Dr. Christian Diegritz, Herr Dr. Alexander Lederer und Frau Iris Frasheri genannt. Ganz herzlich bedanken möchte ich mich bei den Promovenden Dr. Cornelia Neuerer, Dr. Helena Paterno, Katrin Berghammer sowie Thomas Geitl. Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei der wissenschaftlichen Hilfskraft und Studentin der Zahnmedizin Frau Verena Ullmann.

Für die hervorragende praktische Organisation während der letzten 13 Jahre möchte ich stellvertretend den Zahnmedizinischen Fachangestellten Petra Nußsteiner, Sylvia Reiner und Marie Groh meinen Dank aussprechen. Und nicht zuletzt den Patienten, die ihr Einverständnis zur Auswertung der Daten gegeben haben, sei gedankt.

Meinem Mann, Marcel Heck, und meinen Eltern bin ich für die persönliche und ideelle Unterstützung in besonderem Maße zu Dank verpflichtet. Meine Kinder waren immer ein Ansporn, aber auch ein Appell, sich auf das Wesentliche zu besinnen.