

Aus der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

**LICHTOPTISCHE METHODEN ZUR DIAGNOSTIK VON
SCHMELZ- UND DENTINKARIES**

Habilitation

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

vorgelegt von

Dr. med. dent. Friederike Litzenburger

2022

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der Universität München.

Berichterstatter: Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel

Mitberichterstatter: Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff

Prof. Dr. med. Thomas Liebig

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Meinem Vater Gustav Söchtig †
und
meiner Mutter Karin Hohmeyer-Söchtig †

Inhalt

1. Einleitung	1
2. Eigene Publikationen	4
2.1. Originalarbeit: Söchtig F, Hickel R, Kühnisch J. Caries detection and diagnostics with near-infrared light transillumination: clinical experiences. Quintessence Int 2014;45 (6):531-538. (IF 2014: 1.130)	5
2.2. Originalarbeit: Lederer A, Kunzelmann KH, Heck K, Hickel R, Litzenburger F. In vitro validation of near-infrared transillumination at 780 nm for the detection of caries on proximal surfaces. Clin oral Investig 2019; 23 (11):3933-3940. (IF 2019: 2.812)	7
2.3. Originalarbeit: Kühnisch J, Söchtig F, Pitchika V, Laubender R, Neuhaus KW, Lussi A, Hickel R. In vivo validation of near-infrared light transillumination for interproximal dentin caries detection. Clin Oral Investig 2016; 20 (4):821-829. (IF 2016: 2.530)	9
2.4. Originalarbeit: Stratigaki E, Jost FN, Kühnisch J, Litzenburger F, Lussi A, Neuhaus KW J. Clinical validation of near-infrared light transillumination for early proximal caries detection using a composite reference standard. J Dent 2020;103S:100025. (IF 2020: 2.44)	11
2.5. Originalarbeit: Lederer A, Kunzelmann KH, Hickel R, Litzenburger F. Transillumination and HDR imaging for proximal caries detection. J Dent Res 2018;97 (7):844-849. (IF 2018: 5.125)	13
2.6. Originalarbeit: Litzenburger F, Heck K, Pitchika V, Neuhaus KW, Jost FN, Hickel R, Momeni A, Welk A, Lederer A, Kühnisch J. Inter- and intraexaminer reliability of bitewing radiography and near-infrared light transillumination for proximal caries detection and assessment. Dentomaxillofac Radiol 2018;47 (3):20170292. (IF 2018: 1.525)	15
2.7. Originalarbeit: Litzenburger F, Schäfer G, Hickel R, Kühnisch J, Heck K. Comparison of novel and established caries diagnostic methods: a clinical study on occlusal surfaces. BMC Oral Health 2021;21 (1):97. (IF 2020: 2.757)	17

- 2.8. Originalarbeit: Litzenburger F, Lederer A, Kollmuß M, Hickel R, Kunzelmann KH, Heck K. Near-infrared transillumination with high dynamic range imaging for occlusal caries detection in vitro. Lasers Med Sci 2020;35 (9):2049-2058. (IF 2020: 3.161) 19**
- 2.9. Originalarbeit: Schäfer G, Pitchika V, Litzenburger F, Hickel R, Kühnisch J. Evaluation of occlusal caries detection and assessment by visual inspection, digital bitewing radiography and near-infrared light transillumination. Clin Oral Investig 2018;22 (7):2431-2438. (IF 2018: 2.587) 21**
- 2.10. Originalarbeit: Lederer A, Kunzelmann K-H, Heck K, Hickel R, Litzenburger F. In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection. Eur J Oral Sci 2019;127 (6):515-522. (IF 2019: 2.220) 23**
- 2.11. Originalarbeit: Litzenburger F, Heck K, Kaisarly D, Kunzelmann KH. Diagnostic validity of early proximal caries detection using near-infrared imaging technology on 3D range data of posterior teeth. Clin Oral Investig 2022; 26 (1):543-553 (IF 2020: 3.573) 25**
- 2.12. Originalarbeit: Heck K, Litzenburger F, Geitl T, Kunzelmann KH. Near-infrared reflection at 780 nm for detection of early proximal caries in posterior permanent teeth in vitro. Dentomaxillofac Radiol 2021;50 (6):20210005. (IF 2020: 2.419) 27**
- 2.13. Originalarbeit: Heck K, Litzenburger F, Ullmann V, Hoffmann L, Kunzelman. In vitro comparison of two types of digital sensors for proximal caries detection validated by microcomputed tomography. Dentomaxillofac Radiology 2021; Dentomaxillofac Radiol 50 (3):20200338. (IF 2020: 2.419) 29**
- 2.14. Originalarbeit: Hoffmann L, Feraric M, Hoster E, Litzenburger F, Kunzelmann KH. Investigations of the optical properties of enamel and dentin for early caries detection. Clin Oral Investig. 2021 Mar;25(3):1281-1289. (IF 2020:2.812) 31**
- 2.15. Originalarbeit: Berghammer K, Litzenburger F, Heck K, Kunzelmann KH. Attenuation of near- ultraviolet, visible and near-infrared light in healthy and carious enamel and dentin Clin Oral Investig 2022 (in press) (IF 2020: 3.192)**

3. Diskussion	35
3.1. Diagnostische Systeme zur Kariesdetektion an Approximal- und Okklusalflächen	35
3.1.1. Methodik zur Untersuchung diagnostischer Systeme zur Kariesdetektion an Approximal- und Okklusalflächen	35
3.1.2. Ergebnisse der Untersuchungen diagnostischer Systeme zur Kariesdiagnostik an Approximal- und Okklusalflächen	41
3.2. Grundlegende Untersuchungen zu lichtoptischen Eigenschaften von gesundem und kariösem Schmelz und Dentin	49
4. Zusammenfassung	51
5. Literaturverzeichnis	54
6. Danksagung	60

1. Einleitung

Dentale Karies ist eine weit verbreitete orale Erkrankung und sie betrifft weltweit Menschen aller Altersgruppen. Laut der Weltgesundheitsorganisation (WHO) und einer 2017 veröffentlichten Gesundheitsstudie haben mehr als 2,4 Milliarden Menschen unbehandelte Karies an bleibenden Zähnen und 530 Millionen Kinder weisen unbehandelte Milchzahnkaries auf [6]. Karies beginnt mit einer Schmelzdemineralisation, die mit einem Wachstum der Porengröße des Gewebes assoziiert ist. Wenn derartige Läsionen nicht arretiert oder remineralisiert werden, kommt es zu einem Fortschreiten der Demineralisation und zur Entstehung ausgedehnter kariöser Läsionen. Diese können sich über den Schmelz hinaus bis ins Dentin erstrecken und zu ersten Mikrokavitationen auf der Schmelzoberfläche führen. Ohne angemessene Therapie breitet sich ein solcher Prozess weiter im Dentin aus, erweicht dieses und verursacht so den weiteren Einbruch der Schmelzoberfläche. Hierdurch können Dentinareale der Mundhöhle exponiert werden. Primär entstehen derartige Läsionen häufig an Prädilektionsstellen, wie beengte Approximalräume oder Okklusalfächen. Die frühzeitige Erkennung und Einschätzung kariöser Prozesse ist wichtig und notwendig, um rechtzeitig prophylaktische Maßnahmen und nicht- und minimal-invasive Therapieschritte einleiten zu können. So kann die Entstehung kavittierter kariöser Läsionen in vielen Fällen verhindert werden. Traditionelle Kariesdetektion basiert auf der visuellen und taktilen Untersuchung der Oberflächen. Im Laufe der Jahre sind zahlreiche Klassifikationen und Indizes vorgestellt worden, um die visuelle Kariesdiagnostik zu standardisieren. Ein detailliertes Klassifikationssystem ist das International Caries Detection and Assessment System (ICDAS), welches sich als geeignet zum Monitoring kariöser Läsionen als auch zur Kariesdetektion erwies [42]. Dieses System wurde im Laufe der Jahre für wissenschaftliche, klinische und pädagogische Zwecke vielfach verwendet [9]. Die radiologische Untersuchung mittels Bissflügelröntgenaufnahmen gilt ebenfalls als etablierte und wichtige Untersuchungsmethode in der Kariesdiagnostik. Mit der Methodenkombination aus visueller Inspektion und der Anwendung von Röntgentechnologie sollen unübersichtliche Zahnoberflächen untersucht werden sowie die Läsionen hinsichtlich ihrer Tiefe und der entsprechenden Topografie der Pulpa eingeschätzt werden. Tatsächlich zeigt diese Kombination hinsichtlich der Detektion fortgeschrittener okklusaler und approximaler kariöser Läsionen häufig eine zufriedenstellende diagnostische Leistung mit niedrigeren Sensitivitäts- und höheren Spezifitätswerten von durchschnittlich 0.7 [26, 31, 43, 49]. Bezüglich der Detektion nicht-kavittierter und initialer Primärläsionen zeigen sich die visuelle Inspektion und die Bissflügelröntgentechnik jedoch deutlich weniger diagnostisch akkurat und neigen dazu die Kariesbelastung und die Tiefe der

kariösen Läsionen zu unterschätzen [18, 44, 58, 59]. Schwer zugängliche, nicht einsehbare oder unübersichtliche Interdentalräume und Fissurenreliefs erschweren die visuelle und taktile Untersuchung dieser Oberflächen. Die Beurteilung solcher Flächen wird häufig zu einer untersucherabhängigen Entscheidung. Zudem sind initiale Läsionen häufig aufgrund ihrer geringen Ausdehnung und des geringen Demineralisierungsgrades oder aufgrund von Überlappungsartefakten mit benachbarten Strukturen auf Bissflügelröntgenaufnahmen schlecht erkennbar [10].

Zahlreiche optische Methoden werden bereits seit Jahren entwickelt, um die Kariesdiagnostik und die Möglichkeiten zum Kariesmonitoring zu erweitern. Diese Untersuchungsmethoden nutzen die unterschiedlichen lichtoptischen Eigenschaften von gesundem und kariösem Schmelz und Dentin. Viele neuartige Diagnostiksysteme sind bereits im klinischen Einsatz. Hierzu gehört beispielsweise die Laserfluoreszenzmessung, die allerdings für die alltägliche klinische Anwendung verschiedene Defizite hinsichtlich diagnostischer Reliabilität und Leistung aufweist und sich bis heute nicht fest im klinischen Alltag etablieren konnte [27, 37, 40, 45, 47]. Ähnliches gilt für die elektrische Widerstandsmessung, welche derzeit für den praktisch arbeitenden Zahnarzt nur für Okklusalfächen zur Verfügung steht [21]. Vielversprechendere und zukunftsweisende lichtoptische Diagnostiksysteme verwenden dagegen Licht aus dem nahinfraroten Spektrum für die Transillumination von Zähnen und die Reflexionsdarstellung von Zahnoberflächen.

Die Nahinfrarot-Transillumination wurde in diesem Kontext erstmals 1995 von Daniel Fried beschrieben [13]. Diese Methode repräsentiert eine Optimierung der vorher schon bekannten faseroptischen Transillumination (FOTI) und dessen digitaler Modifikation (DiFOTI), wobei Licht kürzerer Wellenlänge ($\lambda \approx 400$ nm) aus dem sichtbaren Bereich genutzt wird [39]. Die digitale faseroptische Transillumination kann durch die Bildgebung ein Kariesmonitoring sowie eine Dokumentation der Befunde ermöglichen. Allerdings ist für die Interpretation der Bilder ein hohes Maß an Erfahrung und Kalibrierung nötig und es ergeben sich daher häufig ungenaue Ergebnisse was durch zahlreiche Studien bestätigt worden ist [40]. Bei der Nahinfrarot-Transillumination wird Licht längerer Wellenlängen ($\lambda = 780$ - 1.600 nm) durch die dentalen Gewebe geleitet und im Bereich kariöser Veränderungen im Schmelz und im Dentin gebrochen und gestreut. Die Nahinfrarot-Reflexion dagegen ist eine weitere lichtoptische Methode, bei der die Lichtquelle und der Detektor nicht gegenüberliegend, sondern nebeneinander ausgerichtet, sodass das von der angestrahlten Oberfläche reflektierte Licht aufgenommen und in Bildinformationen verarbeitet werden kann. Während kariöse Läsionen, an denen das Licht gebrochen wird, durch die Transillumination dunkler erscheinen, weil

weniger Licht den Sensor erreicht, erschienen dieselben Läsionen durch die Reflexion als hellere Areale, weil hier mehr Licht reflektiert und zum Sensor zurückgestrahlt wird.

Das nahinfrarote Spektrum ist bereits Gegenstand einiger kariesdiagnostischer Untersuchungen gewesen. Hierbei stellte sich das Optimum aus Absorptions- und Streuungseigenschaften zwischen Licht und Gewebe für die Transillumination und die Reflexion für einen Wellenlängenbereich zwischen 1.300-1.600 nm heraus. In Grundlagenstudien ergaben sich für diesen Bereich die besten Ergebnisse für eine kontrastreiche Differenzierung gesunder und erkrankter Zahnhartsubstanzen [3, 4, 8, 12-17, 50, 55]. Trotz dieser bekannten Vorteile längerer Wellenlängen wurde in kommerziell erhältlichen Diagnostiksystemen bisher ausschließlich Licht mit einer Wellenlänge zwischen 780–850 nm verwendet. Zum Teil haben Patentierungen für Wellenlängen zwischen 795 und 1.600 nm bisher weiterführende Entwicklungen auf kommerzieller Ebene verhindert. Vor allem aber erhöhte Kostenstrukturen, verursacht durch teure Sensortechnologien bei höheren Wellenlängen, spielen in dieser Hinsicht eine wichtige Rolle [19]. Die Untersuchung des diagnostischen Potentials lichtoptischer Systeme zur Detektion von Karies im niedrigeren Nahinfrarotspektrum zwischen 780- 850 nm ist daher von großem Interesse.

Die Originalarbeiten, die in der vorliegenden Habilitationsschrift zusammengefasst und diskutiert werden, untersuchten die lichtoptischen Eigenschaften von gesundem und erkranktem Schmelz und Dentin mit besonderem Fokus auf die Transillumination und Reflexion mit Licht aus dem niedrigen Nahinfrarotbereich ($\lambda=780\text{--}850\text{ nm}$). Etablierte und neuartige Methoden zur Kariesdetektion mittels nahinfraroten Lichts wurden hinsichtlich ihrer Reliabilität und diagnostischen Leistung in Form von In-vivo- und In-vitro-Studien untersucht und miteinander verglichen.

2. Eigene Publikationen

Im Folgenden werden 15 Originalarbeiten vorgestellt, die in englischsprachigen, „peer-reviewed“ Fachzeitschriften mit Impact-Faktor (IF) veröffentlicht wurden. Zunächst werden die Originalarbeiten genannt, die von Validierungsstudien diagnostischer Systeme berichten. Dabei werden erst die Originalarbeiten zur Anwendung der Nahinfrarot-Transillumination an Approximal- und Okklusalfächen und darauffolgend die Arbeiten zur Anwendung der Nahinfrarot-Reflexion und der Bissflügelröntgentechnologie an Approximalflächen zusammengefasst. Anschließend werden die Arbeiten genannt, die von grundlegenden Messungen zu optischen Eigenschaften von Schmelz und Dentin berichten.

- 2.1. Originalarbeit:** Söchtig E, Hickel R, Kühnisch J. Caries detection and diagnostics with near-infrared light transillumination: clinical experiences. Quintessence Int 2014;45 (6):531-538. (IF 2014: 1.130)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Das Ziel der Untersuchung war es die Funktion und das kariesdiagnostische Potential einer innovativen neu auf dem dentalen Markt vorgestellten Intraoralkamera mit Transilluminationstechnik (Diagnocam, KaVo, Biberach) zu überprüfen.

Material und Methode: Diese Untersuchung schloss 130 jugendliche und erwachsene (Alter > 12 Jahre) Patienten mit vollständiger permanenter Dentition ein. Alle Patienten wurden zahnärztlich visuell und röntgenologisch (bei vorliegender rechtfertigender Indikation) mittels digitalen Bissflügelröntgenaufnahmen untersucht. Mit Hilfe des Kamerasystems zur Nahinfrarot-Transillumination wurden Aufnahmen nicht restaurierter approximaler und okklusaler Oberflächen aller Seitenzähne angefertigt. Das System nutzte nahinfrarotes Licht einer Wellenlänge von 780 nm. Von den Studienpatienten zeigten 85 Probanden nicht restaurierte Primärläsionen im Dentin mit der Indikation zur invasiven Therapie. Die zugrundeliegende Diagnose leitete sich aus den jeweiligen Befunden der visuellen und röntgenologischen Untersuchung ab. Die Bewertung der einzelnen Untersuchungsmethoden erfolgte für die visuelle Inspektion anhand den Kriterien des „International Caries Diagnosis and Assessment System“ [5] und dem „Universal Scoring System for Caries Detection and Diagnosis“ (UniViSS) [28, 29], für die Bissflügelröntgenaufnahmen anhand der Klassifikation nach Marthaler [38] und für die Transilluminationsaufnahmen anhand einer in diesem Artikel neuvorgestellten Klassifikation für die neu vorgestellte Technik.

Ergebnisse: Eine Kreuztabelle zeigt die Korrelation zwischen Bissflügelröntgentechnologie und den Befunden der Nahinfrarot-Transillumination. Basierend auf den klinischen Erfahrungen der Forschungsgruppe bis zum damaligen Zeitpunkt wurde eine Klassifikation zur Beurteilung der Transilluminationsaufnahmen mit Fokus auf das Vorliegen approximaler Läsionen im Schmelz und Dentin vorgestellt. Als wichtigstes Ergebnis dieser Studie lässt sich formulieren, dass die Visualisierung approximaler und okklusaler Läsionen mithilfe der Nahinfrarot-Transillumination möglich war.

2. Eigene Publikationen

Schlussfolgerung: Aus den Ergebnissen dieser Untersuchung lässt sich schlussfolgern, dass mithilfe der Nahinfrarot-Transillumination bei 780 nm die Anwendung ionisierender Strahlung im klinischen Alltag reduziert werden kann.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24618570/>

2.2. Originalarbeit: Lederer A, Kunzelmann KH, Heck K, Hickel R, Litzenburger F. In vitro validation of near-infrared transillumination at 780 nm for the detection of caries on proximal surfaces. Clin oral Investig 2019; 23 (11):3933-3940. (IF 2019: 2.812)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Ziel der vorliegenden In-vitro-Studie war es, die diagnostische Genauigkeit des diagnostischen Systems Diagnocam (KaVo, Biberach, Deutschland) zur Erkennung von approximaler Initialkaries zu ermitteln und diese mit derjenigen der digitalen Bissflügelröntgentechnik zu vergleichen. Dieses System nutzt Licht bei einer Wellenlänge von 780 nm zur Transillumination von Seitenzähnen. Als Referenzstandard diente die microcomputertomographische Analyse der Probenzähne.

Material und Methode: Sechzig gesunde und sechzig kariös veränderte nicht-kavitierte Approximalflächen humaner bleibender Molaren und Prämolaren wurden mithilfe der Nahinfrarot-Transillumination und digitaler Bissflügelröntgenaufnahmen, sowie mittels eines Mikrocomputertomographen untersucht. Die daraus resultierenden Bildbefunde wurden in zwei Zyklen mit einem Zeitintervall von mindestens zwei Wochen von zwei Untersuchern unabhängig voneinander beurteilt. Eine Kappa-Statistik (κ) diente zur Ermittlung der Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität. Eine Kreuztabelle zeigte alle Bewertungen und deren Verteilung im direkten Vergleich und erlaubte die Kalkulation von Sensitivitäts- und Spezifitätswerten. Zur Berechnung der Intraklass-Korrelationskoeffizienten (ICCs), sowie der diagnostischen Genauigkeitswerte wurden für die Bewertung der Approximalflächen drei Schwellenwerte festgelegt, nämlich gesunde Oberflächen, Schmelzdefekte und Dentinläsionen. Anhand des Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten wurden die Relationen zwischen den beiden Testmethoden und dem Referenzstandard berechnet.

Ergebnisse: Die Inter- and Intra-Untersucher-Reliabilität zeigte für alle Methoden, sowie dem Referenzstandard nahezu perfekten Übereinstimmungswerte. Der Spearman'sche Rangkorrelationskoeffizient zeigte eine starke Übereinstimmung zwischen Befunden der Nahinfrarot-Transillumination und der mikrocomputertomographischen Untersuchung (0,82). Die Beurteilungen der digitalen Bissflügelröntgenaufnahmen und der Referenzmethode erreichten dagegen eine etwas geringere Korrelation (0,73). Die ICCs zwischen Referenzstandard und Bissflügelröntgenbildern reichten von 0,20- 0,63. Die ICCs zwischen

2. Eigene Publikationen

Transilluminations- und Bissflügelröntgenaufnahmen zeigten sich in allen Kategorien höher und reichten von 0,56-0,83. Die Untersuchung mittels Nahinfrarot-Transillumination zeigte meist höhere Werte an diagnostischer Genauigkeit als die digitale Bissflügelröntgentechnologie. Schmelzläsionen wurden beispielsweise anhand der Nahinfrarot-Transillumination mit einer Sensitivität von 59 % detektiert, während dies mithilfe von Bissflügelröntgenaufnahmen nur mit 36 % Sensitivität möglich war. Auch hinsichtlich der Erkennung von Dentinkaries zeigte sich die Beurteilung von Transilluminationsaufnahmen mit circa 80 % als doppelt so sensitiv wie die der Bissflügelröntgenaufnahmen. Bei der Untersuchung mittels Nahinfrarot-Transillumination zeigte sich die Fläche unter der Isosensitivitätskurve in allen Kategorien (gesund, Schmelz- und Dentinkaries) größer als diejenigen der Untersuchung mittels Bissflügelröntgentechnologie.

Schlussfolgerung: Die Untersuchung mittels Nahinfrarot-Transillumination zeigte ein größeres diagnostisches Potential Initialkaries im Schmelz und im Dentin an Approximalflächen permanenter Seitenzähne zu erkennen als die Untersuchung mittels digitaler Bissflügelröntgentechnologie. Allerdings erlaubte diese Technik keine zuverlässige Bestimmung der Ausdehnung einer kariösen Läsion in Relation zur Zahnpulpa. Die Untersuchung mittels Nahinfrarot-Transillumination ist daher als ergänzende Maßnahme zusätzlich zur visuellen Inspektion und der Untersuchung mittels Bissflügelröntgenaufnahmen zu empfehlen.

Quelle der Originalarbeit:

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

2.3. Originalarbeit: Kühnisch J, Söchtig F, Pitchika V, Laubender R, Neuhaus KW, Lussi A, Hickel R. In vivo validation of near-infrared light transillumination for interproximal dentin caries detection. Clin Oral Investig 2016; 20 (4):821-829. (IF 2016: 2.530)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Das Ziel dieser klinischen Studie war es die diagnostische Genauigkeit der Nahinfrarot-Transillumination als neuartige nicht-ionisierende Methode zur Erkennung approximaler Dentinkaries zu untersuchen und diese mit den etablierten diagnostischen Methoden zu vergleichen.

Material und Methode: Von 85 konsekutiv ausgewählten Patienten wurden 127 permanente Molaren und Prämolaren mit approximalen Dentinläsionen ohne sichtbare Kavitäten in den Probenpool dieser Studie integriert. Die selektierten Oberflächen wurden mittels visueller Inspektion, digitaler Bissflügelröntgentechnologie und Laserfluoreszenzmessung untersucht. Außerdem wurden Befunde mittels eines Diagnostiksystems zur Nahinfrarot-Transillumination bei 780 nm (Diagnocam, KaVo, Biberach, Deutschland) erhoben. Mit Hilfe der Nahinfrarot-Transillumination wurde eine Dentinläsion dann vorausgesagt, wenn entweder eine Demineralisierung an der Schmelz-Dentin-Grenze (SDG) zusehen war (Karies-SDG) oder ein Schatten im Dentin visualisiert werden konnte (Karies-Dentin). Zur Validierung der Testmethoden wurde ein Referenzstandard entwickelt, der sich aus Informationen des klinischen Validierungsprozesses und der radiologischen Befunde zusammensetzte. Von den für diese Studie ausgewählten Läsionen wurden vor der Behandlung digitale Bissflügelröntgenaufnahmen angefertigt. Alle Läsionen wiesen eine Indikation zur minimal-invasiven Therapie auf und wurden mit direkten Kompositrestaurationen versorgt. Die exkavierten Kavitäten wurden vor der Füllungstherapie abgeformt und in Modelle aus röntgenopakem Gips überführt. Von diesen Modellen wurden ebenfalls digitale Röntgenbilder angefertigt. Mit Hilfe eines Bildbearbeitungsprogramms wurden die Röntgenaufnahmen der Gipsmodelle mit den präoperativen klinischen Bissflügelröntgenaufnahmen übereinander projiziert, um somit eine Referenz zur Schmelz-Dentin-Grenze und zur Pulpahöhle ermitteln zu können. Anhand einer Kreuztabelle wurden die wichtigsten diagnostischen Ergebnisse in Bezug auf die validierte Kariestiefe angezeigt. Die statistischen Analysen umfassten deskriptive Analysen und Berechnungen von Sensitivitäts-, Spezifitäts- und der Fläche unter der Kurve (AUC-Werten).

2. Eigene Publikationen

Ergebnisse: Von den 127 Läsionen wurden 94 periphere Dentin und 33 tiefe Dentinläsionen gemäß dem Referenzstandard eingestuft. Keine der einbezogenen Stellen war kariesfrei oder zeigte nur Schmelzbeteiligung. Die Merkmale nach Eröffnung der Läsionen unterhalb der Schmelz-Dentin-Grenze im Hinblick auf das Ausmaß der validierten Karies wurden in einer separaten Tabelle aufgeführt. Die diagnostische Genauigkeit zur Erkennung von Dentinkaries betrug 1,6 % für die visuelle Inspektion, 66,7 % für die Laserfluoreszenz, 96,1 % für die digitale Bissflügelröntgentechnik. Für die Transillumination betrug sie 29,1 % hinsichtlich der Erkennung an der Schmelz-Dentin-Grenze, Karies-SDG, und 99,2 % hinsichtlich der Erkennung im Dentin, Karies-Dentin. Die Bewertung der Bissflügelröntgenaufnahmen (Az 0,984) und Befunde von Karies-SDG (Az 0,992) zeigten ähnlich gute Az-Werte.

Schlussfolgerung: In Anbetracht des Fehlens echter Negativbefunde in dieser klinischen Studie erreichte die diagnostische Genauigkeit der Nahinfrarot-Transillumination bei der Erkennung von approximaler Dentinkaries das gleiche Niveau wie die Bissflügelröntgentechnologie. Diese Studie deutet darauf, dass die Nahinfrarot-Transillumination die Anwendung ionisierender Strahlung in Form von Bissflügelröntgenaufnahmen zur Kariesdiagnostik reduzieren könnte.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/26374746/>

2.4. Originalarbeit: Stratigaki E, Jost FN, Kühnisch J, Litzenburger F, Lussi A, Neuhaus KW J. Clinical validation of near-infrared light transillumination for early proximal caries detection using a composite reference standard. J Dent 2020;103S:100025. (IF 2020: 2.44)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Ziel dieser prospektiven klinischen In-vivo-Studie war es ein diagnostisches System zur Nahinfrarot-Transillumination zur Erkennung approximaler kariöser Läsionen zu validieren und die diagnostische Leistung mit derjenigen der Bissflügelröntgentechnologie zu vergleichen.

Material and Methode: Insgesamt wurden 116 proximale Oberflächen permanenter Seitenzähne ohne ausgedehnte Kavitation ausgewählt und mittels digitaler Bissflügelröntgentechnologie sowie Nahinfrarot-Transillumination (Diagnocam, KaVo, Biberach, Deutschland) untersucht. Nach der klinischen Untersuchung wurden die Zähne, deren proximale Oberflächen entweder gesund erschienen oder Anzeichen nicht kavittierter kariöser Läsionen aufwiesen, mit einem kieferorthopädischen Separationsgummi für 24 h separiert. Nach Entfernung des Separators wurde eine Silikonabformung der selektierten separierten Zahnoberflächen genommen. Zusätzlich wurden die Oberflächen direkt visuell untersucht. Die statistische Analyse umfasste Kreuztabellen und die Berechnung von Sensitivität, Spezifität und AUC-Werten, sowie der Untersucher- Reliabilität.

Ergebnisse: Die Sensitivität der Nahinfrarot-Transillumination für die Erkennung von Läsionen in der äußeren Schmelzhälfte lag bei 92 % und für Läsionen in der inneren Schmelzhälfte und der äußeren Dentinhälfte bei 100 %. Für die digitale Bissflügelröntgentechnologie ergaben sich Sensitivitätswerte von 81 % für Läsionen in der äußeren Schmelzhälfte, 74 % für Läsionen in der inneren Schmelzhälfte und 100 % für Läsionen in der äußeren Dentinhälfte. Die Nahinfrarot-Transillumination zeigte niedrige Spezifitätswerte für Schmelzkaries und nahezu perfekte Werte für Dentinkaries, während diese für die Bissflügelröntgenaufnahmen konstant höher, teilweise doppelt so hoch, waren. Die Intra-Untersucher-Reliabilität steigerte sich für beide Untersucher von der Erstuntersuchung (0,68 und 0,62) bis zum Recall-Termin (0,89 bzw. 0,76).

Schlussfolgerung: Die diagnostische Leistung der Nahinfrarot-Transillumination zur Detektion von Schmelzkaries war mit derjenigen der Bissflügelröntgentechnologie

2. Eigene Publikationen

vergleichbar. Nahinfrarot-Transillumination könnte als nützliches und zuverlässiges Instrument in der klinischen Praxis angesehen werden. Allerdings könnte das Kariesmonitoring von Schmelzläsionen mit dieser Methode Ungenauigkeiten aufweisen, da hier geringe Spezifitätswerte vorliegen und eine Tendenz zu falsch-positiven Bewertungen nachgewiesen wurde. Es wird daher empfohlen, Behandlungsentscheidungen nicht allein auf der Grundlage der Transilluminationsaufnahmen zu treffen. Diese Studie weist darauf hin, dass die Nahinfrarot-Transillumination für das Routine-Screening von Patienten verwendet werden kann. Allerdings bleibt die Verwendung der Bissflügelröntgentechnologie für Behandlungsentscheidungen weiterhin wichtig.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34059307/>

- 2.5. Originalarbeit:** Lederer A, Kunzelmann KH, Hickel R, Litzenburger F. Transillumination and HDR imaging for proximal caries detection. J Dent Res 2018;97(7):844-849. (IF 2018: 5.125)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Diese Untersuchung zielte darauf ab ein In-vitro-Modell für die Validierung der Nahinfrarot-Transillumination zur Erkennung von Approximalkaries zu entwickeln. Die Nahinfrarot-Transillumination sollte hierbei zusätzlich mithilfe von High-Dynamic-Range-Imaging (HDRI) Technik verbessert werden. Beide Methoden wurden unter Verwendung der Mikrocomputertomographie als Referenzstandard untereinander verglichen und validiert.

Material und Methode: Beide Approximalflächen von 53 gesunden oder kariösen humanen permanenten Molaren oder Prämolaren wurden mit einem kommerziell erhältlichen Diagnostikgerät (Diagnocam, KaVo, Biberach, Deutschland) und einem In-vitro-Modell zur Nahinfrarot-Transillumination kombiniert mit HDRI-Technik untersucht. Dieses eigens entwickelte In-vitro-Modell verwendete HDRI-Technik, um unter- und überbelichtete Bildbereiche zu reduzieren. Hierfür wurde eine Belichtungsreihe aus 13 Einzelaufnahmen verschiedener Belichtungszeiten aufgenommen, die anschließend zu einer einzigen HDRI-Aufnahme zusammengefügt wurden. Die Bildbefunde wurden jeweils nach der Tiefe der Läsion anhand eines Kategorisierungsschemas mit Bewertungsoptionen zwischen 0-4 beurteilt. Dieses Kategorisierungsschema wurde bereits in vorangegangenen Originalarbeiten publiziert [52]. Alle Oberflächen wurden in zwei Beurteilungszyklen von zwei geschulten Untersuchern evaluiert. Diese Beurteilung wurde für beide Testmethoden als auch für die Referenzmethode, die mikrocomputertomographische Analyse, durchgeführt. Anhand einer Kappa-Statistik wurde die Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität und die Übereinstimmung zwischen beiden Testmethoden berechnet. Die Sensitivitäts- und Spezifitätswerte für die drei Schwellenwerte „gesund“, Schmelz- und Dentinkaries wurden kalkuliert.

Ergebnisse: Die Inter-Untersucher-Reliabilität (gewichtetes Kappa, κ_w) zeigte eine sehr gute Übereinstimmung für die Untersuchung mit beiden Testmethoden (0,96). Die Gesamtübereinstimmung war ebenfalls nahezu perfekt (0,85). Die Nahinfrarot-Transillumination mit und ohne HDRI-Technik zeigte Sensitivitäts- und Spezifitätswerte für die Detektion gesunder Oberflächen in einem Bereich zwischen 0,79 bis 0,96. Für die Detektion

von Schmelzläsionen ergab sich eine Sensitivität von 0,57 und 0,62 und eine Spezifität 0,93-0,92. Dentinläsionen wurden mit einer Sensitivität von 0,82 und 0,72, sowie mit einer Spezifität von 0,98 und 0,99 erkannt. Die Nahinfrarot-Transillumination in Kombination mit der HDRI-Technik zeigte sich im Vergleich zur herkömmlichen Transillumination mittels Diagnocam als die etwas sensitivere Methode für gesunde Oberflächen und Schmelzläsionen, sowie als spezifischer für Dentinkaries.

Schlussfolgerung: Hinsichtlich der generierten Bilder ermöglichte die HDRI-Technik die Erkennung von Karies in einem größeren Lumineszenz Spektrum, was zu einer detaillierteren Visualisierung von Strukturen ohne Unter- oder Überbelichtung führte. Allerdings wurde die Diagnostik durch HDRI-Technik dadurch nicht signifikant verbessert. Die Differenzierung zwischen einer fortgeschrittenen Schmelzdemineralisierung und einer Dentinläsion scheint eine Schwierigkeit darzustellen, die spezifisch für die Nahinfrarot-Transillumination ist, und die mithilfe von HDRI-Technik nicht ausgeglichen werden kann.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29481761/>

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

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Ziel dieser In-vitro-Studie war es, die Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität der digitalen Bissflügelröntgentechnologie und der Nahinfrarot-Transillumination für die Erkennung und Beurteilung von Approximalkaries im Seitenzahnbereich permanenter Molaren und Prämolaren zu analysieren.

Material und Methode: Das in dieser prospektiven klinischen Studie verwendete Bildmaterial entstammte der unter 2.3. genannten In-vivo-Studie, zur Ermittlung der diagnostischen Genauigkeit der Nahinfrarot-Transillumination bei 780 nm, und wurde mittels eines diagnostischen Systems, Diagnocam (KaVo, Biberach, Deutschland), durchgeführt. Aus einem Pool von 85 Patienten wurden 100 Befunde von Approximalflächen permanenter Seitenzähne ohne Restaurationen selektiert, die jeweils als korrespondierende Befunde auf digitalen Bissröntgenbildern und Transilluminationsaufnahmen überlagerungsfrei dargestellt waren. Die Bildersequenzen wurden anhand röntgenologischer Kriterien so zusammengestellt, dass eine ausgewogene Verteilung in der Probensammlung vorlag (~1/3 gesund, ~1/3 mit Schmelzkaries und ~1/3 mit Dentinkaries). Die Bildpaare wurden unabhängig voneinander von zwölf Zahnärzten mit unterschiedlichem beruflichem Status und klinischer Erfahrung in zwei verblindeten Zyklen in einem zeitlichen Abstand von mindestens zwei Wochen ausgewertet. Die Referenzdiagnose wurde von zwei erfahrenen Zahnärzt/innen erstellt, nachdem sie alle Bilder in zwei Zyklen unabhängig voneinander befundet und im Zweifelsfall diskutiert hatten. Die statistische Analyse umfasste die Berechnung von einfachen (κ) und gewichteten Kappa-Werten ($w\kappa$) als Maß für die Zuverlässigkeit. Mittels logistischer Regression mit einem Rückwärtseliminationsmodell wurde der Einfluss der Diagnostikmethode, des Bewertungszyklus, der Zahnform (Molar oder Prämolare) und der klinischen Erfahrung auf die Reliabilität untersucht.

Ergebnisse: Insgesamt zeigte die Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität gute bis ausgezeichnete κ - und $w\kappa$ -Werte für die Bissflügelröntgentechnologie (Inter: $\kappa = 0,60/0,63$; $w\kappa$

2. Eigene Publikationen

= 0,74/0,76; Intra: $\kappa = 0,64$; $w\kappa = 0,77$) und für die Nahinfrarot-Transillumination (Inter: $\kappa = 0,74/0,64$; $w\kappa = 0,86/0,82$; Intra: $\kappa = 0,68$; $w\kappa = 0,84$). Im Rückwärtseliminationsmodell erwies sich die Nahinfrarot-Transillumination deutlich zuverlässiger als die Bissflügelröntgentechnologie.

Schlussfolgerungen: Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten eine gute bis ausgezeichnete Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität für die Erkennung von Approximalkaries mit Bissflügelröntgen- und Transilluminationsaufnahmen. Die logistische Regressionsanalyse ergab eine signifikant bessere Zuverlässigkeit für die Nahinfrarot-Transillumination. Darüber hinaus war der erste Auswertungszyklus gemäß den Referenzdiagnosen zuverlässiger.

Quelle der Originalarbeit:

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

2.7. Originalarbeit: Litzenburger F, Schäfer G, Hickel R, Kühnisch J, Heck K. Comparison of novel and established caries diagnostic methods: a clinical study on occlusal surfaces. BMC Oral Health 2021;21 (1):97. (IF 2020: 2.757)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Ziel dieser prospektiven klinischen Untersuchung war der Vergleich der diagnostischen Genauigkeit der Nahinfrarot-Transillumination, der Laserfluoreszenzmessung und der elektrischen Widerstandsmessung zur Erkennung von Okklusalkaries. Außerdem wurde das diagnostische Potential dieser diagnostischen Systeme als ergänzende Methoden zur visuellen Untersuchung analysiert. Zur Validierung wurde ein zusammengesetzter hybrider Referenzstandard verwendet.

Material und Methode: Die Okklusalflächen von 96 ersten und zweiten nicht kavitierten permanenten Molaren von 76 Patienten in einem durchschnittlichen Alter von 24,2 Jahren wurden mittels visueller Inspektion (ICDAS) und digitaler Bissflügelröntgenaufnahmen untersucht. Weiterhin wurden die Oberflächen mittels Nahinfrarot-Transillumination (Diagnocam, KaVo, Biberach, Deutschland), Laserfluoreszenzmessung (Diagnodent, KaVo, Biberach, Deutschland) und elektrischer Widerstandsmessung (CariesScan Pro, orange dental, Biberach, Deutschland) untersucht. Die Bissflügelröntgen- und Transilluminationsaufnahmen wurden von zwei Untersuchern in zwei Bewertungszyklen unabhängig voneinander ausgewertet. Die anderen Untersuchungen, bei denen numerische Befunde oder Scorings direkt am Patienten erhoben wurden, wurden von einem kalibrierten Zahnarzt durchgeführt. Der hybride Referenzstandard bestand aus einer nicht-operativen Validierung. Diese basierte einerseits auf den Ergebnissen von visueller Diagnostik und Bissflügelröntgenaufnahmen, und andererseits auf den Ergebnissen einer operativen Validierung, bei der die Eröffnung und direkte Tiefenbestimmung des kariösen Prozesses durchgeführt werden konnte. Diese wurde nur bei vorliegender rechtfertigender Indikation zur invasiven Therapie durchgeführt. Die statistische Analyse umfasste Kreuztabellen, die Berechnung der Sensitivität und der Spezifität sowie der Fläche unter der Isosensitivitätskurve bei drei diagnostischen Schwellenwerten, nämlich Karies im Allgemeinen, Schmelzkaries und Dentinkaries.

Ergebnisse: Die Nahinfrarot-Transillumination, die Laserfluoreszenzmessung und die elektrische Widerstandsmessung zeigten eine hohe Sensitivität für Karies im Allgemeinen

2. Eigene Publikationen

(1,00, 0,77 und 0,75) und für Dentinkaries (0,97, 0,76 , 0,64). Die Sensitivitätswerte für Schmelzkaries waren schwach (0,21, 0,11, 0,37). Die Spezifitätswerte fielen für alle Kategorien und Methoden nicht unter 65 %, außer für die Nahinfrarot-Transillumination an der Gesamtkarieserkennungsschwelle mit 27 %. Eine Kombination der Laserfluoreszenzmessung oder der elektrischen Widerstandsmessung mit der visuellen Inspektion verbesserte die diagnostische Leistung bei der Gesamt- und der Schmelzkariesschwelle. Die diagnostische Gesamtgenauigkeit betrug 65,6 % für die visuelle Inspektion, 69,8 % für die Bissflügelröntgentechnologie, 50,0 % für die Nahinfrarot-Transillumination, 53,1 % für die Laserfluoreszenzmessung und 74,0 % für die elektrische Widerstandsmessung. Die Reliabilitätsbestimmung für die Bewertung von Bissflügelröntgen- und Transilluminationsaufnahmen ergab für alle Analysen gute Übereinstimmungswerte.

Schlussfolgerungen: Die Nahinfrarot-Transillumination, die Laserfluoreszenzmessung und elektrische Widerstandsmessung zeigten unterschiedliches Potenzial, aber keine fehlerfreie diagnostische Leistung hinsichtlich der Erkennung von Okklusalkaries. Alle Testmethoden eigneten sich, um versteckte kariöse Läsionen im Dentin zu detektieren. Als Ergänzung zur visuellen Inspektion konnten die Laserfluoreszenzmessung und die elektrische Widerstandsmessung zu einer Steigerung der diagnostischen Genauigkeit beitragen.

Quelle der Originalarbeit:

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

2.8. Originalarbeit: Litzenburger F, Lederer A, Kollmuß M, Hickel R, Kunzelmann KH, Heck K. Near-infrared transillumination with high dynamic range imaging for occlusal caries detection in vitro. *Lasers Med Sci* 2020;35 (9):2049-2058. (IF 2020: 3.161)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Ziel dieser In-vitro-Studie war es, die Nahinfrarot-Transillumination mit High-Dynamic-Range-Imaging (HDRI)-Technik für die okklusale Kariesdetektion zu bewerten. Die Befunde wurden mit der visuellen Inspektion anhand des International-Caries-Detection-and-Assessment-Systems (ICDAS) und der digitalen Bissflügelröntgentechnologie verglichen.

Material und Methoden: Einundsechzig humane extrahierte permanente Molaren mit entweder intakten oder okklusal kariös befallenen Oberflächen ohne ausgedehnte Kavitationen wurden nach visuellen Kriterien aus einem großen Pool anonymisierter Zähne von Patienten aus München und dessen Umgebung selektiert. Die ausgewählten Oberflächen wurden mittels digitaler Bissflügelröntgentechnologie und Nahinfrarot-Transillumination untersucht. Letztere Untersuchung wurde mit einem Prototyp durchgeführt, der aus zwei Laserquellen (780 nm), einem CCD-Sensor zusammengesetzt war. Die entstandenen Daten wurden anschließend mit einem Bildanalyseprogramm verarbeitet. Die Mikrocomputertomographie diente als Referenzstandard. Zwei Untersucher klassifizierten die Befunde in zwei Bewertungszyklen unabhängig voneinander anhand bestimmter Systeme: die visuellen Befunde anhand von ICDAS, die Bissflügelröntgenaufnahmen anhand eines semiquantitativen Bewertungssystems nach Marthaler und die Transilluminationsaufnahmen anhand eines neu eingeführten Bewertungssystems für okklusale Oberflächen dargestellt mittels Nahinfrarot-Transillumination bei 780 nm. Für alle Auswertungen der einzelnen Methoden wurden gemeinsame Schwellenwerte für gesunde und kariöse Oberflächen sowie Schmelz- und Dentinläsionen festgelegt.

Ergebnisse: Die linear gewichtete Kappa-Analyse der Methoden im Vergleich zur Referenzmethode ergab für die Schwellenwerte kariöse Oberfläche, Schmelz- und Dentinläsion Werte von 0,59/0,08/0,12 für ICDAS, 0,37/-0,06/0,58 für die Bissflügelröntgentechnologie und 0,33/-0,01/0,51 für Nahinfrarot-Transillumination. Die Sensitivitätswerte bei den drei Schwellenwerten lagen bei 0,85/0,78/0,13 für ICDAS, 0,59/0,00/0,69 für die Bissflügelröntgentechnologie und bei 0,98/0,33/0,78 für Nahinfrarot-Transillumination. Die

2. Eigene Publikationen

Spezifitätswerte für die drei Schwellenwerte lagen bei 0,70/0,40/1,00 für ICDAS, 0,90/0,96/0,90 für BWR und 0,30/0,65/0,72 für die Nahinfrarot-Transillumination. Die Reliabilitätsanalyse ergab eine beträchtliche Übereinstimmung der Bewertung der Bissflügelröntgen- und der Transilluminationsaufnahmen jeweils untereinander und mit dem Referenzstandard.

Schlussfolgerung: Die Nahinfrarot-Transillumination kombiniert mit HDRI- Technik zeigte ein insgesamt starkes diagnostisches Potential zur Erkennung von Okklusalkaries. Allerdings zeigte diese Methode eine Tendenz zur Überschätzung der Präsenz kariöser Läsionen. Seine Stärke lag in der Detektion von Dentinläsionen. Verglichen mit ICDAS und der Bissflügelröntgentechnologie scheint diese Methode geeignet zu sein, um versteckte Dentinkaries an Okklusalfächen zu erkennen, sollte dennoch als ergänzende Methode zur visuellen Inspektion betrachtet werden.

Quelle der Originalarbeit:

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

2.9. Originalarbeit: Schäfer G, Pitchika V, Litzenburger F, Hickel R, Kühnisch J. Evaluation of occlusal caries detection and assessment by visual inspection, digital bitewing radiography and near-infrared light transillumination. Clin Oral Investig 2018;22 (7):2431-2438. (IF 2018: 2.587)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Das Ziel dieser Untersuchung war es die diagnostischen Ergebnisse der visuellen Inspektion, der digitalen Bissflügelröntgentechnologie und der Transillumination mit Nahinfrarotlicht bei 780 nm (Diagnocam, KaVo, Biberach, Deutschland) zur Erkennung und Beurteilung von Okklusalkaries permanenter Seitenzähne miteinander zu vergleichen.

Material und Methode: Diese Studie umfasste 203 gesunde jugendliche und vorwiegend erwachsene Patienten mit einem Durchschnittsalter von 23,0 Jahren. Alle Personen erhielten eine sorgfältige visuelle Inspektion aller Zähne, die die Bewertung der okklusalen Oberflächen der Molaren mittels ICDAS beinhaltet. Zusätzlich wurden Bissflügelröntgenaufnahmen und Nahinfrarot-Transilluminationsaufnahmen der Seitenzähne angefertigt. Alle Bissflügelröntgen- und Transilluminationsaufnahmen wurden in verblindeten Beurteilungszyklen von zwei Untersuchern hinsichtlich des Vorhandenseins von Schmelz- und Dentinkaries beurteilt. Die deskriptive statistische Analyse umfasste die Berechnung von Häufigkeiten, Kreuztabellen und paarweise Vergleiche mit Pearson Chi-Quadrat-Tests.

Ergebnisse: Die Studienpopulation wies gemäß den WHO-Kriterien eine moderate Karieserfahrung (3,3 DMFT und 9,3 DMFS) im gesamten bleibenden Gebiss auf. Die Mehrzahl der Schmelz- und Dentinläsionen wurden in dieser Population durch die visuelle Inspektion nachgewiesen. Der diagnostische Mehrwert in Bezug auf die Detektion der Schmelz- und Dentinläsionen an Okklusalflächen betrug 5,0 % für die Bissflügelröntgentechnologie und 6,8 % für die Nahinfrarot-Transillumination. Durch die kombinierte Anwendung von visueller Inspektion und entweder der Nahinfrarot-Transillumination oder der Bissflügelröntgentechnologie wurden 95,7 bzw. 94,4 % aller Schmelz- und Dentinläsionen an Okklusalflächen erkannt.

Schlussfolgerung: Diese vergleichende diagnostische Studie zeigte, dass mithilfe der visuellen Inspektion Okklusalkaries mehrheitlich detektiert werden konnte. Beide zusätzlichen Methoden zeigten einen begrenzten zusätzlichen Nutzen. Aufgrund der wertvollen Eigenschaften der

2. Eigene Publikationen

Nahinfrarot-Transillumination, insbesondere der Röntgenstrahlenfreiheit und der einfachen wiederholbaren klinischen Anwendbarkeit, könnte diese Methode den röntgenbasierten Methoden vorgezogen werden. Bissflügelröntgenaufnahmen sollten dennoch in klinischen Situationen angefertigt werden, in denen beispielsweise der Verdacht auf insuffiziente Füllungen oder multiple (tiefe) kariöse Läsionen erhoben wird oder in denen es notwendig ist, die Kariesausdehnung in Bezug auf die Pulpa zu beurteilen. Als klinisch relevanter Aspekt dieser Untersuchung kann hervorgehoben werden, dass die visuelle Inspektion zu diesem Zeitpunkt (2018) als erstes diagnostisches Mittel der Wahl zur Detektion okklusaler Läsionen an permanenten Molaren bei erwachsenen Menschen mit geringem Kariesrisiko betrachtet werden sollte. Hierdurch können mehrfache diagnostische Tests, Überdiagnosen und Überbehandlungen vermieden werden.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29915930/>

- 2.10. Originalarbeit:** Lederer A, Kunzelmann K-H, Heck K, Hickel R, Litzenburger F. In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection. Eur J Oral Sci 2019;127 (6):515-522. (IF 2019: 2.220)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Das Ziel dieser In-vitro-Untersuchung war es die diagnostische Genauigkeit eines neuartigen Diagnostiksystems, nämlich der VistaCam iX HD (Dürr Dental, Bietigheim-Bissingen, Deutschland), zur Erkennung von Approximalkaries zu analysieren. Dieses Intraoral-Kamera-System bietet durch einen Wechselkopfmeechanismus die Option kariöse Läsionen an Approximalflächen mittels Nahinfrarot-Reflexion bei 850 nm zu visualisieren. Diese Form der Nahinfrarot-Reflexion wurde im Rahmen dieser Studie mit der digitalen Bissflügelröntgentechnologie unter Verwendung von Mikrocomputertomographie als Referenzstandard verglichen.

Material und Methode: Einhundert gesunde und kariöse Approximalflächen von 100 humanen permanenten Seitenzähnen wurden nach visuell-taktilen Kriterien ausgewählt. Mittels Nahinfrarot-Reflexion und Bissflügelröntgentechnik wurden Aufnahmen dieser Oberflächen erstellt. Alle Proben wurden mit einem Mikrocomputertomographen zur Erstellung eines Referenzstandards gescannt. Die Evaluation aller resultierenden Bildbefunde wurden von zwei Untersuchern unabhängig voneinander zweimal in zwei Beurteilungszyklen im Abstand von zwei Wochen durchgeführt. Diese Evaluation erfolgte für die mikrotomographischen Daten sowie für die Bissflügelröntgenaufnahmen anhand eines semiquantitativen Beurteilungssystems mit Einteilung in gesunde Oberflächen, in kariöse Läsionen in der äußeren oder inneren Schmelzhälfte und in Dentinläsionen. Die Reflexionsaufnahmen wurden anhand folgender Kriterien evaluiert: Unversehrtheit, Karies auf den Schmelz begrenzt, Karies mit einseitigem Kontakt zur Schmelz-Dentin-Grenze, Karies mit ausgedehntem Kontakt zur Schmelz-Dentin-Grenze und Karies sichtbar im Dentin. Dieses Bewertungssystems bestand bereits für die Transillumination und wurde im Rahmen dieser Untersuchung erstmals auf die Befunde der Reflexion angewendet [52]. Für alle Methoden wurden Schwellenwerte für gesunde Oberflächen, Schmelz- und Dentinläsionen bestimmt und in einer Tabelle nebeneinandergestellt. Für die statistische Auswertung wurde die Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität mit einem linear gewichteten Kappa (κ) kalkuliert. Außerdem wurden die diagnostische Gesamtgenauigkeit, sowie die Sensitivitäts- und Spezifitätswerte der

Testmethoden im Bereich der drei Schwellenwerte gesunde Oberflächen, Schmelz- und Dentinkaries ermittelt.

Ergebnisse: Die Auswertung der Bissflügelröntgen- und Reflexionsaufnahmen zeigte eine mäßige Sensitivität für Karies im Allgemeinen zwischen 50 und 53 %. Für die Detektion von Schmelzläsionen erwies sich die Sensitivität als noch geringer zwischen 13 und 31 %. Dentinkaries wurde von beiden Testmethoden mit einer Sensitivität von 55 % detektiert. Die Spezifität dagegen war in allen Kategorien für beide Methoden hoch. Auch die Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität zeigte für beide Testmethoden nahezu perfekte Werte. Die Bewertung der Approximalflächen mittels Nahinfrarot-Reflexion wurde durch Lichtartefakte, wie Überbelichtung, erschwert, wodurch etwa 25 % der Bilder nicht eindeutig interpretierbar waren.

Schlussfolgerung: Nahinfrarot-Reflexion und Bissflügelröntgentechnik erwiesen sich als reproduzierbare Methoden mit vergleichbarer diagnostischer Genauigkeit. Aufgrund von Problemen mit der Bildqualität und Artefakten kann die Nahinfrarot-Reflexion mit dem hier getesteten Gerät jedoch nicht als ergänzende diagnostische Methode zur Detektion von Approximalkaries in permanenten Molaren empfohlen werden.

Quelle der Originalarbeit:

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

2.11. Originalarbeit: Litzenburger F, Heck K, Kaisarly D, Kunzelmann KH. Diagnostic validity of early proximal caries detection using near-infrared imaging technology on 3D range data of posterior teeth. Clin Oral Investig 2022; 26 (1):543-553 (IF 2020: 3.573)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Diese Untersuchung zielte darauf ab das diagnostische Potenzial eines neu vorgestellten Intraoralscanners, des iTero Element 5D-Scanners (Align, San José, CA, USA), zur Früherkennung approximaler kariöser Läsionen zu analysieren. Dieser Scanner arbeitet mit einer Form der Nahinfrarot-Reflexion, bei der 3D-Entfernungsdaten von Zähnen aus Reflexionsbildern bei 850 nm zu einem dreidimensionalen Scan zusammengefügt werden. Die diagnostische Leistung des Scanners wurde mit derjenigen der Bissflügelröntgentechnologie verglichen. Die Mikrocomputertomographie diente als Referenzstandard.

Material und Methode: Zweihundertfünfzig humane permanente Seitenzähne mit und ohne primäre approximale kariöse Läsionen ohne ausgeprägte Kavitationen wurden nach visuellen Kriterien aus einem großen Pool anonymisierter extrahierter Zähne selektiert. Sie wurden paarweise angeordnet, mittels Anfertigung von Bissflügelröntgenaufnahmen und Nahinfrarot-Reflexion untersucht und mit mikrocomputertomographischer Untersuchung validiert. Die Befunde der Nahinfrarot-Reflexion wurden aus bukkaler, linguale und okklusale Richtung aufgenommen, was im Folgenden zusammenfassend als trilaterale Ansicht bezeichnet werden wird. Die Befunde wurden anhand einer Ja/Nein-Entscheidung bezüglich des Vorhandenseins approximaler Läsionen bewertet. Die Beurteilung der diagnostischen Zuverlässigkeit wurde anhand einer Kappa-Statistik (κ) berechnet. Die statistische Analyse umfasste weiterhin Kreuztabellen und die Berechnung von Sensitivitäts-, Spezifitäts- und AUC-Werten.

Ergebnisse: Die Berechnung der diagnostischen Zuverlässigkeit ergab eine hohe Inter- und Intra-Untersucher-Übereinstimmung für beide Testmethoden. Das Vorhandensein von Approximalkaries wurde mittels Nahinfrarot-Reflexion zu 24,8 % und Bissflügelröntgentechnik zu 26,4 % unterschätzt. Die Evaluation unter Einbeziehung rein okklusale Reflexionsaufnahmen führte in 10,4 % zu einer Überschätzung, während die trilaterale Ansicht in 15,6 % zu einer Überschätzung führte. Die Auswertung der Bissflügelröntgenaufnahmen dagegen führte zu keinerlei Überschätzung von Approximalkaries. Die trilaterale Ansicht der Reflexionsbefunde zeigte eine

2. Eigene Publikationen

Gesamtgenauigkeit von 64,8 %, während die einseitige Betrachtungsweise hier 76,8 % Gesamtgenauigkeit aufwies. Die Nahinfrarot-Reflexions- und die Bissflügelröntgenaufnahmen zeigten beide eine hohe Spezifität und eine geringe Sensitivität für die Erkennung von Approximalkaries.

Schlussfolgerung: Die Nahinfrarot-Reflexion zeigte eine diagnostische Genauigkeit, die mit der der Bissflügelröntgentechnologie vergleichbar war. Die trilaterale Ansicht der Reflexionsbefunde führte zu einer stärkeren Überschätzung der Präsenz approximaler kariöser Läsionen und zeigte eine höhere Sensitivität für Initialkaries im Vergleich zur Bissflügelröntgenaufnahme. Als klinisch relevanter Aspekt dieser Untersuchung kann formuliert werden, dass die Nahinfrarot-Reflexion mittels 3D-Entfernungsdaten von Zähnen, bestehend aus Reflexionsbildern erzeugt bei 850 nm, eine valide Ergänzung zur Bissflügelröntgenaufnahme als diagnostisches Instrument zur Kariesfrüherkennung an Approximalflächen von Molaren und Prämolaren darstellen kann. Die Untersuchung aus mehreren Blickwinkeln, die trilaterale Ansicht der Befunde, zeigte allerdings keine statistisch signifikante Steigerung für die Erkennung von Approximalkaries mithilfe der Nahinfrarot-Reflexion.

Quelle der Originalarbeit:

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

- 2.12. Originalarbeit:** Heck K, Litzenburger F, Geitl T, Kunzelmann KH. Near-infrared reflection at 780 nm for detection of early proximal caries in posterior permanent teeth in vitro. Dentomaxillofac Radiol 2021;50 (6):20210005. (IF 2020: 2.419)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Das Ziel dieser Untersuchung war es, die diagnostische Genauigkeit eines In-vitro-Modells zur Nahinfrarot-Reflexion bei 780 nm zu analysieren und diese mit derjenigen der Bissflügelröntgentechnik zu vergleichen. Das In-vitro-Modell wurde so konstruiert, dass eine Untersuchung von Interdentalräumen von permanenten Seitenzähnen zur Approximalkariesdetektion von drei verschiedenen Zahnoberflächen, nämlich aus okklusaler, bukkaler und oraler Richtung, ermöglicht wurde. Die Untersuchung sollte klinisch relevante Bedingungen genau simulieren. Als weitere Testmethode diente die Bissflügelröntgentechnik. Zur Validierung der Approximalflächen wurden die Zähne mikrocomputertomographisch untersucht.

Material und Methode: Zweihundertfünfzig humane gesunde und kariös veränderte nicht kavitierte permanente Zähne wurden aus einem großen Probenpool extrahierter Zähne anonymisierter Patienten aus München und deren Umgebung selektiert. Es wurde jeweils eine proximale Oberfläche jedes Zahnes nach visuellen Kriterien ausgewählt, die dann in die finale Probensammlung integriert. So wurde eine Probensammlung mit einer Kariesprävalenz von annähernd 50 % erstellt. Alle Oberflächen wurden mittels Nahinfrarot-Reflexion und Bissflügelröntgentechnik untersucht. Die Evaluation der Reflexions-Aufnahmen erfolgte anhand einer Ja/Nein-Entscheidung in Abhängigkeit des Vorhandenseins einer kariösen Läsion. Diese Form der Evaluation war notwendig, da die Schmelz-Dentin-Grenze in den Reflexionsaufnahmen mehrheitlich nicht visualisiert werden konnte, wodurch sich eine Differenzierung der Befunde in Schmelz- und Dentinkaries als unmöglich gestaltete. Alle Bewertungen der Befunde in Reflexions- und Bissflügelröntgenaufnahmen und der Mikrocomputertomographie wurden von zwei Untersuchern unabhängig voneinander in zwei Evaluationszyklen mit zwei Wochen Abstand in randomisierter Reihenfolge evaluiert. Eine Kreuztabelle zeigte die Korrelationen aller Befunde zueinander. Die statistische Analyse umfasste die Berechnung von Sensitivitäts-, Spezifitäts- und AUC-Werten. Außerdem wurde die Untersuchung der Inter- und Intra-Untersucher- Reliabilität anhand einer Kappa-Statistik (κ) ermittelt.

Ergebnisse: Das Vorhandensein kariöser Läsionen wurde mittels Nahinfrarot-Reflexion zu 26,0 % und mittels Bissflügelröntgentechnik zu circa 32,8 % unterschätzt. Überschätzt wurde der kariöse Befall mittels Nahinfrarot-Reflexion zu 10,0 % und mittels Bissflügelröntgentechnik zu circa 0,4 %. Die Bewertung der Approximalflächen aus den drei verschiedenen Blickwinkeln zeigte eine diagnostische Gesamtgenauigkeit von 67,2 %, eine Unterschätzung von 13,6 % und eine Überschätzung von 19,2 %. Die Nahinfrarot-Reflexion zeigte außerdem eine Sensitivität von 63 % und eine Spezifität von 70 %, während die Auswertung von Bissflügelröntgenaufnahmen eine Sensitivität von 27 % und eine Spezifität von 100 % für die Erkennung von Approximalkaries aufwies.

Schlussfolgerung: Reflexion im niedrigeren nahinfraroten Spektrum allein erwies sich als nicht geeignet, um initiale proximale Läsionen zuverlässig erkennen zu können. Auch die Anwendung eines idealen Aufbaus mit optimierten In-vitro-Bedingungen oder die Beurteilung der Bildbefunde aus drei verschiedenen Richtungen, konnten deren diagnostische Genauigkeit nicht signifikant steigern. Eine mangelhafte Darstellbarkeit der Schmelz-Dentin-Grenze mit dieser Methode, sowie zahlreiche Reflexionsartefakte erschwerten die visuelle Differenzierung von Schmelz- und Dentingeweben und sich darin erstreckenden kariösen Prozessen.

Quelle der Originalarbeit:

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

2.13. Originalarbeit: Heck K, Litzenburger F, Ullmann V, Hoffmann L, Kunzelman. In vitro comparison of two types of digital sensors for proximal caries detection validated by microcomputed tomography. Dentomaxillofacial Radiology 2021; Dentomaxillofac Radiol 50 (3):20200338. (IF 2020: 2.419)

Zusammenfassung:

Zielsetzungen: Ziel dieser Untersuchung war die Analyse und der Vergleich der diagnostischen Genauigkeit zweier intraoraler digitaler Röntgensensoren hinsichtlich der Erkennung von Approximalkaries in bleibenden Molaren und Prämolaren. Der Fokus lag auf dem Vergleich verschiedener Sensortechnologien, nämlich der sogenannten ladungsgekoppelten (charged-coupled device= CCD) und der Halbleiter (Complementary metal-oxide-semiconductor =CMOS) Sensortechnologie. Die Mikrocomputertomographie diente hierbei als Referenzstandard.

Material und Methode: Zweihundertfünfzig restaurationsfreie Seitenzähne wurden aus einem großen Probenpool humaner extrahierter Zähne anonymisierter Patienten selektiert. Anhand von ICDAS wurden deren Approximalflächen in direkter Aufsicht visuell evaluiert, um eine ausgewogene Probensammlung mit einer Kariesprävalenz von 50 % zu erhalten. Die Zähne wurden in einem eigens entwickelten und dreidimensional gedruckten Phantom unter Berücksichtigung randomisiert ausgewählter Nachbarzähne montiert. Alle Bissflügelröntgenaufnahmen wurden unter Verwendung dieses Röntgenphantoms mit einem CCD-Sensor bei einer Belichtungszeit von 0,08 s sowie einem CMOS-Sensor bei zwei verschiedenen Belichtungszeiten, nämlich 0,08 und 0,12 s, durchgeführt. Zur Bewertung der Bildbefunde wurden alle diagnostischen Entscheidungen von zwei Untersuchern unabhängig voneinander mit einem angemessenen Zeitabstand wiederholt. Für die statistische Analyse wurden für alle Methoden drei diagnostische Schwellenwerte festgelegt und deren Korrelationen anhand einer Kreuztabelle dargestellt. Sensitivitäts-, Spezifitäts- und AUC-Werte sowie die diagnostische Gesamtgenauigkeit wurden berechnet und miteinander verglichen. Die diagnostische Zuverlässigkeit der Bildbefunde wurde anhand einer linear gewichteten Kappa-Statistik bewertet.

Ergebnisse: Die Gesamtgenauigkeit zwischen dem Referenzstandard und den verschiedenen Sensoren und Belichtungszeiten lag bei 63,1 % für den CCD-Sensor und bei 67,1 % für den

2. Eigene Publikationen

CMOS-Sensor bei 0,12 s und 70,7 % für den CMOS-Sensor bei 0,08 s. Für alle Untersuchungsbedingungen wurden bei allen Schwellenwerten hohe Spezifitäts- aber niedrige Sensitivitätswerte gefunden. Vergleiche der AUC-Werte ergaben keinen signifikanten Unterschied zwischen den Sensortypen und den jeweiligen Belichtungszeiten. Die linear gewichtete Kappa-Analyse ergab eine nahezu perfekte Übereinstimmung für alle Bewertungen.

Schlussfolgerung: Es konnte kein signifikanter Unterschied der diagnostischen Leistung hinsichtlich der Erkennung von Approximalkaries zwischen den verschiedenen Sensortypen und Belichtungszeiten festgestellt werden. Die von den Herstellern empfohlene längere Belichtungszeit führte nicht zu einem signifikanten diagnostischen Vorteil.

Quelle der Originalarbeit:

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

- 2.14. Originalarbeit:** Hoffmann L, Feraric M, Hoster E, Litzenburger F, Kunzelmann KH. Investigations of the optical properties of enamel and dentin for early caries detection. Clin Oral Investig. 2021 Mar;25(3):1281-1289. (IF 2020:2.812)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Ziel dieser Untersuchung war die experimentelle Untersuchung des Potenzials verschiedener Lichtwellenlängen zur Differenzierung zwischen gesundem und kariösem Zahnhartgewebe unter Verwendung eines Zweikreis-Goniometers.

Material und Methode: Es wurden Zahnschnitte extrahierter menschlicher Seitenzähne präpariert, die entweder kariesfrei waren ($n = 15$) oder okklusale kariöse Läsionen aufwiesen ($n = 10$). Diese Zahnscheiben wurden mit dem Licht von Diodenlasermodulen verschiedener Wellenlängen ($\lambda=532, 650$ und 780 nm) bestrahlt. Das transmittierte und gestreute Laserlicht wurde mit einem auf einem Zweikreisgoniometer rotierenden Detektor räumlich gemessen. Der Anisotropiefaktor und Abschwächungskoeffizienten des Lichts konnte auf Basis der resultierenden Messdaten berechnet werden.

Ergebnisse: Der Zahnschmelz wies eine höhere Transparenz auf als das Dentingewebe und zeigte eine wellenlängenabhängige Schwächung für das Licht einer jeden gemessenen Wellenlänge. Gesundes Dentin zeigte eine starke Lichtstreuung, unabhängig von der untersuchten Wellenlänge. Die berechneten Abschwächungskoeffizienten von kariösem und gesundem Zahngewebe unterschieden sich signifikant ($p < 0,05$; t-Test). Im Gegensatz zu gesundem Zahnschmelz wies kariöser Zahnschmelz eine geringere Lichttransmission und eine höhere Streuung auf. Die Unterschiede in der Lichtabschwächung von kariösem gegenüber gesundem Dentin waren weniger ausgeprägt als bei Schmelz. Kariöses Dentin war, genau umgekehrt wie im Schmelzgewebe, transparenter als gesundes Dentin. Das Licht längerer Wellenlängen durchdrang alle Zahnhartgewebe besser als das Licht kürzerer Wellenlängen.

Schlussfolgerung: Die optischen Eigenschaften von gesundem und kariösem Schmelz und Dentin wiesen unter Verwendung von Laserlicht als Strahlenquelle bei den Wellenlängen von 532, 650, 780 nm deutliche Unterschiede auf. Während Schmelzstrukturen bei allen Wellenlängen im demineralisierten Zustand weniger Transparenz und Streuung aufweisen als im gesunden Zustand, kehrt sich dieses Verhältnis für Dentingewebe um. Im Dentin zeigten sich die Unterschiede der optischen Eigenschaften, die durch Strukturveränderungen des

2. Eigene Publikationen

Gewebes nach Demineralisierungsprozessen zu beobachten waren, deutlich weniger ausgeprägt als im Zahnschmelz. Dies ist klinisch relevant, da die klare Differenzierung zwischen gesundem und kariösem Schmelz und Dentin mittels sensibler Messtechniken eine Grundlage für die Entwicklung neuer lichtoptischer Diagnostiksysteme zur Früherkennung kariöser Läsionen darstellt.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32613436/>

- 2.15. Originalarbeit:** Berghammer K, Litzenburger F, Heck K, Kunzelmann KH. Attenuation of near- ultraviolet, visible and near-infrared light in healthy and carious enamel and dentin Clin Oral Investig 2022 (in press) (IF 2020: 3.192)

Zusammenfassung:

Zielsetzung: Ziel dieser Analyse war es, die optische Abschwächung von ultraviolettem, sichtbarem und nahinfrarotem Licht bei 405, 660 und 780 nm zu untersuchen, wenn es gesunden und kariösen Schmelz und Dentin humaner Zähne transmittiert. Die Wellenlängen wurden in Anlehnung an kommerziell erhältliche lichtoptische Diagnostiksysteme gewählt. Der Schwerpunkt dieser Untersuchung lag auf der Analyse und dem Vergleich der Abschwächungskoeffizienten dieser Gewebe, unter Mitbetrachtung der jeweiligen individuellen Zonen, in welche kariöse Läsionen je nach Tiefe strukturell eingeteilt werden können. Ein Fokus lag außerdem in dem Vergleich der Eigenschaften von gesund erscheinendem Zahnhartgewebe in der Nähe kariösbedingter Strukturveränderungen und dem Zahnhartgewebe vollkommen kariesfreier Zähne.

Material und Methode: Gemessen wurde die Transmission von gebündeltem Licht erzeugt mittels eines Diodenlasermoduls durch Schnitte gesunder und kariöser menschlicher Seitenzähne. Dank einer exakten Definition der Messpunkte wurde eine getrennte Analyse innerhalb der Mikrostruktur der Läsionen ermöglicht. Die äußere und innere Hälfte des Schmelzes (D1, D2), die transluzente Zone (TZ) innerhalb der Dentinläsionen und ihre angrenzenden Schichten, die Schmelzseite der transluzenten Zone (ESTZ) und die Pulpaseite der transluzenten Zone (PSTZ) konnten somit getrennt voneinander gemessen werden. Der Koeffizient für die Lichtschwächung wurde aus dem Verhältnis der Intensität am Detektor zur Ausgangsintensität und der Probenschichtstärke berechnet. Die Probenschichtstärke wurde nach jedem Messzyklus schrittweise von 1.000 μm auf 125 μm reduziert.

Ergebnisse: Bei Proben mit einer Schichtstärke von 125 μm zeigte die TZ bei allen getesteten Wellenlängen unterschiedliche optische Eigenschaften verglichen mit ihren angrenzenden Zonen, der ESTZ und der PSTZ sowie kariesfreiem Dentin. Mit abnehmender Wellenlänge und zunehmender Probenstärke verringerte sich dieser Effekt. Gesund erscheinendes Dentin in der Nähe kariöser Läsionen unterschied sich bei 125 μm Probendicke bei allen getesteten Wellenlängen signifikant von kariesfreiem Dentin. Während gesunder und kariöser Schmelz

ebenfalls einen signifikanten Unterschied aufwies, wiesen D1- und D2-Schmelzläsionen keinen messbaren Unterschied auf.

Schlussfolgerung: Monochromatisches Licht im Wellenlängenbereich von 405-780 nm war für die Unterscheidung von D1- und D2-Läsionen im Zahnschmelz nicht geeignet. In Zahnschnitten von 125 µm Schichtstärke zeigte das Licht das Potenzial, den Unterschied zwischen den einzelnen Schichten der Dentin-Karies, der TZ, der ESTZ und der PSTZ, aufzuzeigen. Die TZ konnte von ihren Nachbarschichten, der ESTZ und PSTZ, sowie von gesundem Dentin unterschieden werden. Anhand des Unterschieds zwischen gesundem Dentin in der Nähe kariöser Läsionen und kariesfreiem Dentin sowie des Unterschieds zwischen TZ und ESTZ ließ sich das Vorhandensein von tertiärem Dentin mit lichtoptischen Mitteln vermuten. Im Allgemeinen war der Abschwächungskoeffizient aller Gewebetypen bei niedrigeren Wellenlängen höher und nahm mit abnehmender Probenschichtstärke zu. Diese Ergebnisse änderten sich mit der Schichtstärke, weshalb diese auch zukünftig nicht unabhängig von diesen Informationen interpretiert werden sollten.

Quelle der Originalarbeit:

<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/35588022/>

3. Diskussion

3.1. Diagnostische Systeme zur Kariesdetektion an Approximal- und Okklusalflächen

3.1.1. Methodik zur Untersuchung diagnostischer Systeme zur Kariesdetektion an Approximal- und Okklusalflächen

Einige der hier aufgeführten Publikationen beruhen auf Untersuchungen, die in vitro durchgeführt worden sind. Der andere Teil beruht auf klinischen Studien. Im Folgenden werden zunächst die Besonderheiten und Unterschiede dieser Untersuchungsformen hinsichtlich ihres Studiendesigns diskutiert.

Für die In-vitro-Untersuchungen wurden extrahierte bleibende restaurationsfreie Molaren und Prämolaren anonymisierter Patienten aus München und Umgebung untersucht. Es wurden verschiedene Methoden zur Detektion von primären Läsionen an Approximal- und Okklusalflächen analysiert und mit einem soliden Referenzstandard verglichen. Neben den etablierten Methoden, wie der visuellen Inspektion und der röntgenologischen Untersuchung mittels Bissflügelröntgenaufnahmen, lag der wichtigste Fokus auf der Untersuchung diagnostischer Hilfsmethoden wie der Nahinfrarot-Transillumination und -Reflexion. Zur Untersuchung der selektierten Oberflächen unter Laborbedingungen war es notwendig für jede Testmethode ein Procedere zu entwickeln, um die In-vitro-Bedingungen so weit wie möglich den Gegebenheiten, die in vivo herrschen, anzupassen. Ziel war es mithilfe von In-vitro-Modellen die Qualität der In-vivo-Befunde nachzuahmen und deren Bildqualität bezüglich Belichtung und Auflösung weiter zu optimieren. Eine besondere Herausforderung war die Entwicklung eines Modells für die Transillumination extrahierter Molaren unter In-vitro-Bedingungen, welches das Streuverhalten des Gewebes im Laserlicht imitieren konnte, um so eine Fehlbelichtung und den sogenannten Speckle-Effekt zu vermeiden. Das Modell ahmte das Funktionsprinzip eines kommerziell erhältlichen diagnostischen Systems im klinischen Einsatz genau nach. Das Nahinfrarot-Licht wurde hierfür durch eine diffus streuende Flüssigkeit übertragen, die die optischen Eigenschaften der den Zahn umgebenden Gewebe simulierte, und weiter durch die Zahnwurzel zur Krone geleitet. Es wurden verschiedene Flüssigkeiten hinsichtlich ihrer Lichtstreuungseffekte in diesem Zusammenhang getestet, wie beispielsweise Lösungen mit Hydroxylapatit in unterschiedlichen Konzentrationen oder Milch. Die besten Ergebnisse konnten mit homogenisierter Milch mit einem Fettgehalt von 4 % erzielt werden. Die Lichtstreuung durch Partikel in einem Kolloid, wie Milch eines ist, wird als Tyndall-Effekt bezeichnet [33-35].

Im Vergleich der verschiedenen Besonderheiten, die bezüglich der digitalen Aufnahmequalität bei den Untersuchungen *in vitro* und *in vivo* eine Rolle spielten, fällt auf, dass hier teilweise völlig unterschiedliche Herausforderungen zu überwinden waren. Wie schon oben beschrieben, lagen diese Schwierigkeiten bei *In-Vitro*-Untersuchungen mehr in der Entwicklung eines validen Modell-Aufbaus, während bei klinischen Untersuchungen eher Anwendungsschwierigkeiten eine Rolle spielten. So war es bei klinischen Untersuchungen teilweise problematischer eine bestimmte Approximal- oder Okklusalfäche bestmöglich in Form einer Momentaufnahme festzuhalten, da hier Faktoren wie die anatomische Zugänglichkeit oder ausgeprägter Speichelfluss negativen Einfluss auf die Bildqualität nehmen konnten.

Auch für die Untersuchung extrahierter Zähne mittels Nahinfrarot-Reflexion war die Entwicklung spezieller *In-vitro*-Modelle notwendig. Die untersuchten Zähne wurden mesial und distal von anderen Zähnen flankiert, die willkürlich des der Studie zugrundeliegenden Probenpools entnommen worden waren, um einen Approximalkontakt zu simulieren. Dies war notwendig, da sich die Reflexionsaufnahmen gleicher Probenzähne im Rahmen der Vorversuche abhängig von dem Vorhandensein von Nachbarzähnen voneinander unterschieden. Die Bildqualität erschien bei der Untersuchung innerhalb einer geschlossenen Zahnreihe besser zu sein, als bei der Untersuchung einzeln stehender Molaren und Prämolaren [32]. Allerdings sind die Hintergründe dieses Phänomens bis heute nicht eindeutig von der Literatur benannt und analysiert worden.

Bei allen der hier vorgestellten Diagnostikstudien wurde die digitale Bissflügelröntgentechnik als Testmethode hinzugezogen, um die Ergebnisse der neuen Testmethoden mit dem Wissen über die etablierten Methoden vergleichen zu können. In ersten *In-vitro*-Studien wurden die Zähne zur Beurteilung der Approximal- oder Okklusalfächen singular mit Wurzel abgebildet geröntgt und später evaluiert [33, 35]. Wird nur ein einzelner Zahn geröntgt, kann jedoch die automatische Helligkeitsregelung der Software des Röntgengerätes, aufgrund des hohen Anteils an dunklen Hintergrundpixeln, zu einer relativen Überbelichtung des Zahns führen. Die Röntgenbilder wurden daher mit der Histogramm-Funktion eines Bildbearbeitungsprogramms überprüft, um eine Sättigung im Bereich des einzelnen Zahnes feststellen und anpassen zu können [32]. In darauffolgenden *In-vitro*- Studien konnten dann, dank der Entwicklung eines Röntgenphantoms bestehend aus dreidimensional gedruckten Haltersystemen, realitätsnahe digitale Bissflügelröntgenaufnahmen angefertigt werden und im Rahmen von Validierungsstudien angewendet werden [19, 20]. Mit der Darstellung antagonistischer Zahnquadranten wurde die Konstellation einer durchschnittlichen Bissflügelröntgenaufnahme

simuliert. Auf diese Weise wurde die Grauwertverteilung in analoger und nicht in digitaler Form homogenisiert. So wurde eine Überbelichtung durch die Belichtungsautomatik vermieden, die bei der Aufnahme vereinzelter Zähne mit viel Anteil an dunklem Hintergrund entstände.

Ein großes Problem der Bissflügelröntgentechnik hinsichtlich der Approximalkariesdetektion im Allgemeinen konnte allerdings auch anhand dieses Röntgenphantoms nicht gelöst werden. Überlagerungen, die durch benachbarte miteinander in Kontakt stehende Zähne verursacht werden, verhinderten die Beurteilung eines Großteils der Approximalflächen. Nur 20,4 % der Proben konnten ohne Überlagerungsartefakte ausgewertet werden. Diese hohe Anzahl approximaler Überlagerungen zeigte, wie deutlich das hier beschriebene Röntgenphantom die klinische Realität abbilden konnte. Dies bestätigt eine Auswertung von 697 digitalen Bissflügelröntgenaufnahmen, die aus einer Zufallsstichprobe von 4.500 anonymisierten Röntgenbildern ausgewählt wurden und die zwischen 2008 und 2019 in der Poliklinik für Zahnerhaltung in der LMU München entstanden waren. Diese Auswertung ergab, dass nur 12,3 % (n = 68) dieser Aufnahmen frei von Überlagerungen der Approximalflächen im Seitenzahnbereich waren. Es schien daher sowohl unter klinischen als auch unter Laborbedingungen schwierig zu sein, die "perfekte" digitale Bissflügelröntgenaufnahme überlagerungsfrei anzufertigen. Aus diesem Grund entschied man sich im Rahmen der hier beschriebenen In-vitro-Untersuchung, bei der Anwendung des Röntgenphantoms, eine kleine Lücke zwischen dem Probenzahn und den Nachbarzähnen zu belassen, um eine Beurteilung der betreffenden Approximalfläche in jedem Fall zu ermöglichen. Daher sollte bei der Betrachtung der Ergebnisse der Studien zur Approximalkariesdiagnostik stets beachtet werden, dass eine entsprechende Untersuchung unter In-vivo-Bedingungen aufgrund der hier genannten Artefakte mit stärkeren Einbußen der diagnostischen Genauigkeit der Bissflügelröntgentechnologie einhergehen würde.

Für die Untersuchung von Okklusalflächen spielen diese Überlagerungseffekte im Approximalbereich keine Rolle. Es zeigten sich hier andere Faktoren, die die Aussagekraft von Bissflügelröntgenaufnahmen limitierten. Laut zahlreichen Studien liegt die Spezifität der Bissflügelröntgentechnik für die Okklusalkariesdetektion im Schmelz und Dentin bei 0,70-0,87 und weist somit weitestgehend zufriedenstellende Werte auf. Die niedrige Sensitivität für die Erkennung von Schmelzläsionen jedoch, die laut Studien bei 0.35 liegt, limitiert allerdings ihre Aussagekraft bezüglich der Okklusalflächen. Das niedrige Potential zur Erkennung von Okklusalkaries ist durch Überlagerungen der anatomischen Strukturen im Höcker-Fissuren-Bereich bedingt. Der Demineralisationsgrad für eine genaue Darstellung einer Läsion genügt

in vielen Fällen aber auch gar nicht, sodass es zu einem verminderten Darstellungskontrast der Läsion und somit zu einer Unterschätzung der Kariestiefe der Läsionen kommt. Dies erklärt ebenfalls die schwächere Sensitivität für die Erkennung von Dentinläsionen von nur 0,56 an überlagerungsfrei dargestellten Approximalräumen [10, 49, 57].

Die visuelle Inspektion der Mundhöhle wird aus vielerlei Gründen weltweit als erste Methode der Wahl zur Detektion und Diagnostik kariöser Läsionen angesehen. Sie ist Teil der allgemeinärztlichen Untersuchung der Mundhöhle und stellt somit sinnvoller Weise den ersten klinischen Untersuchungsschritt beim Patienten dar. Bei den hier vorgestellten Originalarbeiten wurden die Ergebnisse der Blickdiagnostik in Form der Bewertung nach ICDAS-Kriterien stets mitberücksichtigt. Allerdings wurde eine genaue Validierung der visuellen Inspektion nur im Rahmen der Originalarbeit „Near-infrared transillumination with high dynamic range imaging for occlusal caries detection in vitro“ (2.8. Originalarbeit) geleistet. Hier wurden Okklusalfächen mittels ICDAS im Rahmen einer In-vitro-Studie von zwei Untersuchern evaluiert und anschließend mittels Mikrocomputertomographie validiert. In allen anderen Untersuchungen wurde die visuelle Inspektion aus verschiedenen Gründen nicht als gleichwertige Testmethode mit dem Indextest verglichen. Bezüglich der In-vitro-Untersuchungen zur Approximalkariesdetektion lag dies daran, dass die Rekonstruktion der ursprünglichen Nachbarzahnsituation der anonymisierten Zähne in vitro unmöglich war. Somit konnte eine entsprechende Beurteilung der Approximalflächen anhand von ICDAS nicht wie unter In-vivo-Bedingungen durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde die visuelle Untersuchung approximaler Oberflächen in direkter Aufsicht unter idealen Bedingungen durchgeführt. Diese Angaben dienten somit lediglich der Probenselektion und lieferten Informationen über die Oberflächenintegrität der untersuchten Flächen, wurden aber nicht einer eigenständigen Diagnostikmethode zugerechnet. Für In-vivo-Untersuchungen kam noch eine weitere Besonderheit hinzu. Die Ergebnisse der visuellen Inspektion bildeten hier stets einen Teil des Referenzstandards, sodass die Bewertung nach ICDAS auch hier nicht als unabhängige Testmethode betrachtet werden konnte [30, 36, 56]. Eine derartige Auswertung hätte zu einer Verzerrung der Ergebnisse und somit zu einer stark eingeschränkten Aussagekraft geführt.

Für die Untersuchung der Oberflächen extrahierter Seitenzähne spielte auch die Kariesprävalenz innerhalb der Probensammlung und die Probengröße eine wichtige Rolle. In epidemiologischen Gesundheitsstudien wurden Werte von etwa 20 % Kariesprävalenz anhand des DMF-Indexes in der Bevölkerung ermittelt [25]. Allerdings wurden in keiner der hier genannten Studien Probenpools mit 20 % Kariesprävalenz verwendet, weil bei der Zusammensetzung der Probensammlungen hier weniger die Prävalenz im epidemiologischen

Sinne eine Rolle spielte; sondern vielmehr das Verhältnis kariöser Oberflächen zu allen Oberflächen, die in einer Studie untersucht wurden. Zudem wurde bei allen Untersuchungen stets ICDAS verwendet, welches neben der bloßen Existenz einer kariösen Läsion auch ihren Schweregrad berücksichtigt. Hierdurch wurden nicht-kavitierte Läsionen mit einbezogen und somit eine Kariesprävalenz von 50 % anhand visueller Kriterien für die meisten Studien als sinnvoll erachtet. Orientiert man sich nun an der Literatur bezüglich der korrekten Größe und Zusammensetzung einer Probensammlung, so finden sich heterogene Ansätze anderer Autoren. Würde man sich ausschließlich an der statistischen Aussagekraft orientieren, wäre eine Probengröße von 30- 100 Messoberflächen für die Kalkulation der diagnostischen Genauigkeit ausreichend. Allerdings ist es bei einem so geringen Stichprobenumfang schwierig den Schweregrad der Karies zuverlässig zu bestimmen. Dies machte sich beispielsweise in der Originalarbeit „In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection“ (2.10 Originalarbeit) bemerkbar, bei der anhand von 70 Approximalflächen die diagnostische Genauigkeit eines Diagnostiksystems hinsichtlich der Detektion von Schmelz- und Dentinkaries ermittelt wurde [32]. Für vereinzelte Kategorien kam es bei dieser kleineren Anzahl an Messoberflächen zu niedrigen Fallzahlen, wodurch die statistische Aussagekraft eingeschränkt wurde. Für die zuletzt verfassten Originalarbeiten hat sich daher eine Probenanzahl von 250 Messoberflächen mit einer Kariesprävalenz von 50 % und einer ausgewogenen Verteilung zwischen den ICDAS-Kategorien 1-5 als zuverlässig und aussagekräftig erwiesen [19, 20].

Für die Validierung der Befunde der einzelnen Testmethoden wurde der Vergleich mit einem soliden Referenzstandard benötigt. Dentale Röntgenaufnahmen eigneten sich aufgrund ihrer niedrigen Sensitivitätswerte hierfür nicht. Generell sind der histologische Schnitt oder die Mikrocomputertomographie geeignete Methoden als Referenzstandard für In-vitro-Untersuchungen. Diese beiden Möglichkeiten sind allerdings nicht als gleichwertig zu betrachten, da sie jeweils Eigenheiten aufweisen. Nach einer mikrocomputertomographischen Untersuchung, wie sie in einigen der hier vorgestellten Originalarbeiten verwendet wurde, bleiben die Proben vollkommen unbeschadet und werden nicht, wie für den histologischen Schnitt, zerschnitten. Dies kann den Workflow einer Studie verbessern und die Proben stehen nach der Beurteilung noch für etwaige Nachuntersuchungen bzw. andere Analysen zur Verfügung. Noch entscheidender für die Ergebnisse diagnostischer Fragestellungen erscheint allerdings die Tatsache, dass sich mittels mikrocomputertomographischer Daten die Ebene zur Bestimmung der Kariestiefe variabel festlegen lässt. Bedenkt man, dass es sich bei einer Dentinläsion um einen dreidimensionalen, häufig asymmetrischen Prozess innerhalb des

Zahnhartgewebes handelt, so wird deutlich, dass der tiefste Punkt dieses kariösen Prozesses und dessen Lokalisation zur Pulpa häufig nicht so einfach auf einer einzelnen Schicht festzuhalten sind. Häufig muss nach diesem tiefsten Punkt gesucht werden, was bei einer histologischen Schnittführung schlechter möglich ist. Besonders bei kavitierten Oberflächen ist der Startpunkt für die Messstrecke zur Kariestiefenbestimmung schwer definierbar. In der Originalarbeit „In vitro comparison of two types of digital X-ray sensors for proximal caries detection validated by microcomputed tomography“ (2.13 Originalarbeit) wurde erstmals eine Auswertungsmethode der mikrocomputertomographischen Daten vorgestellt mit der eine präzise Tiefenbestimmung innerhalb der Schmelz- und Dentinschichten möglich war. Mit verschiedenen Funktionen des Bildbearbeitungsprogramms ImageJ wurden der Schmelz und das Dentin im dreidimensionalen Datensatz genau herausgefiltert, sodass beliebig definierte Strecken genau gemessen werden konnten. So ließ sich das diagnostische Potential der verschiedenen Hilfsmethoden viel genauer ermitteln. Es muss allerdings betont werden, dass in der Literatur noch immer heterogene Angaben bezüglich der Stärken und Limitationen der beiden Ansätze als Referenzstandard zu finden sind. Die Wahl des Referenzstandards bei diagnostischen Validierungsstudien scheint neben einer persönlichen Präferenz auch einen finanziellen Hintergrund zu beinhalten [2, 41, 53]. Die Wahl des Referenzstandards hat einen großen Einfluss auf die Ergebnisse von diagnostischen Studien *in vitro* und *in vivo*. Bei klinischen Untersuchungen an Patienten kann der Einsatz von histologischem Schnitt und mikrocomputertomographischer Untersuchung aus ethischen Gründen nur in bestimmten Konstellationen durchgeführt werden. Dies ist beispielsweise dann möglich, wenn die klinisch untersuchten Probenzähne zur Extraktion zu einem späteren Zeitpunkt bestimmt sind. In den hier vorgestellten Originalarbeiten, die auf *In-vivo*-Untersuchungen basieren, werden verschiedene Ansätze vorgestellt, die Tiefe und das Vorhandensein kariöser Läsionen ohne Mikrocomputertomographie zu referenzieren [30, 36, 56]. Jedem dieser Ansätze für einen „klinischen Goldstandard“ liegen Informationen der etablierten Diagnostikmethoden, der visuellen Inspektion und der röntgenologischen Untersuchung zugrunde. Neben der reduzierten Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die diagnostische Genauigkeit der Testmethode, besteht hierdurch auch eine gewisse Ungenauigkeit hinsichtlich der Validierung. Da sowohl die visuelle als auch die röntgenologische Untersuchung schwache Sensitivitätswerte für die Detektion nicht-kavittierter Primärläsionen aufweisen, besitzen die Werte für die diagnostische Genauigkeit dieser *In-vivo*-Untersuchungen eine eingeschränkte Aussagekraft. Es ist dennoch von Bedeutung diese Art von Untersuchungen durchzuführen, um die Stärken und Limitationen neuer Diagnostiksysteme für den klinischen Gebrauch beurteilen zu können.

Es lässt sich zusammenfassen, dass beide Studiendesigns, sowohl In-vitro- als auch In-vivo-Analysen, zur Beurteilung der diagnostischen Leistung und der klinischen Eignung diagnostischer Systeme zur Detektion von Schmelz- und Dentinkaries notwendig sind. Ihre Ergebnisse sollten immer im Kontext des jeweiligen Studiendesigns und den damit verbundenen Besonderheiten betrachtet und interpretiert werden.

3.1.2. Ergebnisse der Untersuchungen diagnostischer Systeme zur Kariesdiagnostik an Approximal- und Okklusalflächen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Originalarbeiten diskutiert, wobei der Fokus zunächst auf den Untersuchungen zur Transillumination und dann zur Reflexion liegen wird. Anschließend werden die Ergebnisse der Untersuchungen zur Bissflügelröntgentechnologie diskutiert.

Die hier vorgestellten Originalarbeiten untersuchten schwerpunktmäßig das diagnostische Potential zweier bildgebender Diagnostiksysteme zur Detektion von Primärläsionen an menschlichen Seitenzähnen, nämlich der Nahinfrarot-Transillumination und -Reflexion. Als Referenz- und Vergleichsmethoden wurden weitere Diagnostikmethoden mitbeurteilt, nämlich die etablierten Methoden, wie die visuelle Inspektion und die Beurteilung anhand von Bissflügelröntgenaufnahmen, aber auch andere diagnostische Hilfsmethoden, wie die elektrische Widerstands- oder die Laserfluoreszenzmessung. Die diagnostische Leistung der einzelnen Methoden zeigte sich in Abhängigkeit von der untersuchten Oberflächenart. So zeigte sich für die Detektion von Approximalkaries insgesamt ein anderes diagnostisches Potential als für Okklusalkaries.

Wird der Fokus zunächst auf das diagnostische Potential zur Detektion von Approximalkaries gelegt, weisen sämtliche diagnostische Systeme, die in den Originalarbeiten untersucht wurden, gute, aber nie tadellose Ergebnisse auf. Die etablierte Systemkombinationen bestehend aus der visuellen Inspektion und der Bissflügelröntgentechnologie wies diagnostische Defizite auf, die sich vor allem in Form schwacher Sensitivitätswerte für das Vorhandensein approximaler Initialläsionen zeigten, was zu einer Unterschätzung des Kariesrisikos führte.

In den Originalarbeiten "Caries detection and diagnostics with near-infrared light transillumination: clinical experiences" (2.1. Originalarbeit), „In vitro validation of near-infrared transillumination at 780 nm for the detection of caries on proximal surfaces" (2.2. Originalarbeit), „In vivo validation of near-infrared light transillumination for interproximal

dentin caries detection” (2.3. Originalarbeit) und „Clinical validation of near-infrared light transillumination for early proximal caries detection using a composite reference standard“ (2.4 Originalarbeit) wurde die diagnostische Genauigkeit eines kommerziell erhältlichen Diagnostiksystems (Diagnocam, KaVo, Biberach, Germany) (Tabelle 1) zur Detektion von Approximalkaries untersucht. Mit diesem System wurden permanente Seitenzähne mithilfe von zwei Laserdioden und Beleuchtungsarmen mit Licht von 780 nm, welches über den Alveolarknochen in die Wurzel eingeleitet wurde, durchstrahlt. Das Bild des transilluminieren Zahnes wurde dann mit einem okklusal montierten CCD-Sensors digital aufgenommen [1, 52]. Die Zahnareale wie das Dentin und kariöse Läsionen, in denen das Licht gebrochen und absorbiert wurde, stellten sich in der Transilluminationsaufnahme als dunklere Abschnitte dar und hoben sich deutlich vom sehr transparenten hellen gesunden Schmelz ab. Auf diese Weise konnten Schmelzläsionen im Approximalbereich mit hoher diagnostischer Genauigkeit detektiert werden. Die genaue Darstellung der Ausbreitung von Dentinläsionen jenseits der Schmelz-Dentin-Grenze konnte mit dieser Methode nur in Einzelfällen dargestellt werden. Die Einstufung als Karies mit Dentinbeteiligung konnte daher häufig nur indirekt über einen breitflächigen Kontakt zur Schmelz-Dentin-Grenze stattfinden. Eine Einstufung von Dentinläsionen bezüglich ihres Schweregrades konnte aufgrund der kontrastarmen Darstellungsmöglichkeiten im Dentin und der fehlenden Pulpadarstellung nicht erfolgen. Läsionen, die weiter zervikal lokalisiert waren, konnten außerdem weder im Schmelz noch im Dentin visualisiert werden. Dies begründete sich darin, dass das Licht aus dem niedrigeren Nahinfrarotbereich die dentalen Gewebe nur über eine gewisse Strecke durchdringen konnte, welche bei circa 4 mm ihren maximalen Wert erreicht hat [22]. Es wird außerdem diskutiert, dass das Patientenalter einen Einfluss auf die optischen Eigenschaften der dentalen Strukturen haben könnte. Mit zunehmendem Alter tritt eine Veränderung der Oberflächenschicht des Zahnschmelzes, beispielweise durch die Ablagerung von Pigmenten, und eine Vergrößerung der Hydroxylapatitkristalle im Schmelz auf. Es ist wissenschaftlich nicht geklärt, welchen Einfluss diese Veränderungen auf die Lichtbrechungseigenschaften des Zahns im Nahinfrarotbereich haben, weshalb zukünftige Untersuchungen zu diesem Thema von Interesse sind. Trotz der hier genannten Limitationen zeigte die Nahinfrarot-Transillumination hinsichtlich der Detektion von Schmelz- und Dentinkaries höhere Sensitivitätswerte und ähnliche Spezifitätswerte verglichen mit der Bissflügelröntgentechnologie. In der Originalarbeit “Transillumination and HDR Imaging for Proximal Caries Detection” (2.5. Originalarbeit) wurde auf Basis der Diagnocam-Methode ein In-vitro-Modell entwickelt und validiert. Dieses Modell sollte anhand von Hochkontrastbildern jene Methode verbessern und

deren Limitationen ausgleichen. Es ermöglichte die Anfertigung von Bildbefunden ohne Unter- oder Überbelichtung, was zu einer detaillierteren Visualisierung der dentalen Strukturen und der kariösen Prozesse führte. Auch wenn keine signifikante Verbesserung der diagnostischen Genauigkeit mithilfe dieses Modells festgestellt werden konnte, sollte dieser Ansatz der High-Definition-Range-Imaging-Technik für die Entwicklung zukünftiger lichtoptischer Systeme im Fokus bleiben, da es für den betrachtenden Untersucher einen komfortablen Mehrwert darstellt.

In der Originalarbeit "Inter- and intraexaminer reliability of bitewing radiography and near-infrared light transillumination for proximal caries detection and assessment" (2.6. Originalarbeit) wurde die klinische Zuverlässigkeit der Nahinfrarot-Transillumination untersucht. In dieser Untersuchung wurde anhand von Evaluationen von zwölf Zahnärzten mit verschiedener Expertise aus unterschiedlichen Städten die Reliabilität der Nahinfrarot-Transillumination, mit der von Bissflügelröntgenaufnahmen bezüglich der Approximalkariesdetektion verglichen. Auch hier erwies sich die Nahinfrarot-Transillumination der Bissflügelaufnahme leicht überlegen.

Betrachtet man nun die Untersuchungen zur Detektion von Okklusalkaries, zeigten die hier vorgestellten Originalarbeiten ebenfalls einheitliche Ergebnisse [35, 36, 48]. Die visuelle Inspektion erwies sich hier als die Methode der ersten Wahl. Darüber hinaus zeigte sich auch nach wie vor die Bissflügelröntgentechnologie als wichtigstes etabliertes Diagnostiksystem, unter anderem weil diese Methode den Zahn in der Sagittalansicht darstellte und so eine Beurteilung der Verhältnisse zwischen Schmelz-Dentin-Grenze, Pulpahöhle und kariösem Prozess ermöglichte.

In der Originalarbeit „Comparison of novel and established caries diagnostic methods: a clinical study on occlusal surfaces" (2.7. Originalarbeit) wurden verschiedene diagnostische Systeme in vivo miteinander verglichen und anhand eines zusammengesetzten Referenzstandards untereinander verglichen. Hierbei zeigten die elektrische Widerstandsmessung und die Laserfluoreszenzmessung vielversprechende Ergebnisse für die diagnostische Genauigkeit hinsichtlich der Detektion okklusaler Läsionen. Die Nahinfrarot-Transillumination zeigte nur teilweise klinisch relevante Stärken, nämlich in Bezug auf die Detektion der sogenannten versteckten „hidden“ Karies [46]. Hier zeigte sich diese Methode der visuellen Diagnostik und der Bissflügelröntgentechnologie sogar überlegen. Zwei weitere Originalarbeiten "Near-infrared transillumination with high dynamic range imaging for occlusal caries detection in vitro" (2.8. Originalarbeit) und "Evaluation of occlusal caries detection and assessment by visual inspection, digital bitewing radiography and near-infrared light transillumination" (2.9.

Originalarbeit), die das diagnostische Potential dieser Methode zur Okklusalkariesdetektion untersuchten, bestätigten diese Thesen. Eine Schwäche der Transillumination in diesem Kontext stellte die Tendenz zur Überschätzung des kariösen Befalls im Vergleich zum Referenzstandard dar. Dies begründete sich unter anderem in der Tatsache, dass okklusale intrinsische Verfärbungen und oberflächliche Demineralisationsdefekte häufig nur schwer zu differenzieren waren. Zudem mangelte es der Methode auch in diesem Fall an direkter Information bezüglich der Eindringtiefe der kariösen Läsionen in die dentalen Strukturen und deren topographische Beziehung zur Pulpa. Diese Aspekte konnten somit nur über indirekte Anzeichen anhand von Klassifikationen und deren Schwellenwerten bestimmt werden. Hinsichtlich der Detektion von Okklusalkaries mittels Nahinfrarot-Reflexion liegen keine Originalarbeiten vor. Auch in der Fachliteratur finden sich derzeit hierzu keinerlei Studien.

Es lässt sich zusammenfassend formulieren, dass die Nahinfrarot-Transillumination bei 780 nm eine vielsprechende Methode mit großem diagnostischem Potential für die Detektion approximaler und okklusaler kariöser Läsionen darstellt. In bestimmten Aspekten ist sie der Bissflügelaufnahme überlegen, weshalb diese Methode als sinnvolle Ergänzung zu den etablierten Methoden im zahnärztlichen Praxisalltag ihren Platz finden sollte.

Nachdem die Nahinfrarot-Transillumination unter Nutzung einer Intraoralkamera vielversprechend umgesetzt werden konnte, wurde auch eine kommerziell erhältliche Lösung für die Reflexion entwickelt. In der Originalarbeit „In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection“ (2.10. Originalarbeit) wird das diagnostische Potential dieses Systems (Vistacam, DürrDental, Bietigheim-Bissingen, Deutschland) untersucht. Hierbei handelt es sich um ein multifunktionales Instrument, welches nicht nur als übliche Intraoralkamera fungiert, sondern auch Okklusalkariesdetektion mittels quantitativer induzierter Fluoreszenz bei 405 nm und Approximalkariesdetektion mittels Nahinfrarot-Reflexion bei 850 nm verspricht. Bei dieser Methode reflektieren kariöse Läsionen zum Sensor zurück und sollen sich somit als hellere Areale vom dunkleren weniger reflektierenden Schmelz abheben. Zahlreiche Schwierigkeiten, die bei der Untersuchung von Approximalflächen permanenter Seitenzähne mit dieser Methode auftraten, erschwerten deren Evaluation allerdings. So war es in den meisten Fällen unmöglich, die vollständigen Approximalflächen ohne Reflexionsartefakte darzustellen. Durch das Trocknen der Oberflächen und wiederholtes Bewegen und Winkeln der Lichtquelle konnten die störenden Reflektionen zwar reduziert aber nicht verhindert werden. Außerdem, war in fast allen Reflexionsaufnahmen ein weißer Rand um den Zahn herum unterhalb der Randleiste der Okklusalfächen zu sehen, wo anscheinend das Licht aufgrund der sphärischen Form der Oberflächen stärker gebrochen wurde.

Schmelzläsionen im äußeren Bereich der Schmelzhälfte konnten unter diesem Lichtbrechungsartefakt nicht erkannt werden, weshalb betroffene Oberflächen häufig fälschlicherweise als gesund eingestuft wurden.

Ein kürzlich auf dem dentalen Markt vorgestellter Intraoralscanner, der iTero Element 5D Scanner (Align, San José, CA, USA), wurde in der Originalarbeit „Diagnostic validity of early proximal caries detection using near-infrared imaging technology on 3D range data of posterior teeth“ (2.11. Originalarbeit) hinsichtlich seiner diagnostischen Genauigkeit zur Detektion approximaler Karies untersucht. Dieser Scanner ermöglicht die Erfassung von dreidimensionalen (3D) Daten des Zahnbogens und verspricht mithilfe einer integrierten LED von 850 nm Wellenlänge die Erkennung von Approximalkaries. Die dreidimensionale Darstellung der Zähne zur Karieserkennung ist ein interessanter und vielversprechender neuartiger Ansatz. Allerdings wurde in der Originalarbeit festgestellt, dass auch bei diesem System ähnliche Reflexionsartefakte die Interpretation der Aufnahmen erschwerten. Sie konnten durch die dreidimensionale Darstellungsoption nicht eliminiert werden. In einer weiteren Originalarbeit „Near-infrared reflection at 780 nm for detection of early proximal caries in posterior permanent teeth in vitro“ (2.12. Originalarbeit) wurde ein In-vitro-Modell entwickelt und validiert, mit dessen Hilfe Approximalflächen von bukkal, okklusal und lingual mittels Reflexion untersucht werden konnten. Auch hier war eine eindeutige Beurteilung der Befunde häufig schwer. Oberflächen mit Reflexionsartefakten, die schwer beurteilbar waren, wurden in diesen Untersuchungen stets als gesund eingestuft, weil kein pathologischer Befund vorlag. Aufgrund der schweren Beurteilbarkeit vieler Befunde zeigte die Nahinfrarot-Reflexion somit eine ausgeprägte Unterschätzung der Präsenz kariöser Läsionen und folglich wurde eine sehr schwache Sensitivität für die Detektion kariöser Läsionen statistisch ermittelt. Die Nahinfrarot-Reflexion bei 850 nm erwies sich daher in keiner der Untersuchungen der Bissflügelröntgentechnik gleichwertig oder überlegen. Sie scheiterte ferner häufig daran die Schmelz-Dentin-Grenze klar zu visualisieren, weshalb eine Differenzierung zwischen Schmelz- und Dentinkaries unmöglich war. Ein interessanter Aspekt dieser Methode zeigte sich per Zufallsbefund. Risse im Bereich der dentalen Hartgewebe, die im Weißlicht unsichtbar oder schlecht erkennbar waren, konnten mit der Nahinfrarot-Reflexion deutlich visualisiert werden. Diese Eigenschaft sollte in zukünftigen Studien untersucht und validiert werden, weil sie hilfreich sein könnte pathologische Erscheinungen, wie beispielsweise das Crack-Tooth-Syndrom, erkennen und dokumentieren zu können.

Zahlreiche Quellen bestätigen die Tatsache, dass die Verwendung von Licht aus einem höheren Wellenlängenspektrum viel schärfere Kontrastdarstellungen zwischen gesundem und kariösem

Schmelz und Dentin liefern würde. Dies gilt sowohl für die Transillumination als auch die Reflexion von Zahnhartsubstanz [7, 11, 23]. Allerdings wurden bisher die zugrundeliegenden Untersuchungen nicht an ganzen Zähnen, sondern lediglich an Zahnschnitten vorgenommen. Dies kann einerseits mit einer Patentierung der Transilluminationemethode ab einer Wellenlänge von 795 nm zusammenhängen. Vermutlich liegt die Ursache für die derzeit fehlenden wissenschaftlichen Untersuchungen aber auch in den hohen Kosten für die notwendige Kameratechnologie [51]. Diese benötigt ab einem Wellenlängenbereich von 1.000 nm einen teuren Indiumgalliumarsenid-Sensor. Kameras mit Siliziumsensoren können zwar theoretisch Bilder in einem Wellenlängenbereich bis 1.100 nm funktionieren, aber die Quanteneffizienz der Geräte liegt bei ca. 800 nm und ab dieser Wellenlänge ist eine massive Verschlechterung der Bildqualität zu beobachten. Aktuelle Entwicklungen in der Sensortechnologie, sowie eine erhöhte Nachfrage an Nahinfrarotkameras für die Industrie, aber auch das aktuell zunehmende Interesse an der nahinfraroten Bildgebung für dentale und andere medizinische Anwendungen werden diese Kosten voraussichtlich zunehmend senken. Hierdurch werden die Entwicklung und die Untersuchung neuer diagnostischer Systeme, die mit höheren Wellenlängen arbeiten, in der Zukunft erleichtert werden.

In der Originalarbeit „In vitro comparison of two types of digital X-ray sensors for proximal caries detection validated by microcomputed tomography“ (2.13. Originalarbeit) wurde das diagnostische Potential von Bissflügelröntgenaufnahmen unter Verwendung zweier verschiedener Röntgensensoren, nämlich einem CCD- und einem CMOS-Sensor, unter Beachtung unterschiedlicher Belichtungszeiten untersucht. Weder die Belichtungszeiten noch die Sensortechnologie zeigten in diesem Fall einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse. Dies war ein interessantes Ergebnis, da der seit 2009 kontinuierlich vollzogene Wechsel in der Sensortechnologie von CCD- zu CMOS-Sensoren mit einer Erhöhung der Strahlendosis pro Aufnahme verbunden war. Aufgrund des Konstruktionsprinzips des CMOS-Sensortypus besteht die Empfehlung des Herstellers entweder die Belichtungszeit oder die Spannung zu erhöhen. Die Ergebnisse der Validierung anhand der detailliert ausgewerteten mikrocomputertomographischen Daten bestätigten, dass digitale Bissflügelröntgenaufnahmen unabhängig von der verwendeten Sensortechnologie nicht geeignet sind, um approximale Schmelzkaries zuverlässig erkennen zu können. Gesunde Approximalflächen dagegen wurden röntgenologisch mit hoher Spezifität identifiziert. Gelingt es, einen Zahn vollständig und überlagerungsfrei auf der Röntgenaufnahme darzustellen, ermöglicht dies dem Untersucher, nicht nur das Vorhandensein, sondern auch den Schweregrad kariöser Läsionen festzustellen und zu beurteilen. Dies ist ein Alleinstellungsmerkmal von Bissflügelröntgenaufnahmen

gegenüber lichtoptischen Methoden, weil es die Option bietet kariöse Prozesse in Bezug auf die Schmelz-Dentin-Grenze und die Pulpa mit hoher Spezifität darzustellen. Bislang konnte nicht gezeigt werden, dass es möglich ist, mit lichtoptischen Prinzipien den Schweregrad einer Läsion zuverlässig im Schmelz und im Dentin in Relation zur Pulpa zu beurteilen. Dies ist ein wichtiger Grund dafür, dass die Transillumination, trotz der teilweise sehr guten Ergebnisse hinsichtlich Reliabilität und Validität, nicht ernsthaft mit der Bissflügelröntgentechnologie als etablierteste Hilfsmethode für die Kariesdiagnose konkurrieren konnte.

3. Diskussion

Tabelle 1 Verschiedene licht-optische Diagnostiksysteme zur Detektion von Primärläsionen, die im Rahmen der hier genannten Publikationen untersucht wurden

Diagnostisches Gerät	Technologie	Wellenlänge	Untersuchte Oberfläche	Untersuchungsbedingungen
Diagnocam (KaVo, Biberach, Germany)	Trans-illumination	780 nm	Approximal- und Okklusal	In-vivo- und In-vitro
Prototyp aus eigener Entwicklung	Trans-illumination inclusive HDRI*	780 nm	Approximal	In-vitro
Vistacam (Dürr Dental, Bietigheim-Bissingen, Germany)	Reflexion	850 nm	Approximal	In-vitro
Itero Element 5D (Align, San José, CA, USA)	Reflexion mit 3D-Mapping	850 nm	Approximal	In-vitro
Prototyp aus eigener Entwicklung	Reflexion mit trilateraler Ansicht	780 nm	Approximal	In-vitro

3.2. Grundlegende Untersuchungen zu lichtoptischen Eigenschaften von gesundem und kariösem Schmelz und Dentin

Die Mikrostruktur kariöser Dentinläsionen lässt sich in verschiedene Zonen unterteilen, deren optische Eigenschaften nicht ausführlich wissenschaftlich untersucht worden sind. Die Ausbreitung von Licht in gesunder und kariöser Zahnhartsubstanz ist aufgrund deren heterogener Zusammensetzung ein komplexer Prozess [8]. Die Lichtabschwächung wird hauptsächlich durch die Streuungseigenschaften der Gewebe definiert und nimmt mit steigender Wellenlänge ab, während die Absorption durch interkristalline oder intratubuläre Flüssigkeitsansammlungen einen untergeordneten Einfluss auf die Lichtausbreitung besitzt [4, 54]. Das Hydroxylapatit des gesunden Zahnschmelzes streut das Licht nur schwach, was zu einer geringeren Schwächung führt. Das Porenwachstum, welches bei einer Demineralisierung des Zahnschmelzes zu beobachten ist, bietet zusätzliche Streuzentren, die die Lichtschwächung erhöhen. Unterschiedliche Quellen belegen, dass gesunder Schmelz eine deutlich geringere Lichtschwächung aufweist als kariöser Schmelz [7, 13]. Aufgrund der flüssigkeitsgefüllten Tubuli zeigt sich im Dentin eine gesteigerte Schwächung des Lichtes [4]. Die aktuelle Literatur liefert jedoch nur wenige Informationen über den Kontrast zwischen gesundem und kariösem Dentin. In der Originalarbeit "Investigations of the optical properties of enamel and dentin for early caries detection" (2.14. Originalarbeit) wurden die optischen Eigenschaften von gesundem und kariösem Zahnhartgewebe für einen Wellenlängenbereich von 532-780 nm mittels goniometrischer Messungen untersucht. Es konnte bestätigt werden, dass - im Gegensatz zu Schmelzgewebe - das Licht in gesundem Dentin stärker abgeschwächt wurde als in kariösem Dentin. Hier kommt es, stimuliert durch den kariösen Prozess zum Schutz vor bakteriellen Noxen, zur Obliteration der Dentinkanälchen. Die Tubulstruktur des Dentins ist maßgeblich für deren Lichtstreuung verantwortlich. Die Zunahme des peritubulären Dentins führt vermutlich zum Wegfall zweier Grenzschichten, die im gesunden Dentin für Lichtbrechung und -streuung sorgen. In der darauffolgenden Publikation "Attenuation of near-ultraviolet, visible, and near-infrared light in sound and carious human enamel and dentin" (2.15. Originalarbeit) wurde der Abschwächungskoeffizient von gesunder und erkrankter Zahnhartsubstanz sowie den einzelnen Zonen innerhalb kariöser Läsionen in ultraviolettem, sichtbarem und nahinfrarotem Licht analysiert. Die hierfür durchgeführten Transilluminationsmessungen an Zahnschnitten mit abnehmender Schichtstärke wurden in Anlehnung an gängige, derzeit kommerziell erhältliche Systeme für die lichtoptische Kariesdiagnostik mit 405, 660 und 780 nm langem Licht durchgeführt.

Aufgrund von Ergebnissen aus der der Literatur wurde für diese Untersuchung die Hypothese aufgestellt, dass die Probendicke unabhängig von der angewendeten Wellenlänge des Lichtes keinen Einfluss auf den Abschwächungskoeffizienten haben würde. Diese Annahme musste verworfen werden, da sich herausstellte, dass eine Verringerung der Schichtstärke gesunder und erkrankter Präparate mit einem Anstieg des Abschwächungskoeffizienten verbunden war. Der Koeffizient variierte stark zwischen Probendicken von 125 und 1.000 μm . Eine Normierung des Abschwächungskoeffizienten für Zahnhartgewebe mit einem allgemeinen, für alle Probendicken gültigen Einzelwert (Berechnung analog zum Lambert-Beer-Gesetz), wie in Untersuchungen anderer Autoren zuvor praktiziert, kann somit nicht empfohlen werden [4, 24]. Ein weiterer Schwerpunkt derselben Originalarbeit lag auf dem Vergleich von gesundem Schmelz und Dentin kariesfreier Präparate mit gesundem Schmelz und Dentin in der Nähe von kariösen Läsionen in kariösen Präparaten. Tatsächlich zeigte sich hier, dass bei den niedrigsten Probenstärken das vermeintlich gesunde Dentin in der Nähe von kariösem Dentin signifikante Messunterschiede zu gesundem Dentin kariesfreier Zahnschnitte aufwies. Als Grund für diese Beobachtung könnte hier die Reaktion der Pulpa auf den kariösen Stimulus genannt werden. Die höhere Flüssigkeitsansammlung der Dentintubuli könnte zu einem Ausgleich des Brechungsindex im umgebenden Dentin und wiederum zu einer geringeren Lichtstreuung führen. Die Dentintubuli nehmen mit zunehmender Entfernung von der Pulpa an Durchmesser und Anzahl deutlich ab. Diese Fakten liefern die Erklärung für die signifikant unterschiedlichen Abschwächungskoeffizienten der pulpanahen Zonen im Vergleich zu weiter entfernt liegenden Zonen von Dentinkaries. Die pulpanahe Zone gehört nicht zum eigentlichen Körper der Läsion, sondern stellt den Bereich des Dentins dar, in dem die Odontoblasten auf den Stimulus des Zahnverfalls mit der Bildung von Tertiärdentin reagieren. Somit könnte es also ermöglicht werden, die Bildung von Reizdentin anhand lichtoptischer Methoden messen zu können. Zukünftige Analysen bei höheren Wellenlängenbereichen über 1.000 nm sollten dies genauer beleuchten. Als Fazit der Originalarbeiten zu den lichtoptischen Eigenschaften von Schmelz und Dentin kann festgehalten werden, dass das diagnostische Potenzial der lichtoptischen Diagnostikverfahren noch nicht ausgeschöpft ist. Eine genauere Bestimmung des Schweregrads von Dentinläsionen ist theoretisch schon im niedrigeren Nahinfrarotspektrum möglich. Zahlreiche Quellen weisen darauf hin, dass sich dieses Potential mit steigender Wellenlänge verbessert.

4. Zusammenfassung

Die Beurteilung neuartiger Kariesdiagnostiksysteme hinsichtlich ihrer Reliabilität und Genauigkeit anhand von Daten, die in klinischen Studien und in In-vitro-Analysen gewonnen werden, ist von großer Bedeutung, um sie für moderne nicht-invasive oder minimal-invasive Behandlungskonzepte nutzen zu können. In dieser Habilitationsschrift berichten sieben Originalarbeiten von In-vitro-Studien, in denen etablierte und innovative Diagnostikmethoden mittels mikrocomputertomographischer Untersuchung validiert worden sind. Weitere sechs Originalarbeiten basieren auf Daten, die In-vivo-Studien entstammen. Der Schwerpunkt wurde auf spezielle Anwendungsformen der Transillumination und der Reflexion gelegt. Zwei weitere Originalarbeiten beschreiben Untersuchungen zu lichtoptischen Eigenschaften von gesundem und kariösem Schmelz und Dentin gemessen an Zahnschnitten im Wellenlängenbereich zwischen 400-780 nm. Die fünfzehn hier vorgestellten Originalarbeiten bilden im Überblick eine umfassende Analyse zweier vielversprechender innovativer lichtoptischer Methoden zur Detektion von okklusalen und approximalen Primärläsionen, nämlich der Nahinfrarot-Transillumination und Reflexion, und liefern Vergleichsmöglichkeiten zu den etablierten tagtäglich angewendeten Diagnostikmethoden, der visuellen Inspektion und der Bissflügelröntgenaufnahme.

Sowohl die Nahinfrarot-Transillumination als auch die Nahinfrarot-Reflexion beruhen auf demselben physikalischen Prinzip. Bei beiden Methoden wird das Licht an den durch Karies vergrößerten Poren des Zahnhartgewebes gestreut. Der Unterschied zwischen den beiden Ansätzen liegt, in der Anordnung von Lichtquelle und Detektor. Bei der Transillumination sind die Lichtquellen so gegenüberliegend am Zahn angeordnet, dass eine möglichst homogene Illumination erzeugt wird. Der Sensor ist okklusal montiert, um den transilluminierten Zahn mit möglichst wenig direkten Lichteinfall aufnehmen zu können. Bei der Reflexion dagegen sind die Lichtquelle und der Detektor nebeneinander angeordnet, sodass das reflektierte Licht vom Sensor registriert werden kann.

Die Nahinfrarot-Transillumination zeigte eine hohe diagnostische Genauigkeit, die besonders in der Früherkennung von Approximalkaries höhere Sensitivitäts- und Spezifitätswerte aufwies als die Bissflügelröntgentechnologie. Die diagnostische Inter- und Intra-Untersucher-Reliabilität zeigte mit der Bissflügelröntgentechnik vergleichbar gute Werte. Hinsichtlich der diagnostischen Genauigkeit zur Detektion okklusaler Läsionen zeigte die Nahinfrarot-Transillumination schlechtere Genauigkeitswerte gegenüber der visuellen Inspektion und Bissflügelröntgentechnologie. In der Okklusalkariesdiagnostik zeigte sich die Stärke dieser

Methode in der Detektion okklusal versteckter Dentinläsionen. Unter Miteinbeziehung aller Läsionen erwies sich dagegen die visuelle Inspektion gegenüber allen anderen Methoden als überlegen. Die Bildqualität der Transilluminationsaufnahmen konnte mit High-Definition-Range-Imaging-Technik verbessert werden, ohne dass statistisch signifikante Unterschiede zu den konventionell aufgenommenen Befunden kalkuliert werden konnten.

Die Nahinfrarot-Reflexion wurde ausschließlich im Rahmen von In-vitro-Studien untersucht und validiert. Es wurden unterschiedliche diagnostische Systeme betrachtet, die die Reflexion bei 780 oder 850 nm an permanenten Seitenzähnen zur Detektion von Approximalkaries verwendeten. Hierbei handelte es sich sowohl um kommerziell erhältliche Systeme als auch um selbstentwickelte Prototypen. Zusammenfassend wies die Reflexion im niedrigen Nahinfrarotspektrum einige Probleme hinsichtlich der Bildqualität auf. Viele vorwiegend initiale Läsionen konnten aufgrund von Reflexionsartefakten nicht visualisiert werden. Auch eine eindeutige Abgrenzung von Schmelz- und Dentingewebe war in vielen Fällen nicht möglich, sodass eine differenzierte Diagnose der Läsionen nicht gestellt werden konnte. Eine zuverlässige Erkennung von Approximalkaries war also anhand der hier untersuchten Systeme zur Reflexion nicht möglich und konnte nicht für den klinischen Gebrauch empfohlen werden. Ein vielversprechender Ansatz stellte die Kombination einer Scanner-Funktion mit der Erfassung dreidimensionaler Daten der Zahnreihen und der lichtoptischen Diagnostikfunktion dar. Diese Technik nahm den Zahn von mehreren Blickwinkeln auf und bot hiermit eine weitere Möglichkeit die Limitationen lichtoptischer Diagnostiksysteme zu reduzieren. Allerdings zeigte die Möglichkeit zur dreidimensionalen Beurteilung von Approximalflächen keinen signifikanten Benefit zur diagnostischen Gesamtgenauigkeit der Methoden im Vergleich zur eindimensionalen Beurteilung.

Beide neuartigen lichtoptischen Prinzipien, die Transillumination und die Reflexion, blieben durch einen entscheidenden Nachteil der Bissflügelröntgenaufnahme unterlegen: Sie ermöglichten nicht die Beurteilung kariöser Läsionen hinsichtlich ihrer Tiefe und ihrer Relation zur Pulpa. Dies bedeutet für den praktisch arbeitenden Zahnarzt häufig einen Informationsmangel und macht in vielen Fällen die Anfertigung von Bissflügelaufnahmen notwendig.

Im Laufe der letzten beiden Jahrzehnte vollzog sich kontinuierlicher Wechsel digitaler Röntgensensoren in der Zahnmedizin von CCD (charged coupled device)- zu CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor)- Sensoren. Es wurde kein signifikanter Unterschied in der diagnostischen Leistung zur Erkennung von Approximalkaries zwischen den

Sensortechnologien und verschiedenen Belichtungszeiten festgestellt. Das CMOS-basierte System zeigte bei längeren Belichtungszeiten subjektiv kontrastreichere Bilder, allerdings auf Kosten einer höheren Strahlendosis. Es bestätigte sich außerdem die bereits bekannte Tatsache, dass digitale Bissflügelröntgenaufnahmen nicht für eine zuverlässige Erkennung von approximaler Initialkaries geeignet sind.

Anhand von Transmissionsmessungen und goniometrischen Untersuchungen an Zahnschnitten konnte gezeigt werden, dass mit monochromatischem Licht zwischen 405 und 780 nm ein messbarer Unterschied zwischen den einzelnen Abschnitten einer Dentinkaries messbar wurde. Dieser Kontrast wurde mit steigender Wellenlänge des Lichtes deutlicher. Eine Berechnung des Abschwächungskoeffizienten analog zum Lambertbeer'schen Gesetz, wie sie in vielen anderen Studien zuvor angewendet wurde, erwies sich als unzulässig, weil sich dieser Wert in Abhängigkeit der Schichtstärke der Proben variabel zeigte. Des Weiteren konnte ein messbarer signifikanter Unterschied zwischen gesundem Dentin in der Nähe kariöser Läsionen und vollständig kariesfreiem Dentin gemessen werden. Diese Ergebnisse deuteten nicht nur auf das Vorhandensein von Tertiärdentin hin, sondern wiesen auch auf die Möglichkeit hin die Tiefe kariöser Läsionen im Dentin genauer definieren -messen- zu können.

Die Ergebnisse dieser Habilitationsarbeit zeigen, dass das diagnostische Potential der Nahinfrarot-Transillumination und -Reflexion in niedrigeren Nahinfrarotspektrum (780- 850 nm) noch nicht ausgeschöpft ist. Anhand verschiedener technischer Optimierungsansätzen könnten Reliabilität und diagnostische Genauigkeit gesteigert werden und sogar eine genauere Bestimmung des Schweregrades kariöser Läsionen könnte bei der Entwicklung zukünftiger Systeme umgesetzt werden. Die Anwendung von Wellenlängen zwischen 1.000 und 1.600 nm könnte das diagnostische Potential von Reflexion und Transillumination weiter steigern. Technischer Fortschritt entsprechender Sensoren und deren Anwendung und Weiterentwicklung in neuen Diagnostiksystemen basierend auf den lichtoptischen Eigenschaften von Zähnen sollten im Fokus zukünftiger Projekte liegen.

5. 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. 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>
3. 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
4. Chan AC, Darling CL, Chan KH and Fried D (2014) Attenuation of near-IR light through dentin at wavelengths from 1300-1650-nm. *Proc SPIE Int Soc Opt Eng* 8929:89290M. <https://doi.org/10.1117/12.2045629>
5. Clara J, Bourgeois D and Muller-Bolla M (2012) DMF from WHO basic methods to ICDAS II advanced methods: a systematic review of literature. *Odontostomatol Trop* 35 (139):5-11
6. Collaborators GBDOD, Bernabe E, Marcenes W, Hernandez CR, Bailey J, Abreu LG, Alipour V, Amini S, Arabloo J, Arefi Z, Arora A, Ayanore MA, Barnighausen TW, Bijani A, Cho DY, Chu DT, Crowe CS, Demoz GT, Demsie DG, Dibaji Forooshani ZS, Du M, El Tantawi M, Fischer F, Folayan MO, Futran ND, Geramo YCD, Haj-Mirzaian A, Hariyani N, Hasanzadeh A, Hassanipour S, Hay SI, Hole MK, Hostiuc S, Ilic MD, James SL, Kalhor R, Kemmer L, Keramati M, Khader YS, Kisa S, Kisa A, Koyanagi A, Lalloo R, Le Nguyen Q, London SD, Manohar ND, Massenburg BB, Mathur MR, Meles HG, Mestrovic T, Mohammadian-Hafshejani A, Mohammadpourhodki R, Mokdad AH, Morrison SD, Nazari J, Nguyen TH, Nguyen CT, Nixon MR, Olagunju TO, Pakshir K, Pathak M, Rabiee N, Rafiei A, Ramezanzadeh K, Rios-Blancas MJ, Roro EM, Sabour S, Samy AM, Sawhney M, Schwendicke F, Shaahmadi F, Shaikh MA, Stein C, Tovani-Palone MR, Tran BX, Unnikrishnan B, Vu GT, Vukovic A, Warouw TSS, Zaidi Z, Zhang ZJ and Kassebaum NJ (2020) Global, Regional, and National Levels and Trends in Burden of Oral Conditions from 1990 to 2017: A Systematic Analysis for the Global Burden of Disease 2017 Study. *J Dent Res* 99 (4):362-373. <https://doi.org/10.1177/0022034520908533>
7. Darling CL and Fried D (2005) Optical properties of natural caries lesions in dental enamel at 1310 nm. Book title. International Society for Optics and Photonics,
8. 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

9. 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>
10. 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>
11. Fried D (2019) Near-Infrared Reflectance Imaging of Caries Lesions. In: Ferreira Zandona A and Longbottom C, editors. *Detection and Assessment of Dental Caries*. Cham: Springer International Publishing; p. 189-197.
12. 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>
13. Fried D, Glena 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>
14. Fried D and Jones R (2006) Near-infrared transillumination for the imaging of early dental decay. United States Patent 20060223032.
15. Fried D, Staninec M and Darling CL (2010) Near-infrared imaging of dental decay at 1310 nm. *J Laser Dent* 18 (1):8-16
16. 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>
17. Fried WA, Fried D, Chan KH and Darling CL (2013) High contrast reflectance imaging of simulated lesions on tooth occlusal surfaces at near-IR wavelengths. *Lasers Surg Med* 45 (8):533-41. <https://doi.org/10.1002/lsm.22159>
18. Gimenez T, Piovesan C, Braga MM, Raggio DP, Deery C, Ricketts DN, Ekstrand KR and Mendes FM (2015) Visual Inspection for Caries Detection: A Systematic Review and Meta-analysis. *J Dent Res* 94 (7):895-904. <https://doi.org/10.1177/0022034515586763>
19. 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* 0 (0):20210005. <https://doi.org/10.1259/dmfr.20210005>
20. 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>

21. Jablonski-Momeni A, Heinzl-Gutenbrunner M, Haak R and Krause F (2017) Use of AC impedance spectroscopy for monitoring sound teeth and incipient carious lesions. *Clin Oral Investig* 21 (8):2421-2427. <https://doi.org/10.1007/s00784-016-2038-2>
22. Jones GC, Jones RS and Fried D (2004) Transillumination of interproximal caries lesions with 830-nm light. *Proc SPIE* 5313, *Lasers in Dentistry X*:17-22. <https://doi.org/10.1117/12.539289>
23. 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>
24. 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,
25. Jordan RA, Bodechtel C, Hertrampf K, Hoffmann T, Kocher T, Nitschke I, Schiffner U, Stark H, Zimmer S, Micheelis W and Group DVSI (2014) The Fifth German Oral Health Study (Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie, DMS V) - rationale, design, and methods. *BMC Oral Health* 14:161. <https://doi.org/10.1186/1472-6831-14-161>
26. 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>
27. Kuhnisch 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>
28. Kühnisch J, Bücher K, Henschel V, Albrecht A, Garcia-Godoy F, Mansmann U, Hickel R and Heinrich-Weltzien R (2011) Diagnostic performance of the universal visual scoring system (UniViSS) on occlusal surfaces. *Clin Oral Investig* 15 (2):215-23. <https://doi.org/10.1007/s00784-010-0390-1>
29. Kühnisch J, Goddon I, Berger S, Senkel H, Bücher K, Oehme T, Hickel R and Heinrich-Weltzien R (2009) Development, methodology and potential of the new Universal Visual Scoring System (UniViSS) for caries detection and diagnosis. *Int J Environ Res Public Health* 6 (9):2500-9. <https://doi.org/10.3390/ijerph6092500>
30. Kuhnisch J, Sochtig 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>

31. Kunisch J, Schaefer 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
32. 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>
33. 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>
34. 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>
35. 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>
36. Litzenburger F, Schaefer G, Hickel R, Kuhnisch 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>
37. 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>
38. Marthaler TM (1966) A standardized system of recording dental conditions. *Helv Odontol Acta* 10 (1):1-18
39. Mitropoulos CM (1985) The use of fibre-optic transillumination in the diagnosis of posterior approximal caries in clinical trials. *Caries Res* 19 (4):379-84
40. 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>
41. 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>
42. Pitts NB, Ekstrand KR and Foundation I (2013) International Caries Detection and Assessment System (ICDAS) and its International Caries Classification and Management System (ICCMS) - methods for staging of the caries process and enabling dentists to manage caries. *Community Dent Oral Epidemiol* 41 (1):e41-52. <https://doi.org/10.1111/cdoe.12025>

43. 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>
44. 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>
45. 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>
46. 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>
47. 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>
48. Schaefer G, Pitchika V, Litzenburger F, Hickel R and Kuhnisch 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>
49. Schwendicke F, Tzschoppe 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>
50. 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>
51. 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>
52. Sochtig F, Hickel R and Kuhnisch 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>

53. 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>
54. Spitzer D and Bosch JT (1975) The absorption and scattering of light in bovine and human dental enamel. *Calcif Tissue Res* 17 (2):129-37. <https://doi.org/10.1007/BF02547285>
55. Staninec M, Lee C, Darling CL and Fried D (2010) In vivo near-IR imaging of approximal dental decay at 1,310 nm. *Lasers Surg Med* 42 (4):292-8. <https://doi.org/10.1002/lsm.20913>
56. Stratigaki E, Jost FN, Kuhnisch J, Litzemberger F, Lussi A and Neuhaus KW (2020) Clinical validation of near-infrared light transillumination for early proximal caries detection using a composite reference standard. *J Dent* 103S:100025. <https://doi.org/10.1016/j.jjodo.2020.100025>
57. Wenzel A (2004) Bitewing and digital bitewing radiography for detection of caries lesions. *J Dent Res* 83 Spec No C:C72-5
58. Wenzel A (2014) Radiographic display of carious lesions and cavitation in approximal surfaces: Advantages and drawbacks of conventional and advanced modalities. *Acta Odontol Scand* 72 (4):251-64. <https://doi.org/10.3109/00016357.2014.888757>
59. Wenzel A, Fejerskov O, Kidd E, Joyston-Bechal S and Groeneveld A (1990) Depth of occlusal caries assessed clinically, by conventional film radiographs, and by digitized, processed radiographs. *Caries Res* 24 (5):327-33. <https://doi.org/https://doi.org/10.1159/000261291>

6. Danksagung

Mein Dank gebührt allen, die mich bei der Arbeit an meiner Habilitation unterstützt, gefördert und motiviert haben. Bei diesen Personen möchte ich mich besonders bedanken:

Prof. Dr. med. dent. Reinhard Hickel, der mein wissenschaftliches Arbeiten als Direktor an der Poliklinik für Zahnerhaltung und Parodontologie ermöglichte und förderte sowie als mein Fachmentor meine Habilitation mit Rat und Tat begleitete.

Meinen beiden weiteren Fachmentoren, Prof. Dr. med. dent. Daniel Edelhoff und Prof. Dr. med. Thomas Liebig für ihre Unterstützung und Betreuung während meiner Habilitation

Prof. Dr. med. dent. Karl-Heinz Kunzelmann, der mir immer fachlich zur Seite stand und mich zur Habilitation ermutigte.

Meinem Kollegen Dr. med. dent. Alexander Lederer für die inspirierende Zusammenarbeit, aus der viele Originalarbeiten entstanden ist.

Meiner Kollegin Dr. med. dent. Katrin Heck für die Teamarbeit, aus der viele Ideen, neue wissenschaftliche Projekte und Publikationen entstanden sind. Sie ist mir zu einer guten Freundin geworden.

Allen weiteren Kolleginnen und Kollegen sowie Promovendinnen und Promovenden, mit denen ich zusammenarbeiten durfte. Im Besonderen möchte ich mich bei Professor Dr. med. dent. Klaus Neuhaus und Dr. med. dent. Dalia Kaisarly bedanken.

Gisela Dachs und Evi Köbele für ihre Hilfe und Unterstützung.

Thomas Obermeier für seine Freundschaft und Motivation.

Meinen Schwiegereltern, Agnes und Ingolf Litzenburger, die mich stets unterstützen.

Meinen Schwestern Katharina und Johanna für den Rückhalt, auf den ich immer vertrauen kann.

Meinem Mann Andreas, ohne dessen Unterstützung ich den Weg zur Habilitation niemals geschafft hätte, und meinen drei Söhnen Gustav, Johann und Franz, auf die ich sehr stolz bin.