

Aus dem Charité Centrum für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde der
Klinik für Zahnerhaltungskunde und Präventivzahnmedizin
der Medizinischen Fakultät Charité – Universitätsmedizin Berlin

DISSERTATION

Genauigkeit und Reliabilität unterschiedlicher Methoden zur
Diagnostik von approximaler Wurzelkaries in-vitro

*Accuracy and reliability of different approaches for detecting
proximal root caries lesions in vitro*

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

vorgelegt der Medizinischen Fakultät
Charité – Universitätsmedizin Berlin

von

Mareike Dörthe Preus
aus Aschaffenburg

Datum der Promotion: 26.06.2022

Vorwort

Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit wurden im Rahmen eines wissenschaftlichen Postervortrags veröffentlicht unter:

Göstemeyer G., Askar H., Preus M., Elhennawy K., Paris S., Schwendicke F.: Accuracy of Different Approaches for Detecting Proximal Root Caries Lesions In Vitro; *67. Kongress der European Organisation for Caries Research (ORCA), Online-Kongress, 2020*

Teile und Ergebnisse dieses Vortrags wurden in dieser Arbeit verwendet.

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis	- 5 -
Abbildungsverzeichnis	- 6 -
1 Abstrakt	- 7 -
1.1 Abstrakt (Deutsch)	- 7 -
1.2 Abstract (English).....	- 8 -
2 Literaturübersicht.....	- 9 -
2.1 Karies	- 9 -
2.1.1 Pathogenese der Karies	- 9 -
2.2 Wurzelkaries	- 10 -
2.2.1 Pathogenese der Wurzelkaries	- 10 -
2.2.2 Morphologie der Wurzelkaries.....	- 11 -
2.2.3 Epidemiologie der Wurzelkaries.....	- 13 -
2.2.4 Klassifikation der Wurzelkaries	- 14 -
2.3 Approximale Kariesdiagnostik.....	- 15 -
2.3.1 Röntgenologische Diagnostik.....	- 15 -
2.3.2 Visuell-taktile Inspektion.....	- 18 -
2.3.3 Laserfluoreszenzverfahren.....	- 19 -
2.3.3.1 DIAGNOdent pen.....	- 20 -
2.3.4 Transilluminationsverfahren	- 22 -
2.3.4.1 Diaphanoskopie/Faseroptiktransillumination	- 23 -
2.3.4.2 Nahinfrarot-Transillumination.....	- 23 -
3 Fragestellung.....	- 27 -
4 Material und Methode	- 28 -
4.1 Übersicht.....	- 28 -
4.2 Verwendete Zähne und vorbereitende Maßnahmen	- 28 -
4.3 Herstellung der Studienmodelle	- 29 -
4.4 Anfertigen der Röntgenbilder	- 31 -
4.5 Durchführung der Untersuchungen.....	- 31 -
4.5.1 Röntgenologische Diagnostik.....	- 34 -
4.5.2 Klinische Diagnostik	- 34 -
4.5.2.1 Visuell-taktile Inspektion	- 34 -
4.5.2.2 Laserfluoreszenzverfahren	- 34 -
4.5.2.3 Nahinfrarot-Transillumination.....	- 35 -
4.6 Anfertigung der Zahnschliffe	- 35 -
4.7 Messung der Läsionstiefe mit dem digitalen Mikroskop	- 38 -

4.8	Statistische Auswertung.....	- 39 -
4.8.1	Quantitative Erfassung der Genauigkeit.....	- 39 -
4.8.1.1	Sensitivität und Spezifität.....	- 39 -
4.8.1.2	ROC-Analyse und AUC-Wert	- 40 -
4.8.1.3	Two-sample T-Test.....	- 40 -
4.8.2.	Quantitative Erfassung der Reliabilität	- 40 -
5	Ergebnisse.....	- 42 -
5.1	Ergebnisse der Referenztests.....	- 42 -
5.1.1	Direkte visuelle Inspektion.....	- 42 -
5.1.2	Histologische Ergebnisse	- 42 -
5.2	Ergebnisse der diagnostischen Tests	- 42 -
5.2.1	Sensitivität und Spezifität	- 43 -
5.2.2	ROC-Kurven.....	- 44 -
5.2.3	Interrater- und Intrarater-Reliabilität	- 46 -
6	Diskussion	- 48 -
6.1.	Diskussion der Methodik.....	- 48 -
6.1.1	Auswahl und Lagerung der Zähne	- 48 -
6.1.2	Herstellen der Studienmodelle und Diagnostik	- 49 -
6.1.3	Herstellung und Evaluation der Zahnschliffe als Referenz.....	- 51 -
6.2.	Diskussion der Ergebnisse	- 52 -
6.2.1	Röntgenologische Diagnostik.....	- 52 -
6.2.2	Visuell-taktile Inspektion.....	- 55 -
6.2.3	Laserfluoreszenzverfahren.....	- 57 -
6.2.3.1	Schwellenwerte für die Laserfluoreszenzmessung.....	- 63 -
6.2.4	Nahinfrarot-Transillumination	- 64 -
6.2.5.	Neuere Verfahren.....	- 65 -
7	Schlussfolgerung	- 67 -
8	Literaturverzeichnis	- 68 -
9	Eidesstattliche Versicherung	- 77 -
10	Lebenslauf	- 80 -
11	Publikationsliste.....	- 81 -
12	Danksagung	- 82 -
13	Bescheinigung Statistik	- 83 -

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Studien zur Genauigkeit der Diagnostik von Wurzelkaries	- 26 -
Tabelle 2 Kriterien für die Diagnostik mittels der diagnostischen Methoden	- 33 -
Tabelle 3 Einteilung der Kappa-Werte nach Landis und Koch	- 41 -
Tabelle 4 Ergebnisse nach histologischer Auswertung der Zahnschliffe	- 42 -
Tabelle 5 Genauigkeit der unterschiedlichen diagnostischen Methoden für die Erfassung aller Wurzelkariesläsionen	- 44 -
Tabelle 6 Genauigkeit der unterschiedlichen diagnostischen Methoden für die Erfassung fortgeschrittener Wurzelkariesläsionen	- 44 -
Tabelle 7 Mittlere AUC-Werte der diagnostischen Methoden für die Erfassung aller und fortgeschrittener Läsionen	- 45 -
Tabelle 8 Ergebnisse des Two-Sample T-Test	- 46 -
Tabelle 9 Kappa-Werte Intrarater- und Interrater-Reliabilität der diagnostischen Methoden für alle und fortgeschrittene Läsionen	- 47 -

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Darstellung einer Wurzelkariesläsion in einem Zahnschliff	- 13 -
Abbildung 2 Beispiel einer intraoralen Röntgenaufnahme mit Wurzelkaries.....	- 16 -
Abbildung 3 "Burnout-Effekt" an Zahn 45.....	- 16 -
Abbildung 4 Beispielfoto des DIAGNOdent pen.....	- 21 -
Abbildung 5 Beispielfoto der DIAGNOcam.....	- 24 -
Abbildung 6 Schematische Darstellung des Studienablaufs	- 28 -
Abbildung 7 Schematischer Ablauf der Modellherstellung	- 30 -
Abbildung 8 Schematischer Aufbau der Röntgenvorrichtung.....	- 31 -
Abbildung 9 Foto eines Zahnes mit Wurzelkariesläsion.....	- 36 -
Abbildung 10 Schematischer Ablauf der Herstellung des Zahnschliffs	- 37 -
Abbildung 11 Messung der Läsionsausdehnung im Zahnschliff	- 38 -
Abbildung 12 Exemplarische Aufnahme mit der DIAGNOcam.....	- 43 -
Abbildung 13 ROC-Kurven der Sensitivität und Spezifität der diagnostischen Methoden für alle Läsionen	- 45 -
Abbildung 14 ROC-Kurven der Sensitivität und Spezifität der diagnostischen Methoden für fortgeschrittene Läsionen	- 45 -

1 Abstrakt

1.1 Abstrakt (Deutsch)

Ziel der Studie: Diese Untersuchung hatte zum Ziel, die Genauigkeit und Reliabilität der röntgenologischen Diagnostik (XR), der visuell-taktilen Inspektion (VT), des Laserfluoreszenzverfahrens (DIAGNOdent pen (LF)) und der Nahinfrarot-Transillumination (DIAGNOcam (DC)) zur Diagnostik von approximaler Wurzelkaries *in vitro* zu evaluieren.

Methode: 220 extrahierte, humane, bleibende Zähne mit und ohne Wurzelkaries wurden in 55 Modellen mit jeweils zwei Prämolaren und zwei Molaren platziert, so dass sie sechs proximale Wurzeloberflächen bildeten. Die vier diagnostischen Methoden wurden an 50 Studienmodellen in einem Phantomkopf von zwei unabhängigen Untersuchern zur Detektion und Diagnostik von Wurzelkaries im Approximalraum angewandt. Als Referenz wurden Zahnschliffe der Zähne angefertigt und die tatsächliche Läsionsausdehnung unter einem digitalen Mikroskop ausgemessen. Zur statistischen Auswertung der Genauigkeit wurden Receiver operating characteristic (ROC) Kurven erstellt und die Sensitivität und Spezifität sowie die Area Under the Curve (AUC) ermittelt. Unterschiede bei den AUC-Werten zwischen den diagnostischen Methoden wurden mittels Two-Sample T-Test statistisch ausgewertet. Um die Zuverlässigkeit der jeweiligen diagnostischen Methoden festzustellen, wurden Kappa-Werte für die Interrater- und Intrarater Reliabilität erhoben.

Ergebnisse: Die Sensitivität/Spezifität zur Diagnostik von allen Wurzelkariesläsionen betragen 0,81/0,63 für XR, 0,76/0,88 für VT und 0,81/0,95 für LF. Für die fortgeschrittenen Läsionen betragen die Werte 0,43/0,94 für XR, 0,67/0,99 für VT und 0,83/0,78 für LF. Die AUC-Werte für LF und VT waren signifikant höher als für XR, sowohl für alle (LF $p < 0,00$; VT $p = 0,00$) als auch die fortgeschrittenen Läsionen (LF $p = 0,01$; VT $p = 0,01$). Die AUC-Werte von LF zur Erkennung von allen Wurzelkariesläsionen waren signifikant höher als diejenigen von VT ($p = 0,01$), während bei der Erkennung von fortgeschrittenen Läsionen kein signifikanter Unterschied zu verzeichnen war ($p = 0,59$). Die Kappa-Werte für die Interrater-Reliabilität betragen für alle Läsionen/fortgeschrittene Läsionen 0,42/0,52 für XR, 0,60/0,65 für VT und 0,72/0,70 für LF. Die Kappa-Werte für die Intrarater-Reliabilität 1,0/0,67 für XR, 0,66/0,62 für VT und 0,68/0,56 für LF. DC eignete sich nicht zur Diagnostik von approximalen Wurzelkariesläsionen.

Schlussfolgerung: LF und VT waren genauer als XR zur Erkennung von approximalen Wurzelkariesläsionen, während mittels DC keine Wurzelkariesdiagnostik möglich war.

1.2 Abstract (English)

Objectives: The aim of this study was to investigate the accuracy and reliability of radiographs (XR), visual-tactile inspection (VT), laser fluorescence (DIAGNOdent pen (LF)) and near-infrared transillumination (DIAGNOcam (DC)) for evaluation of proximal root caries in vitro.

Methods: 220 extracted human permanent teeth with and without root caries lesions were mounted into 55 models, each consisting of two premolars and two molars (6 proximal root surfaces). Two independent examiners used the different diagnostic methods to evaluate root caries lesions in the models mounted in a phantom dummy head. Tooth sections of the evaluated teeth were prepared, and lesion extension measured under a digital microscope. For statistical evaluation, receiver operating characteristic (ROC) curves were employed, and sensitivity, specificity and the area under the curve (AUC) determined. Differences in AUC values between the diagnostic methods were statistically assessed by two-sample t-test. Kappa values for interrater and intrarater reliability were calculated to determine the reliability of each test method.

Results: The sensitivity/specificity for diagnosis of all root caries lesions were 0.81/0.63 for XR, 0.76/0.88 for VT and 0.81/0.95 for LF. For advanced lesions they were 0.43/0.94 for XR, 0.67/0.99 for VT and 0.83/0.78 for LF. The mean AUC values for LF and VT were significantly higher than the XR values, both for all (LF $p < 0,00$; VT $p = 0,00$) and advanced lesions (LF $p = 0,01$; VT $p = 0,01$). In addition, LF was significantly more accurate than VT for detection of all root caries lesions ($p = 0,01$), while no significant difference was observed in the detection of advanced lesions ($p = 0,59$). Kappa values for interrater reliability were 0.42/0.52 for XR, 0.60/0.65 for VT, and 0.72/0.70 for LF for all lesions/advanced lesions. Kappa values for intrarater reliability were 1.0/0.67 for XR, 0.66/0.62 for VT, and 0.68/0.56 for LF. DC was not suitable for the detection of approximal root caries lesions.

Conclusion: LF and VT were more accurate than XR for the detection of proximal root caries lesions, whereas DC was not suitable for the diagnosis of root caries lesions.

2 Literaturübersicht

2.1 Karies

Die ökologische Plaquehypothese gilt derzeit als die plausibelste Theorie, mit der die Entstehung von Karies erklärt werden kann (Marsh, 2003). Der häufige Konsum fermentierbarer Kohlenhydrate führt zu einer Umwandlung der physiologischen bakteriellen Flora des oralen Biofilms in einen pathologischen Biofilm mit überwiegend kariogenen Bakterien (Marsh, 2006). Die Bakterien im Zahnbelag (Plaque) ernähren sich von niedermolekularen Kohlenhydraten und scheiden als Stoffwechselprodukte Säuren aus. Diese Säuren, vor allem Milchsäure, führen zur Zerstörung (Demineralisation) der Zahnhartsubstanz (Geddes, 1975). Karies kann alle Zahnhartsubstanzen wie Schmelz (Schmelzkaries), Kronendentin (Dentinkaries) und Wurzeldentin (Wurzelkaries) befallen.

2.1.1 Pathogenese der Karies

Die Mundhöhle ist von einer bakteriellen Mischflora besiedelt. Nach mechanischer Reinigung wird die Zahnoberfläche durch Speichel benetzt. Es kommt innerhalb von kurzer Zeit zur Bildung einer dünnen Schicht aus Kohlenhydraten und Proteinen aus dem Speichel auf der Zahnoberfläche (Pellikel) (Baier and Glantz, 1978). Durch elektrostatische Kräfte, wie zum Beispiel der van-der-Waal'schen Anziehungskräfte, kommt es zur Anhaftung von oralen Mikroorganismen an die Pellikel (Gibbons, 1989). Durch die Adhäsion weiterer Mikroorganismen und Teilungsvorgänge der bereits vorhandenen Bakterien kommt es zur Zunahme der Biofilmdicke. Das Keimspektrum junger Plaque ist gekennzeichnet durch grampositive Bakterien und beinhaltet neben Actinomyzeten (*A. viscosus* & *A. naeslundii*) Streptokokken (*S. sanguis*, *S. oralis* und *S. mitis*) als Pionierkeime (Socransky et al., 1977, Nyvad and Kilian, 1987). Mit zunehmendem Volumen sinkt das Sauerstoffangebot in den unteren Schichten des Biofilms. Ältere, ausgereifte Plaque besteht daher zunehmend aus anaeroben und fakultativ-anaeroben Mikroorganismen. Zu letzteren gehört der kariogene Keim *S. mutans*.

Die Mikroorganismen bilden bei der Verstoffwechslung von vergärbaren niedermolekularen Kohlenhydraten große Mengen an organischen Säuren, insbesondere Milchsäure (Loesche, 1986). Milchsäure hat einen geringen pKs-Wert und setzt daher Oxonium-Ionen (H_3O^+) frei, was eine Senkung des lokalen pH-Wertes bedeutet (Featherstone and Rodgers, 1981). *S. mutans* und Laktobazillen haben einen

Selektionsvorteil in diesem sauren Milieu durch ihre azidogenen (säurebildenden) und azidurischen (säuretoleranten) Eigenschaften. Durch anhaltend erhöhte Zuckerzufuhr aus der Nahrung steigt der Anteil von ***S. mutans*** und Lactobazillen im Biofilm daher an. ***S. mutans*** und Lactobazillen sind Leitkeime bei der Kariesentstehung (Corby et al., 2005).

Jede weitere Aufnahme von niedermolekularen Kohlenhydraten führt an der plaquebedeckten Zahnoberfläche zu einem zeitlich begrenzten pH-Wert-Abfall. Durch diesen pH-Wert-Abfall werden Mineralien aus der darunterliegenden Zahnhartsubstanz herausgelöst. Zwar kommt es nach Beendigung des Säureangriffs zur Remineralisation indem sich bei neutralem pH-Wert wieder Mineralionen in die Zahnhartsubstanz einlagern. Anhaltende periodische Demineralisationsvorgänge bei weiter bestehender Plaquebesiedelung der Zahnoberfläche führen jedoch über längere Zeit zu irreversiblen Demineralisationen und folglich zur Bildung einer Kavität.

2.2 Wurzelkaries

Voraussetzung für die Entstehung von Wurzelkaries ist die Freilegung von Wurzeloberflächen, die aufgrund von knochen-, epithelialen- und bindegewebigen Attachmentverlusts erfolgen kann (Meyer-Luckel et al., 2012). Die nachfolgende bakterielle Besiedelung und Demineralisation erfolgt grundsätzlich ähnlich den zuvor beschriebenen Vorgängen bei der Schmelzkaries.

2.2.1 Pathogenese der Wurzelkaries

Falsche Putztechniken oder pathologische Belastung der Zähne sowie physiologischer oder durch Parodontitis bedingter Abbau des Kieferknochens können mit zunehmendem Alter zu Rezessionen der marginalen Gingiva führen. Aufgrund des freiliegenden Dentins/Zements steigt das Risiko der Zähne für Wurzelkaries an (Thomson, 1990). Im Gegensatz zum Schmelz haben Wurzelzement und -dentin eine andere chemische und histologische Zusammensetzung und sind daher anfälliger für Demineralisierungsprozesse (Hoppenbrouwers et al., 1986). Zahnschmelz besteht zu circa 96 Gewichtsprozent aus Mineralien (hauptsächlich Hydroxylapatit), wohingegen Dentin nur zu circa 70 Gewichtsprozent Mineralien enthält. Hydroxylapatitkristalle im Dentin enthalten mehr Unreinheiten und sind kleiner als im Schmelz. Dadurch sind Demineralisationen im Dentin bei gleichem pH-Wert ausgeprägter als im Schmelz

(Ogaard et al., 1988). Neben Demineralisationsvorgängen spielen bei der Entstehung von Wurzelkaries aber auch enzymatische Abbauvorgänge eine Rolle. Denn Dentin besteht zu rund 30 Gewichtsprozent aus organischen Bestandteilen, hier vor allem aus Kollagenfasern. Aufgrund des Säureangriffs und der folgenden Demineralisation des Dentins werden die Kollagenfasern freigelegt. Die dort eingebetteten Matrix-Metalloproteinasen und Cathepsine sowie weitere Matrix-Metalloproteinasen aus dem Speichel werden aktiviert und bauen das freiliegende Kollagen enzymatisch ab (Takahashi and Nyvad, 2016).

Die Mundhygiene, die Speichelpufferkapazität sowie die Sekretionsrate und die Zahl der exponierten Wurzeloberflächen können das Risiko für eine Wurzelkaries begünstigen (Ravald and Birkhed, 1991, Reiker et al., 1999, Lindhe and Nyman, 1975, Hayesa M, 2016). Besonders der verminderte Speichelfluss tritt häufig bei älteren Patienten auf. Ursächlich hierfür sind insbesondere Medikamente und Strahlentherapie im Kopf-Halsbereich. Aber auch hormonelle Schwankungen, Diabetes mellitus, neurologische Erkrankungen, Pankreas- und Lebererkrankungen sowie Mangelernährung können zu einer partiellen oder totalen Mundtrockenheit (Xerostomie) führen.

Patienten mit fortgeschrittenem Alter haben oft eine unzureichende Mundhygiene. Grund dafür sind mit dem Alter eintretende Veränderungen wie nachlassende Geschicklichkeit bei häuslichen Mundhygienemaßnahmen, Abnahme des Sehvermögens oder eine generelle Verschlechterung der geistigen Fähigkeiten (Walls and Meurman, 2012). Dies ist besonders bei pflegebedürftigen Senioren ein großes Problem. Folglich gewinnt durch die steigende Lebenserwartung der Menschen und den genannten Altersveränderungen sowie die Tatsache, dass die Patienten ihre eigenen Zähne immer länger behalten, die Wurzelkaries immer mehr an Bedeutung und rückt vermehrt in den Blickpunkt wissenschaftlichen und klinischen Interesses (Hayes et al., 2017, Zhang et al., 2020).

2.2.2 Morphologie der Wurzelkaries

Auch in der Morphologie unterscheiden sich Wurzel- und Kronenkaries. Wurzelkaries entsteht zunächst meist nur oberflächlich, da durch bereits vorhandenes sklerotisches Dentin sowie durch die Pufferwirkung des Speichels und die Gingivalflüssigkeit die kariösen Läsionen arretieren können. Da das Wurzeldentin stärker mineralisiert ist und weniger Dentinkanälchen aufweist als koronales Dentin, kommt es an der Wurzel seltener zur Ausbildung tiefer Läsionen (Meyer-Luckel et al., 2012).

Dentinkaries wird von der Pulpa in Richtung Peripherie in verschiedene Zonen unterteilt (Abbildung 1). Aufgrund der Diffusion von bakteriellen Toxinen und Enzymen bildet sich an der Pulpa-Dentin-Grenze Reaktionsdentin (Tertiärdentin [TD]). Die Pulpa selbst reagiert mit einer Entzündungsreaktion. Dies geschieht meist noch bevor eine Kariesläsion kavitiert ist. Es kann eine Schicht gesunden, nur leicht veränderten Dentins folgen („normales“ Dentin [ND]). Daraufhin folgt das sklerotische Dentin, die sogenannte transluzente Zone, als eine Art Schutzwall (Sklerotisches Dentin [SZ]). Dieses entsteht durch Obliteration der Dentinkanälchen, die mit peritubulärer Dentinablagerung sowie dem Zurückweichen und teilweiser Mineralisation der Odontoblastenfortsätze einhergeht. Weiter nach peripher folgt ein Abschnitt, in dem keine Odontoblastenfortsätze mehr zu finden sind („dead tracts“ [DT]) und welcher eine höhere Permeabilität als normales Dentin besitzt. Es schließt sich ein Bereich stark demineralisierten Dentins an (Zone der Demineralisation [ZD]). An der äußeren Oberfläche dringen die Bakterien schließlich in das demineralisierte Dentin ein und lösen diese Schicht enzymatisch auf (Kavität [K]). Darin befinden sich Enzyme, Stoffwechselprodukte, vitale und tote Mikroorganismen sowie nekrotisches Dentin (Meyer-Luckel et al., 2012).

Nicht kavitierte Wurzelkariesläsionen, die frühzeitig entsprechend behandelt werden, zeigen ein großes Potenzial zu arretieren und in der Folge zu remineralisieren (Schupbach et al., 1992, Pretty, 2017, Ekstrand et al., 2013). Dabei zählen vor allem die tägliche Plaqueentfernung und die topische Fluoridanwendung zu den entscheidenden wurzelkariesprophylaktischen Maßnahmen (Nyvad et al., 1997, Wadia, 2020, Ekstrand et al., 2013). Eine Übersichtsarbeit kommt zu dem Schluss, dass die Verwendung von 5000 ppm Fluoridzahnpasten sowie professionell aufgetragener Chlorhexidinlack oder Silberdiaminfluorid im Vergleich zu konventioneller Fluoridzahnpaste beziehungsweise Placebo effektiver bei der Arretierung von Wurzelkaries wirken (Meyer-Lueckel et al., 2019). Bei Patienten zwischen 60 und 80 Jahren konnte festgestellt werden, dass besonders die Bukkalflächen der unteren Molaren und Prämolaren und der obere Eckzahn am häufigsten von Wurzelkaries betroffen sind (Fejerskov et al., 1991). Sumney et al. konnten signifikant mehr Läsionen im Unterkiefer im Vergleich zum Oberkiefer feststellen, einen seitenabhängigen Unterschied stellten die Autoren nicht fest (Sumney et al., 1973).



Abbildung 1 Darstellung einer Wurzelkariesläsion in einem Zahnschliff. Zahnschliff bei 20-facher Vergrößerung unter dem digitalen Mikroskop. Erläuterungen siehe Text (Seite 12). Abkürzungen: K: Kavität; ZD: Zone der Demineralisation; DT: „dead tracts“; SZ: Sklerotisches Dentin; TD: Tertiärdentin.

2.2.3 Epidemiologie der Wurzelkaries

Die fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS V) von 2014, die einzige bundesweite repräsentative Erhebung mundgesundheitsbezogener Parameter in der Bevölkerung, zeigt, dass die Menschen in Deutschland mit zunehmendem Alter mehr eigene Zähne haben (Jordan et al., 2014). Die DMS V konnte eine Zunahme der Wurzelkariesprävalenz im Vergleich zu früheren Erhebungen (DMS IV und III) bei älteren Patienten zeigen. So liegt die Wurzelkariesprävalenz in der Altersgruppe der 75-84-Jährigen bei 28,0% und bei den 85-100-Jährigen bei 20,0%. Bei jüngeren Erwachsenen (35-44-Jährigen) liegt sie bei 11,8%. Die Anzahl der kariösen oder sanierten Läsionen im Verhältnis zur Gesamtzahl der freiliegenden Wurzeloberflächen (=Root Caries Index (RCI)) pro Patienten beträgt bei den 75-100-Jährigen ohne Pflegebedarf 16,4%. Dies bedeutet, dass nahezu jede fünfte freiliegende Wurzeloberfläche kariös oder gefüllt ist. Bei gleichaltrigen Patienten mit Pflegestufe liegt der RCI sogar bei 26,4%. Somit besteht gerade bei älteren Patienten ein relevanter Bedarf für die frühzeitige Detektion, Diagnostik und Therapie von Wurzelkaries. Unter Berücksichtigung des demografischen Wandels kann davon ausgegangen werden, dass dieser Bedarf in Zukunft noch deutlich ansteigen wird (Jordan et al., 2014).

2.2.4 Klassifikation der Wurzelkaries

Eine Klassifikation von Wurzelkaries unter morphologischer Betrachtung unternahm erstmals Billings (Billings, 1986). Er entwickelte den „root caries severity index“, der das Ausmaß der Läsion abhängig von Oberflächenbeschaffenheit, Kavitation und Verfärbung in vier Schweregrade einteilt:

Grad I (Beginnend)

- Oberflächenbeschaffenheit: weich, kann mit einem zahnärztlichen Untersuchungsgerät penetriert werden
- Keine Kavitation
- Verfärbung: variabel, hellbraun bis braun

Grad II (Flach)

- Oberflächenbeschaffenheit: weich, unregelmäßig, grob, kann mit einem zahnärztlichen Untersuchungsgerät penetriert werden
- Kavitation (kleiner als 0,5 mm)
- Verfärbung: variabel, bronze bis dunkelbraun

Grad III (Kavitation)

- Oberflächenbeschaffenheit: weich, kann mit einem zahnärztlichen Untersuchungsgerät penetriert werden
- Kavitation (größer als 0,5 mm), keine Beteiligung der Pulpa
- Verfärbung: variabel, hellbraun bis dunkelbraun

Grad IV (Pulpal)

- Tiefe Kavitation mit Beteiligung der Pulpa oder des Wurzelkanals
- Verfärbung: variabel, braun bis dunkelbraun

Eine andere und derzeit am weitesten verbreitetste Klassifizierung kann nach dem International Caries Detection and Assessment System (ICDAS) vorgenommen werden, welches vor allem die Tiefe der Wurzelkariesläsion berücksichtigt (Topping and Pitts, 2009):

W0:

- Gesunde Wurzeloberfläche

W1:

- Ein abgegrenzter Bereich auf der Wurzeloberfläche oder an der Schmelz-Dentin-Grenze ist verfärbt (hell-/dunkelbraun, schwarz)

- Noch ist keine Kavität vorhanden, die tiefer als 0,5 mm ist

W2:

- Ein abgegrenzter Bereich auf der Wurzeloberfläche oder an der Schmelz-Dentin-Grenze ist verfärbt (hell-/dunkelbraun, schwarz)
- Eine Kavität, welche größer oder gleich 0,5 mm ist, ist vorhanden

2.3 Approximale Kariesdiagnostik

Die Kariesentstehung ist ein dynamischer Prozess, der in der Folge einer überwiegenden Demineralisation letztendlich zum Zahnverlust führen kann. Voraussetzung für ein erfolgreiches Läsionsmanagement ist daher eine frühzeitige Detektion von kariösen Läsionen. Dadurch können invasive Therapien, zum Beispiel in Form einer Restauration, hinausgezögert oder gänzlich verhindert werden. Besonders proximale Wurzeloberflächen liegen oft in visuell nur schwer zugänglichen Bereichen der Mundhöhle. Daher könnte zur approximalen Wurzelkariesdiagnostik der Einsatz von diagnostischen Hilfsmitteln sinnvoll sein. Im Folgenden werden verschiedene Methoden zur Kariesdiagnostik vorgestellt. Tabelle 1 (Seite 26) zeigt anschließend eine Übersicht über Studien verschiedener diagnostischer Methoden zur Genauigkeit von Wurzelkaries.

2.3.1 Röntgenologische Diagnostik

Die Röntgendiagnostik ist ein Standardverfahren in der zahnärztlichen Praxis. Dabei wird zwischen extraoralen Aufnahmetechniken (zum Beispiel Orthopantomogramm) und intraoralen Techniken (zum Beispiel Einzelzahnfilm und Bissflügel) unterschieden. Die Röntgenstrahlen (ionisierende Strahlen) werden je nach Dichte des durchstrahlten Gewebes unterschiedlich stark abgeschwächt. Kariesläsionen werden aufgrund ihres reduzierten Mineralgehalts als Radioopazität auf dem Röntgenbild (Abbildung 2) dargestellt. Zur approximalen Kariesdiagnostik im Prämolaren- und Molarenbereich wird in der Regel die Technik der Bissflügelradiographie angewandt. Dabei wird der gesamte Seitenzahnbereich orthoradial aufgezeichnet.



Abbildung 2 Beispiel einer intraoralen Röntgenaufnahme mit Wurzelkaries. Die distale Wurzeloberfläche des Zahnes 44 hat eine Kariesläsion bis ins äußere Dentindrittel, die mesiale Wurzeloberfläche des Zahnes 45 hat eine Kariesläsion bis ins mittlere Dentindrittel und die mesiale Wurzel des Zahnes 47 hat eine Kariesläsion bis ins äußere Dentindrittel.

Die Kariesdiagnostik mittels röntgenologischer Verfahren weist einige Fehlerquellen auf. Da es sich bei einem Röntgenbild um eine zweidimensionale Darstellung einer dreidimensionalen Situation handelt, können Überprojektionen sowie Überlagerungen entstehen, die die genaue Interpretation des Bildes einschränken. Dies wird an der Schmelz-Dentin-Grenze als so genannter „Burnout-Effekt“ (Abbildung 3) deutlich, der irrtümlicherweise als Wurzelkaries interpretiert werden kann und so zu falsch-positiven Ergebnissen führt (Berry, 1983). Diese Überlagerungserscheinung kann am Zahnhals entstehen, wenn sich ein fehlender marginaler Knochen und ein dünner Zahnhals überlagern.



Abbildung 3 "Burnout-Effekt" an Zahn 45. Die Mesial- und Distalflächen des rechten Zahnes (Zahn 45) weisen einen „Burnout-Effekt“ auf.

Röntgenaufnahmen können sinnvolle Ergänzungen zur klinischen Inspektion von Wurzelkariesläsionen im approximalen Bereich darstellen (Kweon et al., 2018). Ein einzelnes Bild gibt jedoch keinen direkten Hinweis über die Aktivität einer Läsion, dafür sind mehrere Bilder in zeitlichem Abstand notwendig. Während des Monitorings ist auf einen möglichst einheitlichen Aufnahmewinkel zu achten. Beim Anfertigen von Röntgenbildern zum Monitoring bedarf es stets eines Abwägungsprozesses, bei dem Faktoren wie das Resultat einer gründlichen klinischen Untersuchung, das individuelle Kariesrisiko des Patienten, das Alter und der zeitliche Abstand seit der letzten Röntgenaufnahme abgewogen werden sollten (Pitts et al., 2017). Denn aufgrund der Strahlenbelastung erfordert der Einsatz laut Röntgenverordnung eine „rechtfertigende Indikation“. Ein Röntgenbild darf demnach nur angefertigt werden, wenn der gesundheitliche Nutzen höher ist als das Gesundheitsrisiko durch die Strahlen. Weiter sollen Anwendungen mit keiner oder geringerer Strahlenbelastungen erwogen werden (Bundesgesetzblatt, 2020).

In der Literatur wird die Genauigkeit der röntgenologischen Diagnostik koronaler Kariesläsionen immer wieder untersucht und mit anderen diagnostischen Methoden verglichen. Eine In-vitro-Studie zur Diagnostik von koronaler Dentinkaries im Approximalbereich zeigte eine Sensitivität von 0,83 und eine Spezifität von 0,60 (Erläuterung zu den Begriffen Sensitivität und Spezifität im Abschnitt 4.8.1.1.) für die Auswertung von Bissflügelaufnahmen. Dabei zeigte die Methode der Nahinfrarot-Transillumination in dieser Studie eine der röntgenologischen Diagnostik ähnliche Sensitivität (0,82). Laserfluoreszenzverfahren (Abschnitt 2.3.3.) (0,60) sowie die visuelle Inspektion (0,54) zeigten jedoch geringere Sensitivitätswerte als die röntgenologische Diagnostik (Ozkan and Guzel, 2017). In weiteren klinischen Studien hatten Bissflügelaufnahmen für die Detektion von approximaler Dentinkaries hohe Sensitivitätswerte (0,97 (Kocak and Cengiz-Yanardag, 2020) und 0,96 (Kuhnisch et al., 2016)).

Für Wurzelkariesdiagnostik mit Röntgenbildern sind keine klinischen Studien verfügbar. In zwei In-vitro-Studien konnte an extrahierten Zähnen jedoch eine circa 80-prozentige Übereinstimmung der klinischen Untersuchung und der Auswertung von Röntgenbildern zur Diagnostik von Wurzelkaries gezeigt werden (Nordenram et al., 1988, Sikri and Sikri, 1991). Eine systematische Übersichtsarbeit zur Diagnostik von Wurzelkaries berichtet von zwei In-vitro-Studien (Neuhaus et al., 2012, Rodrigues et al., 2010), die die

röntgenologische Diagnostik an Wurzelkaries untersucht haben (Fee et al., 2020). Dabei wurde eine Sensitivität von 0,40 bei einer Spezifität von 0,80 zur Erkennung von approximaler Sekundärkaries am zervikalen Rand von Amalgamrestorationen mittels röntgenologischer Diagnostik gefunden (Neuhaus et al., 2012). In einer anderen Studie lag die Spezifität zur Erkennung von Wurzelkaries am Rand von Kunststofffüllungen deutlich darunter (0,31) und die Sensitivität deutlich darüber (0,63) (Rodrigues et al., 2010).

2.3.2 Visuell-taktile Inspektion

Die visuell-taktile Inspektion stellt die Basis der Kariesdiagnostik dar und ist nach wie vor die Standardmaßnahme bei der Detektion und Diagnostik von Wurzelkaries (Katz, 1990, Pretty, 2017, Katz, 1986). Diese Methode wird in der Regel mit Hilfe eines Mundspiegels, einer ausreichenden Lichtquelle, gegebenenfalls einer optischen Vergrößerungshilfe und einer zahnärztlichen Sonde durchgeführt. Dabei werden Farbabweichungen zur gesunden Zahnstruktur visuell erfasst. Mit der Sonde werden Unregelmäßigkeiten in der Morphologie der Zahnoberfläche und ein möglicher Plaquebelag ertastet. Die WHO empfiehlt zur taktilen Untersuchung der Zahnoberfläche die abgerundete CPI-beziehungsweise Parodontalsonde (WHO, 1997). In einer In-vitro-Studie konnte gezeigt werden, dass die klinische Beurteilung von Wurzelkaries auf Basis der Verfärbung und Oberflächenbeschaffenheit ohne Erfassung der Härte mittels Sonde zur Unterschätzung der Läsionsausdehnung führte. Das Dentin wies innerhalb der Studie einen deutlich höheren Grad an Demineralisation und an bakterieller Infektion auf als durch die klinische Untersuchung vermutet wurde (Schupbach et al., 1990).

Die Genauigkeit der visuell-taktilen Inspektion zur Diagnostik von Wurzelkaries wird in einer In-vitro-Studie mit einer Sensitivität von 0,75 und Spezifität von 0,38 (Rodrigues et al., 2010) angegeben. Für die Kombination mit der röntgenologischen Auswertung lag in dieser Studie eine höhere Genauigkeit (Sensitivität 0,81 und Spezifität 0,54) vor (Rodrigues et al., 2010).

Trotz der einfachen Anwendung ist die visuell-taktile Diagnostik relativ subjektiv und Befunde schwer speicherbar (Gunther et al., 2020, Hellyer, 2020). Besonders zum Monitoring von schnell voranschreitenden Wurzelkariesläsionen sollten die Ergebnisse einer diagnostischen Methode jedoch vergleichbar sein. In einer In-vivo-Studie konnte eine moderate bis substantielle Übereinstimmung des jeweiligen Untersuchers zu

unterschiedlichen Zeitpunkten (Intrarater-Reliabilität) und eine substantielle Übereinstimmung bei verschiedenen Untersuchern untereinander (Interrater-Reliabilität) für die visuelle Diagnostik von Wurzelkaries festgestellt werden (Landis and Koch, 1977). Ein Unterschied zur Diagnostik von koronaler Karies konnte innerhalb dieser Studie nicht nachgewiesen werden. Ebenso zeigten sich für initiale und manifeste Läsionen sowie für bukkale und linguale Flächen keine wesentlichen Unterschiede bei der Reliabilität der visuell-taktilen Diagnostik (Rosen et al., 1996). In einer weiteren Studie, die die Kriterien nach Fejerskov (Einteilung unter Beachtung dynamischen Charakters in aktive und inaktive Läsionen) anwendete, wurde zur Diagnostik von Wurzelkaries eine ausreichende bis moderate Intrarater-Reliabilität sowie eine substantielle Interrater-Reliabilität gefunden (Mojon et al., 1995, Fejerskov et al., 1991). Eine In-vitro-Studie, welche die makroskopische und röntgenologische Ausdehnung von approximaler Wurzelkaries untersuchte, konnte lediglich in 76% der Fälle eine übereinstimmende Diagnose feststellen. Die Studie kommt daher zu dem Ergebnis, dass während der visuellen Diagnostik unter klinischen Bedingungen nicht mit Sicherheit gewährleistet werden kann, alle oberflächlichen Wurzelkariesläsionen zu erfassen (Nordenram et al., 1988). Eine Übersichtsarbeit gibt an, dass die visuell-taktile Inspektion als traditionelle Methode zur Diagnostik von Wurzelkaries erst eine zuverlässige Methode darstellt, wenn sich die Läsion bereits in einem fortgeschrittenen Stadium befindet (Banting, 2001).

2.3.3 Laserfluoreszenzverfahren

Als Fluoreszenz wird die spontane Emission von Licht beim Übergang eines elektronisch angeregten Systems in einen energetisch niedrigeren Zustand bezeichnet. Dabei werden Elektronen durch Absorption auftreffender Photonen auf ein höheres, instabiles Energieniveau angehoben. Bei Rückgang der Elektronen in ein niedrigeres und somit stabileres Energieniveau wird die aufgenommene Energie wieder abgegeben und das Elektron geht in den Grundzustand über. Ein Teil der Energie tritt als Fluoreszenzlicht mit einer größeren Wellenlänge als das Exzitationslicht nach außen. Moleküle, die auf diese Art fluoreszieren, werden als Fluorochrome bezeichnet. Die natürlichen Fluoreszenzeigenschaften der Zahnhartsubstanzen und Bakterienprodukte sowie deren verändertes Fluoreszenzmuster bei der Entstehung von kariösen Läsionen macht man sich bei der Kariesdiagnostik zu Nutze. Es entsteht umso mehr Fluoreszenz, je höher der Demineralisationsgrad von Schmelz und Dentin ist. Dabei fluoreszieren insbesondere die

Metabolite von verschiedenen oralen Bakterien, sogenannte Porphyrine (Konig et al., 1998). Die Fluoreszenzmessung eignet sich sowohl zur Diagnostik von Karies sowie zur Erkennung von Restkaries während der Kariesentfernung im Rahmen einer Restaurationstherapie (Unlu et al., 2010). In einer Studie an Wurzeloberflächen konnte gezeigt werden, dass sowohl hell, als auch dunkel verfärbte Wurzeloberflächen deutlich unterschiedliche Fluoreszenzemissionen als gesunde Wurzeloberflächen aufwiesen (Buchalla et al., 2004).

2.3.3.1 DIAGNOdent pen

Bei dem DIAGNOdent pen (Kavo, Biberach, Deutschland) (Abbildung 4) handelt es sich um die Weiterentwicklung des DIAGNOdent, wobei das fundamentale Funktionsprinzip des DIAGNOdent beibehalten wurde. Der DIAGNOdent pen (KaVo, Biberach, Deutschland) ist ein kabelloses fluoreszenzbasiertes System, welches Anregung und Messung von Laserfluoreszenzstrahlung vereint. Der DIAGNOdent pen enthält eine Laserdiode als Quelle für rotes Anregungslicht der Wellenlänge 655 nm mit 1 mW. Das Licht dringt unter die Zahnoberfläche und ruft dort eine Fluoreszenz hervor. Eine als Detektor fungierende Fotodiode registriert das remittierte Licht des Zahnes nach Passieren eines Filters und wertet es quantitativ aus (Lussi, 2000). Die so gemessene Fluoreszenzstrahlung wird in relativen Einheiten von 0-99 angegeben. Als Neuerung im Vergleich zum klassischen DIAGNOdent, enthält der Pen eine um 360 Grad drehbare Sonde (S), welche ein Eindringen in den Approximalbereich und eine dortige Untersuchung von bukkal und oral ermöglicht. Der Detektorlaserstrahl wird durch ein Prisma um 100° abgelenkt. In dem Sondenhalter des kabellosen Handgriffes des DIAGNOdent pen können drei verschiedene Sonden (Fissuren-Sonde, Approximal-Sonde, Parodontal-Sonde) befestigt werden. Vor Benutzung des DIAGNOdent pen muss dieser auf die individuelle Zahnfluoreszenz des Patienten kalibriert werden. Dies geschieht an einer getrockneten und kariesfreien Stelle des zu untersuchenden Zahnes. Es wird zwischen dem MOMENT-Wert (M), welcher den aktuell gemessenen Wert anzeigt und dem PEAK-Wert (P), der für den maximal gemessenen Wert seit der letzten Nullstellung steht, unterschieden. Ab einem MOMENT-Wert von 09 setzt ein Signalton ein, welcher sich von dunkel (geringer MOMENT-Wert) nach hell (hoher MOMENT-Wert) verändert. Dies soll beim Auffinden des größten Fluoreszenzsignals einer Läsion helfen.



Abbildung 4 Beispielfoto des DIAGNOdent pen. Beschreibung im Text (Seite 20). Die Abkürzungen bedeuten: S: Sonde im Sondenhalter mit Austritt und Erfassung des Laserlichtes, M: Momentwertanzeige, P: Peakwertanzeige des Laserfluoreszenzwertes.

Das DIAGNOdent konnte sich aufgrund seiner hohen diagnostischen Aussagekraft und Reproduzierbarkeit am okklusalen Fissurenrelief und an Glattflächen von Milch- und bleibenden Zähnen in diversen Studien beweisen. So kamen die Autoren einer Übersichtsarbeit zu dem Schluss, dass das DIAGNOdent eine hilfreiche Ergänzung zur klinischen Untersuchung darstellt (Lussi et al., 1999, Shi et al., 2000). Es wird als reproduzierbare Methode mit hoher Sensitivität und Spezifität besonders bei weit fortgeschrittener koronaler Karies angesehen (Lussi et al., 2004).

Eine In-vitro-Studie zeigte für Wurzelkaries reproduzierbare Messwerte des DIAGNOdent von verschiedenen Bedienern an Wurzeloberflächen und eine mäßige Korrelation dieser Messwerte mit der histologischen Läsionstiefe und der Restdicke des Dentins (Wicht et al., 2002). In einer weiteren In-vitro-Studie wurde eine geringe Korrelation zwischen der histologischen Tiefe der Wurzelkariesläsion und den Werten des DIAGNOdent gefunden. Zusammenfassend wurde das DIAGNOdent in dieser Studie nicht als Hilfsmittel zur Diagnostik von Wurzelkaries empfohlen (Karlsson et al., 2009). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass kariöse Wurzeloberflächen höhere DIAGNOdent-Werte als gesunde Wurzeloberflächen aufwiesen (Zhang et al., 2016, Zhang et al., 2009). Auch wiesen aktive Wurzelkariesläsionen signifikant höhere DIAGNOdent Werte auf als inaktive Wurzelkariesläsionen (Zhang et al., 2009). Da Läsionen mit einer weichen Oberflächentextur signifikant höhere Fluoreszenzwerte als harte Läsionen aufwiesen, bietet das DIAGNOdent das Potenzial, eine Abschätzung zur Aktivität von Wurzelkariesläsionen zu ermöglichen (Haak and Wicht, 2004).

Weitere Studien zu der Übereinstimmung zwischen den Laserfluoreszenzwerten des DIAGNOdent und dem neuen DIAGNOdent pen sind widersprüchlich. Eine In-vitro-

Studie an Glattflächenkaries zeigte, dass der DIAGNOdent pen eine ähnliche Zuverlässigkeit und Genauigkeit bei der Quantifizierung von Glattflächenkaries aufwies wie das DIAGNOdent (Aljehani et al., 2007). In einer anderen Studie wurden jedoch mit dem DIAGNOdent pen signifikant niedrigere Laserfluoreszenzmittelwerte ermittelt als mit dem DIAGNOdent (Kuhnisch et al., 2007a).

Der DIAGNOdent pen wird aufgrund seiner hohen Reproduzierbarkeit zum Kariesmonitoring von koronaler Approximalkaries empfohlen und scheint dem Auswerten von Bissflügelaufnahmen in Sensitivität und Spezifität überlegen zu sein (Lussi et al., 2006). In einer In-vitro-Studie an Okklusalkaries wurden hohe Schwankungen der Laserfluoreszenzwerte festgestellt. Aufgrund dessen sollte der Diagnodent pen lediglich zusätzlich zur visuellen Inspektion und dem zahnärztlichen Röntgen verwendet werden (Kuhnisch et al., 2007b, Kuhnisch et al., 2007a).

Auch die Anwendung des DIAGNOdent pen an Wurzelkaries wurde bereits untersucht. Der potentielle Nutzen des Laserfluoreszenzverfahrens zur Identifizierung von Zahnstein auf Wurzeloberflächen wurde unter In-vitro-Bedingungen bestätigt (Rams and Alwaqyan, 2017). In einer weiteren Studie konnte, ebenfalls unter Laborbedingungen, nachgewiesen werden, dass sich der DIAGNOdent pen besser zur Erkennung von subgingivalem Zahnstein eignete als die taktile Beurteilung (Shakibaie and Walsh, 2015, Shakibaie and Walsh, 2016). In einer In-vitro-Studie wurden für den DIAGNOdent pen eine Sensitivität von 0,81 und Spezifität von 0,54 bei der Diagnostik von Sekundärkariesläsionen auf Wurzeloberflächen ermittelt. Damit hatte dieses Verfahren eine höhere Sensitivität und Spezifität als die röntgenologische Untersuchung oder visuell-taktilen Inspektion (Rodrigues et al., 2010). Eine andere In-vitro-Studie fand jedoch für ähnliche Läsionen nur eine Sensitivität von 0,44 bis 0,50 und Spezifität von 0,23 bis 0,38 für dieses Verfahren (Neuhaus et al., 2012). Bislang lassen sich keine Studien finden, die die klinische Anwendung des DIAGNOdent pens zur Diagnostik approximaler Wurzelkaries untersucht haben.

2.3.4 Transilluminationsverfahren

Leitet man Licht in den Zahn, breitet es sich durch die Zahnhartsubstanzen aus. Dabei bestimmt die Transluzenz der unterschiedlichen Substanzen aufgrund verschiedener Brechungseigenschaften die Streuung beziehungsweise Absorption des Lichtes. Da die Poren in kariöser Zahnhartsubstanz mit Wasser gefüllt sind, ist dort die Streuung und

Absorption des Lichts größer und die Läsion erscheint dunkel. Gesunder Zahnschmelz ist für sichtbares Licht vergleichsweise transluzent.

2.3.4.1 Diaphanoskopie/Faseroptiktransillumination

Den Effekt der unterschiedlichen Lichtbrechung von gesunder und kariöser Zahnhartsubstanz nutzt die faseroptische Transillumination (FOTI), welche auch als Diaphanoskopie bezeichnet wird. Dabei wird Licht, welches in einer starken Lichtquelle erzeugt wird, senkrecht auf die zu beurteilende Zahnregion geleitet. Mit Hilfe einer Digitalkamera werden digitale Bilder der transilluminieren Zahnhartsubstanz erzeugt und im Computer weiterverarbeitet (Schneiderman et al., 1997). Diese Aufnahmen des DIFOTI („Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination“) können archiviert und bei Bedarf zum Monitoring von Kariesläsionen als Referenz verwendet werden.

Studien, die diese Methode zur Beurteilung von koronaler Approximalkaries nutzten, beurteilten FOTI widersprüchlich. Einerseits wurde hinsichtlich der diagnostischen Genauigkeit und Reliabilität kein Vorteil gegenüber Röntgenaufnahmen beschrieben. So wurden in einer Übersichtsarbeit Sensitivitätswerte der Bissflügelaufnahmen zwischen 1,00 und 0,71 beziehungsweise 0,70 und 0,50 für FOTI beschrieben (Vaarkamp et al., 2000). In einer klinischen Studie lag die durchschnittliche Sensitivität für FOTI bei 0,04 und die Spezifität bei 1,00, wohingegen die Sensitivität von Röntgenbildern bei 0,63 und die Spezifität bei 0,93 lag (Hintze et al., 1998). Andererseits wurde FOTI als effiziente Alternative zu Röntgendiagnostik vorgeschlagen. Eine In-vitro-Studie zur Detektion von Okklusalkaries zeigte für FOTI Sensitivitätswerte von 0,32-1,00 für unterschiedliche Läsionstiefen sowie Spezifitätswerte von 0,23-1,00 und damit vergleichbare Werte mit der röntgenologischen Diagnostik mit 0,32-0,90 Sensitivität und 0,65-1,00 Spezifität (Cortes et al., 2000). In einer klinischen Studie konnte für die röntgenologische Diagnostik eine Sensitivität von 0,30 und für das FOTI von 0,68 sowie eine Spezifität von 0,99 für beide Verfahren festgestellt werden (Heinrich et al., 1991). Nach bestem Wissen der Autorin sind zum aktuellen Zeitpunkt keine Studien verfügbar, die FOTI zur Detektion von Wurzelkaries untersuchten.

2.3.4.2 Nahinfrarot-Transillumination

Das Verfahren der Nahinfrarot-Transillumination nutzt langwelliges Licht mit einer Wellenlänge von circa 780 nm, welches für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. Licht

dieser Wellenlänge durchdringt Zähne, die Gingiva und den Alveolarknochen besser als kurzwelligeres sichtbares Licht. Die DIAGNOcam (Abbildung 5), welche auf dem Prinzip der Nahinfrarot-Transillumination basiert, besteht aus flexiblen Beleuchtungsarmen (B), die den Zahn von seinen Seitenflächen umfassen. An deren Ende ist eine Laserdiode befestigt, die das Licht über den Alveolarknochen und die Zahnwurzel in die Zahnkrone einstrahlen lässt. Das nicht-sichtbare Licht wird im Zahn in Abhängigkeit von den vorhandenen Strukturen unterschiedlich gestreut und in Richtung Kaufläche auf einen CCD-Sensor im Handstück (H) gelenkt, der empfindlich auf Strahlung im nahen Infrarot-Bereich reagiert. Aufgrund von Echtzeit-Bildverarbeitung kann die Kamera unter Sicht im optimalen Winkel zum Zahn positioniert werden, bevor das Bild aufgenommen wird. Dieses Bild kann während des Recalls als Referenz dienen, um im gleichen Winkel ein erneutes Bild zur Verlaufskontrolle anzufertigen. Live-Beurteilung und Speichern der Bilder erfolgt über die KiD-Software (KaVo Integrated Desktop), welche mit gängiger Praxissoftware kompatibel ist.

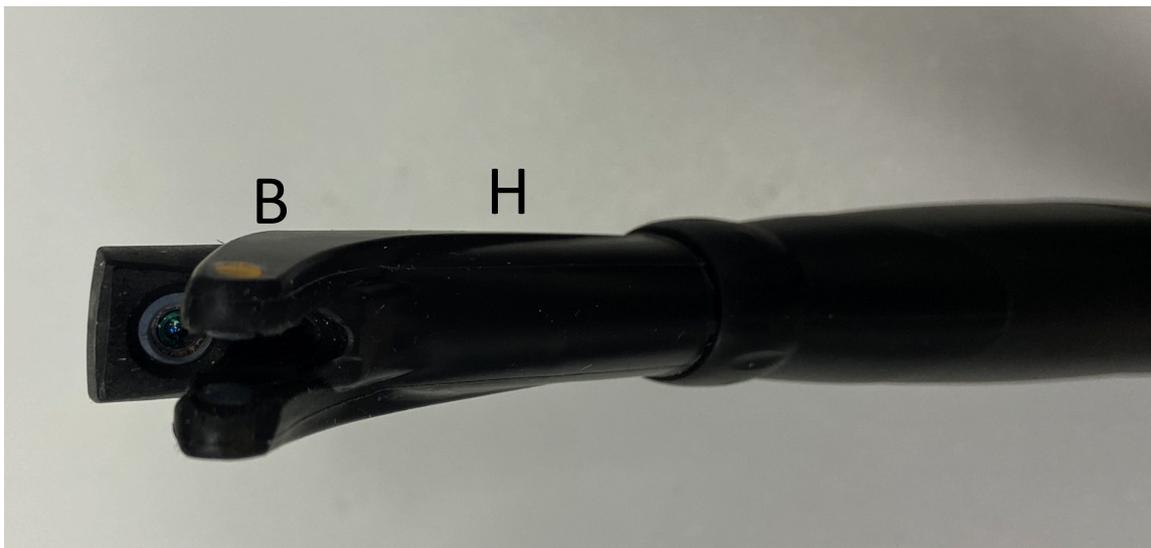


Abbildung 5 Beispielfoto der DIAGNOcam. Beschreibung im Text (Seite 23, 24). Die Abkürzungen bedeuten: (B) Beleuchtungsarme mit Laserdiode, (H) Handstücks mit CCD-Sensor am oberen Ende zum Erfassen der Nahinfrarot-Transillumination.

Für koronale, insbesondere initiale, Kariesläsionen erscheint die Nahinfrarot-Transillumination vielversprechend. Im Rahmen von In-vitro-Studien konnte das Potenzial der Nahinfrarot-Transillumination zur Erkennung von koronaler approximaler Karies im Seitenzahnbereich gezeigt werden (Abogazalah et al., 2017, Kunisch et al., 2019, Kocak and Cengiz-Yanardag, 2020). Dabei scheint die Nahinfrarot-

Transillumination vor allem bei der Früherkennung von Schmelzläsionen einen Vorteil gegenüber den Bitewings zu haben und sollte daher als individualisierte Präventivmaßnahme für ein nicht-invasives Kariesmanagement eingesetzt werden (Abdelaziz et al., 2018, Lederer et al., 2019b). Für die Diagnostik von approximaler koronaler Karies an bleibenden Zähnen mittels Nahinfrarot-Transillumination konnte eine Sensitivität von 0,99 und Spezifität von 0,94 festgestellt werden (Dundar et al., 2020). Weiterführend konnte bereits klinisch gezeigt werden, dass Nahinfrarotlicht in der Lage ist, Kariesläsionen sowohl approximal als auch okklusal darzustellen (Sochtig et al., 2014). Die Nahinfrarot-Transillumination gilt als Alternative zu Röntgenaufnahmen für die Erkennung von Approximalkaries bei Milchzähnen, die ohne ionisierende Strahlen auskommt (Alamoudi et al., 2019). Zur Erkennung von approximaler Sekundärkaries in der Nähe von Kompositfüllungen scheint die Nahinfrarot-Transillumination ebenfalls sinnvoll zu sein (Elhennawy et al., 2018).

Die Diagnostik von kariösen Läsionen im Dentin wird in der einschlägigen Literatur jedoch mit einer deutlich geringeren Sensitivität beschrieben. So kommt eine In-vivo-Studie zu dem Ergebnis, dass sich die Nahinfrarot-Transillumination zur Kariesdiagnostik von Milchzähnen aufgrund der vielen falsch-negativen Ergebnisse für Dentinkaries nicht eignet (De Zutter et al., 2020). Zu diesem Ergebnis kommt auch eine umfassende Metaanalyse, die keine Überlegenheit der Nahinfrarot-Transillumination bei der Erkennung von Dentinkaries verzeichnete (Marmaneu-Menero et al., 2020). Bislang lassen sich keine dedizierten Studien finden, die die Diagnostik von Wurzelkaries mittels der Nahinfrarot-Transillumination untersucht haben.

Tabelle 1 Studien zur Genauigkeit der Diagnostik von Wurzelkaries. Zusammengefasst dargestellt werden Studien, die die Genauigkeit verschiedener diagnostischer Methoden an Wurzelkaries untersuchten.

	Genauigkeit in Wurzelkariesstudien
Röntgenologische Diagnostik	<p>In-vitro: 79-prozentige (Nordenram et al., 1988) und 80-prozentige (Sikri and Sikri, 1991) Übereinstimmung der klinischen Untersuchung und der Auswertung von Röntgenbildern</p> <p>In-vitro: Sensitivität 0,40 und Spezifität 0,80 zur Erkennung von approximaler Sekundärkaries am zervikalen Rand von Amalgamrestorationen (Neuhaus et al., 2012)</p> <p>In-vitro: Spezifität 0,31 und Sensitivität 0,63 zur Erkennung von Sekundärkaries unter Kunststofffüllungen (Rodrigues et al., 2010)</p>
Kombination röntgenologische Diagnostik und visuell-taktile Inspektion	<p>In-vitro: Sensitivität 0,81 und Spezifität 0,54 zur Erkennung von Sekundärkaries unter Kunststofffüllungen (Rodrigues et al., 2010)</p>
Visuell-taktile Inspektion	<p>In-vitro: Sensitivität 0,75 und Spezifität 0,38 zur Erkennung von Sekundärkaries unter Kunststofffüllungen (Rodrigues et al., 2010)</p>
Laserfluoreszenzverfahren	<p>In-vitro: mäßige Korrelation der Laserfluoreszenzmesswerte mit der histologischen Läsionstiefe und der Restdicke des Dentins ($r_s=0,45$) (Wicht et al., 2002)</p> <p>In-vitro: „geringe Korrelation“ ($\rho= 0,22$ und $0,31$) zwischen histologischer Tiefe und Laserfluoreszenzwerten (Karlsson et al., 2009)</p> <p>In-vivo: kariöse Wurzeloberflächen weisen höhere Laserfluoreszenzwerte als gesunde Wurzeloberflächen auf (Zhang et al., 2016, Zhang et al., 2009)</p> <p>In-vitro: Sensitivität 0,81 und Spezifität 0,54 zur Erkennung von Sekundärkaries unter Kunststofffüllungen (Rodrigues et al., 2010)</p> <p>In-vitro: Sensitivität 0,44 bis 0,50 und Spezifität 0,23 bis 0,38 zur Erkennung von approximaler Sekundärkaries am zervikalen Rand von Amalgamrestorationen (Neuhaus et al., 2012)</p>
Nahinfrarot-Transillumination	Keine Studien für Wurzelkaries verfügbar

3 Fragestellung

Wurzelkaries hat eine zunehmende Relevanz, gerade für ältere Patientengruppen. Gleichzeitig besteht bei diesen Patienten mit steigendem Alter häufig eine zunehmend eingeschränkte Behandlungsfähigkeit. Besonders bei diesen Patienten ist es wichtig, durch frühzeitige Diagnostik klassische operative Behandlung weitestgehend zu vermeiden. Eine solche Diagnostik ist gerade bei approximalen Wurzelkariesläsionen mit rein visuell-taktiler Untersuchung nicht immer zuverlässig.

Hilfsmittel zur Kariesdiagnostik könnten dazu beitragen, die Genauigkeit der Kariesdiagnose zu verbessern. Während für die frühzeitige Erkennung von koronaler Karies durch diagnostische Hilfsmittel eine Reihe von Studien verfügbar sind, welche die diagnostische Genauigkeit und Zuverlässigkeit dieser Hilfsmittel bei der Untersuchung von Kronenkaries erfasst haben (Marczuk-Kolada et al., 2020, Surme et al., 2020, Tassoker et al., 2020), sind diese Parameter für approximaler Wurzelkariesläsionen noch nicht hinreichend untersucht worden. Daher war es das Ziel dieser Studie, die diagnostische Genauigkeit und Reliabilität von röntgenologischer Diagnostik, visuell-taktiler Inspektion, Laserfluoreszenzverfahren und Nahinfrarot-Transillumination bei der Untersuchung von Wurzelkaries zu vergleichen. Als Nullhypothese wurde angenommen, dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den unterschiedlichen diagnostischen Methoden hinsichtlich der Genauigkeit existieren.

4 Material und Methode

4.1 Übersicht

Im Rahmen dieser In-vitro-Studie wurde die Genauigkeit und Reliabilität unterschiedlicher diagnostischer Methoden für die Detektion und Beurteilung von approximalen Wurzelkariesläsionen in einem dreistufigen Prozess untersucht (Abbildung 6). Im Einzelnen wurden die röntgenologische und die visuell-taktile Kariesdiagnostik sowie das Laserfluoreszenzverfahren und die Nahinfrarot-Transillumination für die Diagnostik der Wurzelkariesläsionen eingesetzt und mit der histologischen Kariesausdehnung an Zahnschliffen als Referenz verglichen.

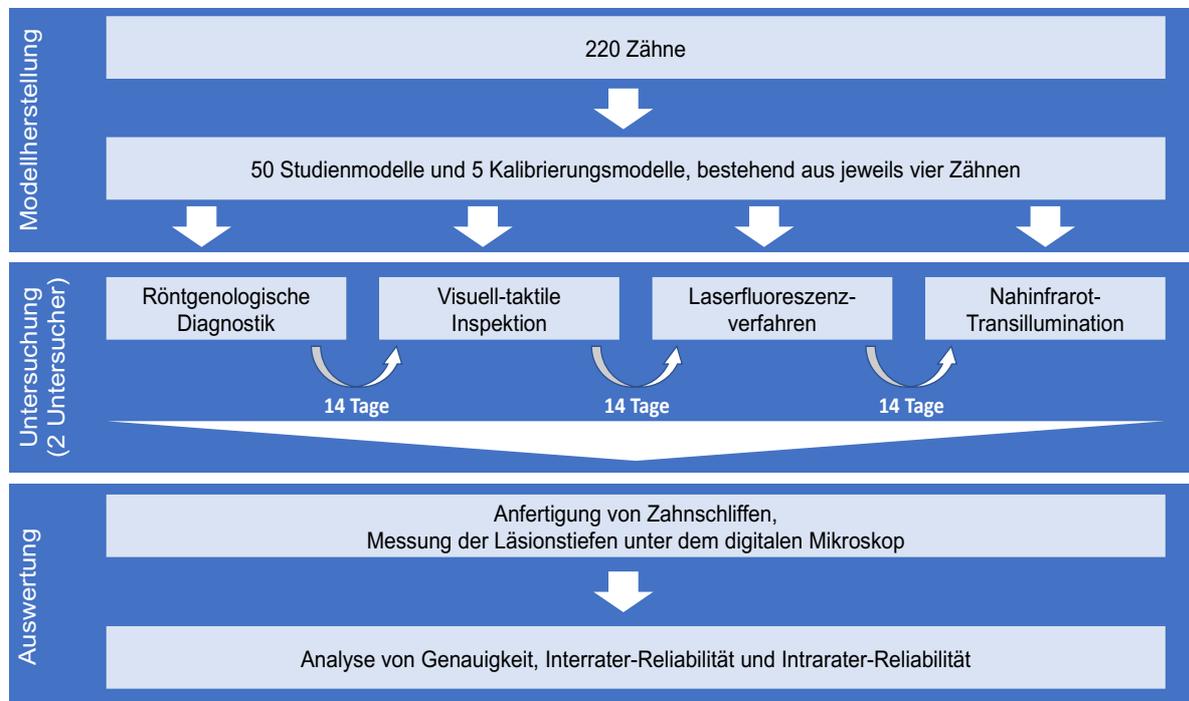


Abbildung 6 Schematische Darstellung des Studienablaufs. Der Studienablauf gliedert sich in die drei Abschnitte: Modellherstellung, Untersuchung und Auswertung. Zu beachten ist, dass die Untersuchung der 5 Kalibrierungsmodelle zweimalig zur Erhebung der Intrarater-Reliabilität durchgeführt wurde und anschließend keine Zahnschliffe dieser Modelle hergestellt wurden.

4.2 Verwendete Zähne und vorbereitende Maßnahmen

Für die Studie wurden 220 humane, extrahierte Zähne (110 Prämolaren und 110 Molaren) gesammelt, welche von Patienten unterschiedlichen Geschlechts und Alters stammen. Hierfür liegt ein Ethikantrag (Ethikkommission-Charité-Universitätsmedizin Berlin EA4/102/14) vor. Die Zähne wurden nach der Extraktion fortwährend in 0,5-

prozentigem Chloramin-T über unterschiedlich lange Zeiträume gelagert. Die für diese Arbeit verwendeten Zähne sollten die folgenden Anforderungen erfüllen:

- Prämolare oder Molare
- bleibender Zahn
- keine Frakturen
- keine Füllungen an der Wurzel
- koronale Füllungen mit maximal zweiflächiger Ausdehnung
- keine überkronten Zähne

Zunächst wurden die Zähne von äußerlichen Verunreinigungen, Zahnstein und Gewebereste mit einem Scaler (S1296, Hu-Friedy, Chicago, IL, USA) befreit, mit einem Polierbürstchen (ORBIS ZR-Bürsten, Nylonborsten, ORBIS Dental, Münster, Deutschland) und Polierpaste (Proxyl RDA7, Ivoclar Vivadent, Schaan, Liechtenstein) gereinigt und mit konsekutiven Nummern beschriftet (Edding 141 F, Ahrensburg, Deutschland). Zur Dokumentation wurden alle Zähne jeweils von der mesialen und distalen Seite fotografiert (EOS 400D, Canon, Tokio, Japan). Für die Modellherstellung wurden die Zähne in 55 Gruppen bestehend aus vier Zähnen (je zwei Prämolaren und zwei Molaren) aufgeteilt. Dabei wurden Zähne mit beziehungsweise ohne Wurzelkaries zufällig den Zahngruppen zugeordnet. Weitere Kriterien für die Zuordnung waren Größe und Zahnmorphologie, um die Approximalräume der Zahngruppen in den Studienmodellen möglichst realistisch zu gestalten.

4.3 Herstellung der Studienmodelle

Die Zähne wurden für die Simulation der Untersuchung am Phantomkopf in ein Modell aus Epoxidharz überführt, welches in einer anderen Studie von Elhennawy et al. genutzt wurde (Elhennawy et al., 2018). Die Zahngruppen wurden in Wachsformen für das Studien- und Funktionsprüfgerät (Typodont/Dentoform-Gerät, DENTAURUM, Ispringen, Deutschland) platziert. Dabei wurden die Zähne in engem Approximalkontakt in Wachs aufgestellt und das Wachs (DENTAURUM, Ispringen, Deutschland) bis auf Höhe des prothetischen Äquators modelliert (Abbildung 7 A). Die Positionen der Frontzähne wurden freigelassen. Um ein Negativ der Wachsmodelle herzustellen, wurden die Modelle in einer selbst hergestellten Vorrichtung (Abbildung 7 B) fixiert und diese Form mit Silikon-Dubliermasse (Fegura Sil hydro spezial II, Feguramed, Buchen, Deutschland) aufgefüllt bis das gesamte Wachsmodell, inklusive der Probezähne, gefasst war. Nach

dem Aushärten des Silikons für 40 Minuten wurde das Modell aus der Form entfernt. Die acht Probezähne wurden aus dem Wachsmodell entnommen, von Wachsresten gereinigt und an der entsprechenden Position in der Dublierform wieder eingesetzt. Die Form wurde im Bereich der Probezähne mit einer circa 1 cm dicken Schicht Flüssigsilikon (Honigum-Light, DMG, Hamburg, Deutschland) aufgefüllt (Abbildung 7 C), um später ein ungewolltes Eindringen des Epoxidharzes in die Kariesläsionen zu verhindern. Nach Erhärten des Flüssigsilikons wurden die Zähne in transparentes Epoxidharz (Epoxy Riesin, EpoThin™ 2, BUEHLER, Esslingen am Neckar, Deutschland) eingebettet. Das Harz mit dem zugehörigen Härter wurde im Verhältnis 2:1 zwei Minuten lang mit einem Silikonspatel angerührt und anschließend in das Silikonmodell eingefüllt. Unmittelbar nach dem Auffüllen wurde eine Montageplatte mit Schraubengewinde (Montageplatte-ART 120, SAM Präzisionstechnik, Gauting, Deutschland) auf das noch flüssige Epoxidharz gelegt. Nach mindestens neunstündiger Aushärtung des Harzes wurden die Modelle aus der Silikonform entnommen und die Silikonreste entfernt. Scharfe Kanten des Epoxidharzes wurden mittels Hartmetallfräse und Handstück beseitigt. Der Verlauf der Gingiva wurde durch eine Modellation mit rosa Plattenwachs (S-U- Plattenwachs rosa, Schuler-Dental, Ulm, Deutschland) nachgeahmt (Abbildung 7 D). Dabei wurde darauf geachtet, dass die später zu diagnostizierenden Wurzeloberflächen nicht von Wachs bedeckt waren.



Abbildung 7 A



Abbildung 7 B



Abbildung 7 C



Abbildung 7 D

Abbildung 7 Schematischer Ablauf der Modellherstellung. *Abbildung 7 A zeigt die Probezähne zweier Modelle in der Wachsfarbe, Abbildung 7 B zeigt die Wachsförmchen mit Probezähnen in der Form zum Ausgießen, Abbildung 7 C zeigt die Probezähne mit Honigum (gelbe Masse) im Silikonmodell, Abbildung 7 D zeigt das fertige Modell mit Wachsmodellation.*

4.4 Anfertigen der Röntgenbilder

Von den Zahngruppen in jedem Modell wurden Röntgenbilder in Paralleltechnik angefertigt. Hierfür wurde ein intraorales Röntgengerät (Heliodent Plus, Sirona Dental System, New York, USA) und ein Sensor (XIOS XG, Sirona Dental System, New York, USA) genutzt. Die Modelle wurden in einer Vorrichtung bestehend aus knetbarem Abformmaterial (silaplast Futur, Detax, Ettlingen, Deutschland) und einer Bauplatte (LEGO Gruppe, Billund, Dänemark) fixiert (Abbildung 8). Die Modelle wurden so ausgerichtet, dass die Zähne in orthoradialer Richtung vom Zentralstrahl der Röntgenröhre getroffen wurden. Um die natürliche Absorption der Röntgenstrahlen durch das Weichgewebe nachzuahmen, wurde eine 15 mm dicke Plexiglasplatte zwischen Röntgenquelle und Studienmodell platziert (Umwali et al., 2016, Schwendicke et al., 2014). Der Abstand von Röntgenröhre zum Film betrug 250 mm. Die Aufnahmen wurden bei einer Belichtungszeit von 0,06 Sekunden, einer Röhrenspannung von 65 kV und einer Stromstärke von 7mA durchgeführt.

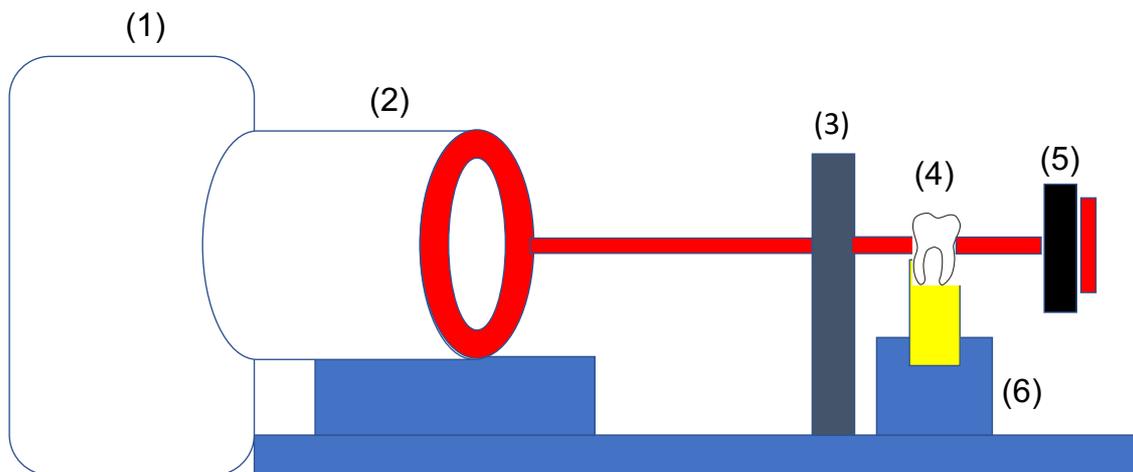


Abbildung 8 Schematischer Aufbau der Röntgenvorrichtung. Die Beschriftungen bedeuten: (1) Röntgentubus, (2) Ringhalter, (3) Plexiglasplatte, (4) Studienmodell mit Zahn, (5) Sensor, (6) Tisch mit Auflagen aus Silaplast.

4.5 Durchführung der Untersuchungen

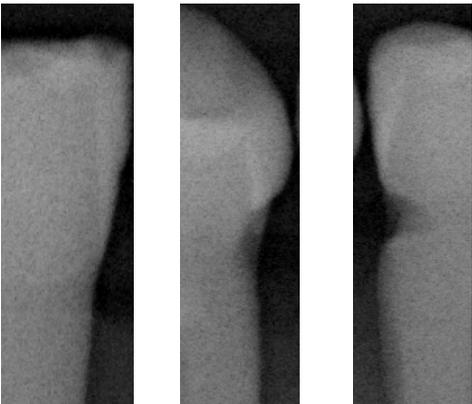
Die kariesdiagnostischen Untersuchungen wurden von zwei unabhängigen, approbierten Zahnärzten mit mehrjähriger Berufserfahrung durchgeführt, welche nicht in die Modellherstellung und Auswahl der Zähne involviert waren. Vor Beginn der Untersuchungen wurden die Untersucher in den Ablauf und in die Handhabung der

Geräte zur Untersuchung eingewiesen. Anhand von fünf exemplarischen Modellen wurde eine Kalibrierung der Untersucher durchgeführt.

Für jede der vier diagnostischen Methoden wurde ein Befundbogen ausgehändigt, auf dem die Modelle mit den zu untersuchenden Flächen aufgeführt waren. Da nur Zahnflächen mit Nachbarzahn begutachtet wurden, ergaben sich pro Modell sechs Flächen und damit insgesamt 330 zu befundene Flächen. Für die visuell-taktile Inspektion wurden die ICDAS-Kriterien angewandt. Für die Auswertung der Röntgenbilder und die Betrachtung mittels Nahinfrarot-Transillumination wurden Grenzwerte festgelegt, die an die ICDAS-Kriterien für Wurzelkaries angelehnt waren (Tabelle 2) (Topping and Pitts, 2009). Dabei wurde jedes Mal eine Einteilung in drei Grade (Grad 0 - Grad 2) vorgenommen. Grad 1 und Grad 2 definieren sich nachfolgend als „alle Läsionen“ und Grad 2 als „fortgeschrittene Läsionen“.

Die Untersuchungsverfahren wurden zu unterschiedlichen Zeitpunkten durchgeführt (in der Reihenfolge: Röntgen, visuell-taktile Inspektion, Laserfluoreszenzverfahren und Nahinfrarot-Transillumination). Zwischen den einzelnen Tests wurde eine Zeitspanne von 14 Tagen eingehalten, um das Wiedererkennen von Zähnen ausschließen zu können. Nach Abschluss der Untersuchung der 50 Studienmodelle wurden die fünf Kalibrierungsmodelle mithilfe aller vier diagnostischen Methoden jeweils zweimalig von beiden Untersuchern ausgewertet. Auch hier wurde ein zeitlicher Abstand von 14 Tagen zwischen der jeweiligen diagnostischen Methode eingehalten.

Tabelle 2 Kriterien für die Diagnostik mittels der diagnostischen Methoden. Innerhalb der Tabelle werden die Kriterien, Grenzwerte und Beispiele für die jeweilige verschiedenen diagnostischen Methoden für alle drei Grade definiert.

	Kriterien	Grundlage der Diagnostik
Röntgenologische Diagnostik	Ausdehnung der Transluzenz im Röntgenbild	<p>Grad 0-2 basierend auf ICDAS-Kriterien: (W0: keine Kavitation, W1: Kavitation ≤0,5 mm, W2: Kavitation >0,5 mm) Beispiele:</p>  <p>Grad 0 Grad 1 Grad 2</p>
Visuell-taktile Inspektion	Visuelle Farbabweichung und taktiles Ertasten von Unregelmäßigkeiten und Läsionstiefe in der Morphologie der Zahnoberfläche unter leichtem Druck	<p>ICDAS-Kriterien Beispiele:</p> <p>W0</p> <ul style="list-style-type: none"> • gesunde Wurzeloberfläche  <p>W1</p> <ul style="list-style-type: none"> • verfärbte Wurzeloberfläche • Kavität <0,5 mm  <p>W2</p> <ul style="list-style-type: none"> • verfärbte Wurzeloberfläche • Kavität >0,5mm 
Laserfluoreszenzverfahren	Mittelwert nach dreimaliger Untersuchung der Oberfläche mit dem DIANGOdent pen durch druckloses Ertasten	<p>Laserfluoreszenzwerte-Werte von 0-99, wobei die Empfehlung des Herstellers zur Einteilung in drei Grade auf die ICDAS Kriterien übertragen wurde (Kavo, 2001): W0: Messwert 0-7; Initialdiagnose W1: Messwert 8-15; kariöse Frühläsion W2: Messwert ≥16; kariöse Läsion</p>
Nahinfrarot-Transillumination	Ausdehnung der dunklen (=kariösen) Bereiche im Live-Bild	<p>ICDAS-Kriterien (W0: keine Kavitation, W1: Kavitation ≤0,5 mm, W2: Kavitation >0,5 mm)</p>

4.5.1 Röntgenologische Diagnostik

Die Auswertung der Röntgenbilder (Abbildung 2, Seite 16) erfolgte auf einem 27-Zoll-Befundungsmonitor unter Nutzung der Software Sidexis next generation (Sirona Dental System, Bensheim, Deutschland). Die Befundung fand auf Basis der Einteilung des ICDAS-Klassifikationssystems statt (Topping and Pitts, 2009). Je nach Ausdehnung der Transluzenz im Röntgenbild wurde eine Einteilung gemäß ICDAS-Klassifikationssystem vorgenommen (Tabelle 1).

4.5.2 Klinische Diagnostik

Die klinischen Untersuchungen an den Modellen wurden in Phantomköpfen (Phantomkopf PK-2 TSE ST, Frasaco, Tett nang, Deutschland) mit einer Gesichtsmaske (Gesichtsmaske P-6 GM, Frasaco, Tett nang, Deutschland) durchgeführt. Die Modelle wurden jeweils abwechselnd in Oberkiefer- und Unterkieferposition im Phantomkopf fixiert.

4.5.2.1 Visuell-taktile Inspektion

Zur visuell-taktilen Diagnostik wurde ein Mundspiegel (M4C, Hu-Friedy, Chicago, IL, USA) sowie eine Zahnsonde (Zahnsonde, 8-Kant-Griff Figur 9 (1085/9, Henry Schein, Melville, USA) verwendet. Die Untersucher trugen während der Durchführung der Untersuchung Lupenbrillen in 2,5-facher (Zeiss GTX, Carl Zeiss AG, Oberkochen, Deutschland) beziehungsweise 2,8-facher Vergrößerung (Orascoptic Lupenbrille TTL HiRes, Sigma Dental Systems – EMASDI GmbH, Handewitt, Deutschland). Die Untersuchung wurde am feuchten Modell durchgeführt und die Untersucher konnten je nach Bedarf die Multifunktionsspritze (Sprayvit, Sirona, Bensheim, Deutschland) der Einheit zum Trocknen oder Befeuchten der Zähne nutzen. Der zu diagnostizierende Bereich wurde unter Zuhilfenahme der Operations-Leuchte an der Behandlungseinheit (Sirona C4+, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) ausgeleuchtet.

4.5.2.2 Laserfluoreszenzverfahren

Die Kariesdiagnostik mittels Laserfluoreszenz erfolgte mit einem DIAGNOdent pen (KaVo, Biberach, Deutschland). Vor jeder Untersuchungssitzung wurde der DIAGNOdent pen mithilfe des zugehörigen Keramikstandards nach Herstellerangaben geeicht und die Sondenspitze des DIAGNOdent pen auf Unversehrtheit überprüft. Weiterhin wurde vor

der Messung jedes Zahnes der DIAGNOdent pen an einer kariesfreien Stelle auf die Grundfluoreszenz des zu untersuchenden Zahnes kalibriert. Die Zähne und Zahnzwischenräume waren während der Messungen trocken. Um Interferenzen mit äußeren Lichtquellen zu minimieren, wurden die Messungen nicht unter direktem Lichteinfall aus der OP-Leuchte durchgeführt (Kavo, 2001). Die Durchführung der Messungen erfolgte ohne Druck und durch mehrmaliges vorsichtiges Abtasten der Zahnoberfläche jeweils von bukkal und oral. Der maximale Messwert (Peak-Wert) jeder Messung wurde erfasst. Pro untersuchter Zahnfläche wurde die Messung dreimal wiederholt. Vor der weiteren Datenaufbereitung wurde aus den drei Messungen ein Mittelwert ermittelt.

4.5.2.3 Nahinfrarot-Transillumination

Die Kariesdiagnostik mittels Nahinfrarot-Transillumination erfolgte durch die DIAGNOcam (KaVo, Biberach, Deutschland) und zugehöriger Software (KaVo KiD-Software, KaVo Integrated Desktop/Version 2.4.1.6821, Biberach, Deutschland), welche auf einem Tablet PC (Microsoft Surface Pro2, Redmond, USA) installiert war. Die Untersuchung fand an einem gut durchfeuchteten Zahn statt und als Lichtleiter-Ansatz (Okklusal-Tip) diente der „Tip large“. Um die Auswertung ähnlich der klinischen Situation zu gestalten, wurden keine Fotos der zu untersuchenden Fläche angefertigt, sondern die Diagnose unmittelbar während der Auswertung im Live-Modus gestellt. Die Kamera wurde dabei unter direkter Sicht im optimalen Winkel zum Zahn positioniert und es wurde versucht, möglichst weit in den Approximalbereich einzudringen. Die an der Einheit angebrachte Leuchte wurde ausgeschaltet, um mögliche Interferenzen mit externen Lichtquellen zu vermeiden.

4.6 Anfertigung der Zahnschliffe

Zur Evaluierung der tatsächlichen Ausdehnung der Kariesläsionen wurden von den untersuchten Zähnen Zahnschliffe hergestellt (Abbildung 11) und unter einem digitalen Lichtmikroskop untersucht. Die Methodik der Evaluation war angelehnt an das Vorgehen einer Studie von Karlsson et al. (Karlsson et al., 2009). Die Zähne wurden unter Einsatz einer Diamantbandsäge (Exakt, Norderstedt, Deutschland) mit einem 0,2 mm dicken Sägeblatt aus den Modellen separiert. Die Region der Läsion mit der größten koronal-apikalen Ausdehnung der Karies wurde auf den zuvor angefertigten Fotos durch einen

senkrechten Strich digital gekennzeichnet (Adobe Photoshop CC 2015.5, Dublin, Ireland) (Abbildung 9). Diese Linie diente als Vorlage zum mesio-distalen Durchtrennen des Zahnes und wurde auf den Zahn übertragen.

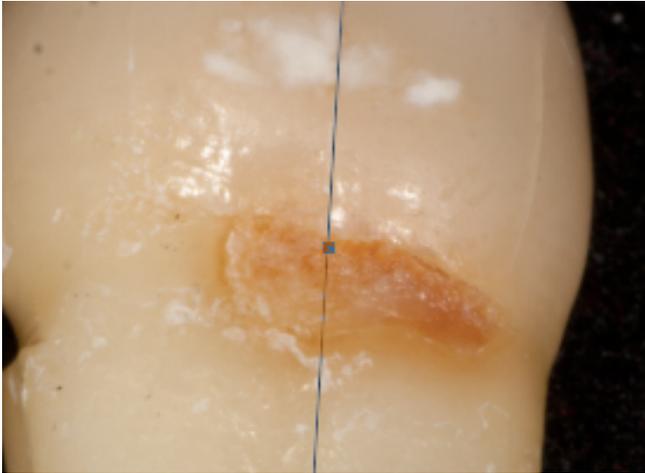


Abbildung 9 Foto eines Zahnes mit Wurzelkariesläsion. Die Anzeichnung stellt die Region der Läsion mit der größten koronal-apikalen Ausdehnung dar und war somit die Grundlage für den Schnitt.

Nach dem Durchtrennen des Zahnes mittels Diamantbandsäge (Exakt, Norderstedt, Deutschland) wurde die Zahnoberfläche auf einem Schleifteller (LaboPol-25, Struers, Willich, Deutschland) mit einem Schleifpapier mit 800er Körnung (CarbiMet™ P800, BUEHLER, Esslingen am Neckar, Deutschland) bei 200 rpm geglättet (Abbildung 10 A). Der zu untersuchende Teil des Zahnes wurde anschließend in Einbettformen überführt und in Polymethylmethacrylat eingebettet (Technovit 4004 Flüssigkeit, Kulzer, Hanau, Deutschland). Nach mindestens sechs Minuten wurden die eingebetteten Zähne aus den Formen entfernt und mit der zu untersuchenden Seite nach unten auf einem Objektträger (Plexiglas-Objektträger, patho-service, Walter Messner GmbH, Oststeinbeck, Deutschland) mittels doppelseitigen Klebbandes (Doppelseitige Gewebekleband, Tesa, Norderstedt, Deutschland) befestigt (Abbildung 10 B). Um das Ausmessen der Läsion in einer Ebene zu gewährleisten, wurden die Schnitte mittels des sogenannten „Sandwich-Verfahrens“ getrimmt. Die nicht zu untersuchende Oberseite des Kunststoffblocks wurde parallel zur Schnittebene an einem Schleifgerät (Mikroschleifsystem Exakt 400 CS, Exakt, Norderstedt, Deutschland) getrimmt. Die getrimmte Fläche wurde mit Sekundenkleber (UHU blitzschnell PIPETTE Sekundenkleber, UHU, Bühl/Baden, Deutschland) auf einem zweiten Objektträger (Plexiglas-Objektträger, patho-service,

Walter Messner GmbH, Oststeinbeck, Deutschland) fixiert. Nach dem Aushärten des Sekundenklebers für mindestens 30 Minuten konnte der zuerst befestigte Objektträger entfernt werden.

Nun befand sich erneut die zu untersuchende Fläche auf der Oberseite des Objektträgers und wurde mit Schleifpapier (Exakt Schleifpapier, P500 / 270 mm, Exakt, Norderstedt, Deutschland) planparallel geschliffen (Abbildung 10 C). Diese Fläche wurde final mit Hilfe von Sekundenkleber auf einem Objektträger (Plexiglas-Objektträger, patho-service, Walter Messner GmbH, Oststeinbeck, Deutschland) befestigt. Um den Sekundenkleber gleichmäßig zu verteilen, wurde dafür die EXAKT Klebemaschine (Präzisionsklebepresse, Exakt, Norderstedt, Deutschland) verwendet. Anschließend folgte ein gezielter Sägeschnitt, um einen circa 500 µm dicken Schnitt der Probe zu erhalten. Dies wurde mittels 0,1 mm dicker Diamantsäge (Exakt, Norderstedt, Deutschland) durchgeführt. Es folgte das Vermessen des nun entstandenen Schnitts, um die genaue Schichtdicke zu ermitteln. Für den Klebespalt zwischen Kunststoffblock mit Zahn und Objektträger wurde ein empirisch ermittelter Wert von 30 µm abgezogen. Um Vergleichbarkeit in der Auswertung der Proben sicherzustellen, wurde eine einheitliche Dicke von 300 µm für die Dünnschnitte angestrebt. Durch Einstellen dieses Wertes in das Exakt Mess-System (Exakt Mess-System AW 110, Norderstedt, Deutschland) und fortwährender manueller Kontrolle der Dicke durch Planschleifen (P1200, WS FLEX 18, Hermes Schleifmittel, Hamburg, Deutschland) wurden die Dünnschliffe angefertigt (Abbildung 10 D). Zuletzt wurde die freigelegte Oberfläche der Probe poliert (P4000 Siliciumcarbid, Kulzer, Hanau, Deutschland).

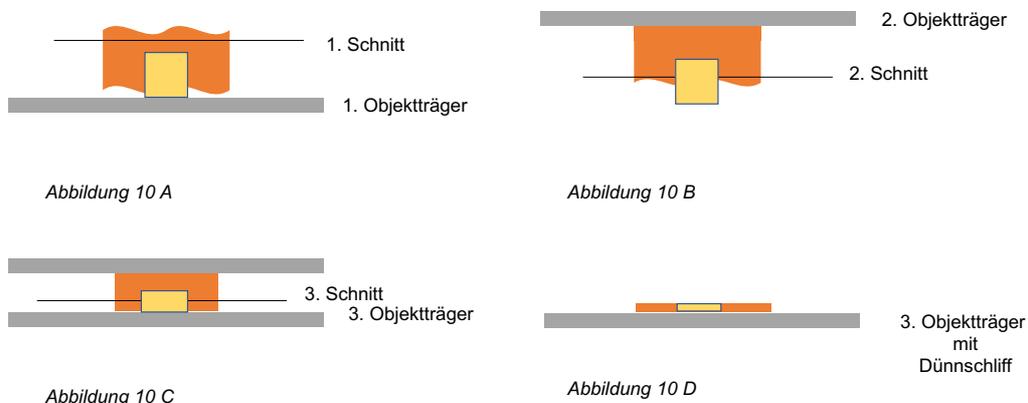


Abbildung 10 Schematischer Ablauf der Herstellung des Zahnschliffs. Dabei stellt die orange gekennzeichnete Fläche den Kunststoffblock und die gelb gekennzeichnete Fläche den Probezahn dar.

Die Zahnschliffe wurden während und nach der Verarbeitung in einem mit Chloramin-T befüllten Behälter aufbewahrt. Die Flüssigkeit wurde wöchentlich gewechselt.

4.7 Messung der Läsionstiefe mit dem digitalen Mikroskop

Als Referenz für die Ermittlung der Genauigkeit der diagnostischen Methode wurde die Ausdehnung der Kariesläsionen auf den Zahnschliffen unter einem digitalen Mikroskop (VHX-5000, Keyence, Osaka, Japan) gemessen. Dabei wurde die Ausdehnung der kariösen Läsion in zwei Grade eingeteilt (Grad 1: Kavitationstiefe unter 0,5 mm, Grad 2: Kavitationstiefe über 0,5 mm). Diese Einteilung ist angelehnt an die Einteilung des ICDAS Klassifikationssystem (W1: Kavitationstiefe unter 0,5 mm, W2: Kavitationstiefe über 0,5 mm) (Topping and Pitts, 2009). Zur Betrachtung wurde die Koaxialbeleuchtung – Hellfeld – verwendet. Die Probe wurde mit dem Standardobjektiv (Standard Zoomobjektiv, VH-Z20T, Keyence, Osaka, Japan) bei 20-facher Vergrößerung betrachtet. Um einheitliche Bilder zu erhalten, wurde stets im „Easy Mode“ der Keyence Software (VHX, Keyence, Osaka, Japan) gearbeitet und zunächst ein „Standbild“ erzeugt. Anschließend wurde an diesem Bild die Messung vorgenommen. Die erste Linie wurde entlang der Wurzeloberfläche des Zahnes gezogen (A). Davon ausgehend wurde eine zweite Linie im rechten Winkel angelegt. Mit dieser Linie wurde der Abstand der Wurzeloberfläche bis zur tiefsten Ausdehnung der Läsion gemessen und eingezeichnet (B) (Karlsson et al., 2009) (Abbildung 11).

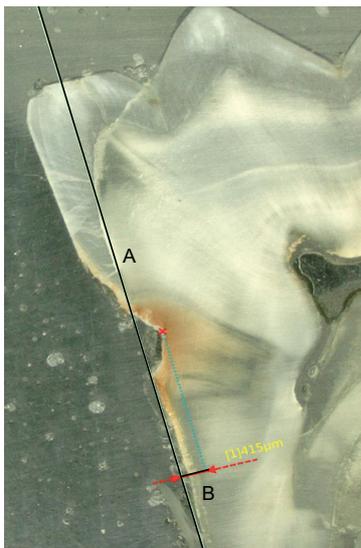


Abbildung 11 Messung der Läsionsausdehnung im Zahnschliff. Der Zahnschliff wird dargestellt in 20-facher Vergrößerung unter dem digitalen Mikroskop. Die Linie (A) ist parallel zur Wurzeloberfläche, die Linie (B) misst die Läsionsausdehnung im µm.

4.8 Statistische Auswertung

Zur statistischen Auswertung wurde SPSS für Windows, Version 25, verwendet. Dabei wurden jeweils die Genauigkeit und Reliabilität der diagnostischen Methoden zur Erfassung aller Läsionen (Grad 1 und 2) und zur Erfassung von fortgeschrittenen Läsionen (nur Grad 2) evaluiert.

4.8.1 Quantitative Erfassung der Genauigkeit

4.8.1.1 Sensitivität und Spezifität

Die Sensitivität und Spezifität gelten als Güteprädikate für die Genauigkeit von diagnostischen Tests. Die Sensitivität beschreibt die Fähigkeit eines Verfahrens, erkrankte Personen tatsächlich als erkrankt zu erkennen. Sie ist somit der prozentuale Anteil der richtig positiven Diagnosen an der Gesamtheit der Erkrankten und berechnet sich folgendermaßen:

$$\text{Sensitivität} = \frac{\text{Richtig Positiv}}{\text{Richtig Positiv} + \text{Falsch Negativ}}$$

Die Spezifität hingegen ist die Fähigkeit eines Verfahrens, gesunde Patienten als gesund zu erkennen. Sie ist somit der prozentuale Anteil der richtig negativen Diagnosen an der Gesamtheit der Nichterkrankten und berechnet sich folgendermaßen:

$$\text{Spezifität} = \frac{\text{Richtig Negativ}}{\text{Richtig Negativ} + \text{Falsch Positiv}}$$

Zur weiteren Einschätzung der Aussagekraft einer diagnostischen Methode kann der prädiktive Wert eingesetzt werden. Man unterscheidet zwischen dem positiven prädiktiven Wert (PPV) und dem negativen prädiktiven Wert (NPV). Der PPV gibt an, mit welcher Wahrscheinlichkeit beim Feststellen eines positiven Tests eine bestimmte Erkrankung tatsächlich vorliegt. Dementsprechend gibt der NPV an, mit welcher Wahrscheinlichkeit bei einem negativen Testresultat, die betreffende Krankheit nicht vorliegt. Der prädiktive Wert ist abhängig von der Prävalenz, das heißt von der Häufigkeit einer Krankheit in einer Bevölkerung zu einem bestimmten Zeitpunkt.

PPV und NPV errechnen sich wie folgt:

$$\text{PPV} = \frac{\text{Anzahl der richtig positiven}}{(\text{Anzahl der richtig positiven} + \text{Anzahl der falsch positiven})}$$

$$\text{NPV} = \frac{\text{Anzahl der richtig negativen}}{(\text{Anzahl der richtig negativen} + \text{Anzahl der falsch negativen})}$$

4.8.1.2 ROC-Analyse und AUC-Wert

Aus der Kombination von Sensitivität und Spezifität können Receiver Operating Characteristics-Kurven (ROC-Kurven) erstellt werden. Sie eignen sich zur Bewertung der diagnostischen Genauigkeit. Die Wertepaare der Sensitivität der verschiedenen diagnostischen Methoden werden an der y-Achse gegen die Komplementärwerte der Spezifität zu 1 (1-Spezifität) an der x-Achse aufgetragen. Je höher die diagnostische Aussagekraft eines Testes ist, desto mehr nähert sich die ROC-Kurve in Richtung dem linken oberen Diagrammbereich an. Das Ergebnis eines diagnostischen Tests ohne Aussagekraft würde eine Diagonale durch das Diagramm darstellen.

Durch Berechnung der Fläche unter den ROC-Kurven (Area Under the Curve – AUC-Wert) kann der diagnostische Nutzen der jeweiligen diagnostischen Methode quantifiziert werden. Die AUC kann Werte zwischen 0,5 (kein diagnostischer Nutzen) -1 (höchstmöglicher diagnostischer Nutzen) erreichen.

4.8.1.3 Two-sample T-Test

Der Two-sample T-Test wurde angewandt, um die AUC-Werte der unterschiedlichen diagnostischen Methoden miteinander statistisch zu vergleichen. Dabei wurde das Signifikanzniveau bei $p < 0,05$ festgelegt.

4.8.2. Quantitative Erfassung der Reliabilität

Zur Erfassung der Inter- beziehungsweise Intrarater Reliabilität wurden Kreuztabellen erstellt, in denen die Ergebnisse der Untersuchungen zwischen den Untersuchern (Interrater-Reliabilität) beziehungsweise die Ergebnisse eines Untersuchers zu unterschiedlichen Untersuchungszeitpunkten (Intrarater-Reliabilität) zusammengefasst wurden. Der Grad der Übereinstimmung wurde mittels Cohen's Kappa-Statistik erfasst.

Die Interpretation der Kappa-Werte wurde anhand der Einteilung von Landis und Koch vorgenommen (Landis and Koch, 1977) (Tabelle 3).

Tabelle 3 Einteilung der Kappa-Werte nach Landis und Koch (Landis and Koch, 1977).
Diese Werte sind die Grundlage für die Interpretation der Inter- und Intra-Rater-Reliabilität.

K (Kappa)	Bewertung
0,00-0,20	Geringe Übereinstimmung
0,21-0,40	Ausreichende Übereinstimmung
0,41-0,60	Moderate Übereinstimmung
0,61-0,80	Substantielle Übereinstimmung
0,81-1,00	Fast perfekte Übereinstimmung

5 Ergebnisse

5.1 Ergebnisse der Referenztests

5.1.1 Direkte visuelle Inspektion

Die gesammelten extrahierten Zähne für die 50 Studienmodelle wurden nach optischer Sichtung und vor Anfertigung der Studienmodelle in kariesfreie und kariöse Wurzeloberflächen eingeteilt (Tabelle 4). Von den 200 eingeschlossenen Zähnen hatten 145 keine kariöse Wurzeloberfläche und 155 wiesen eine kariöse Wurzeloberfläche auf.

5.1.2 Histologische Ergebnisse

Von den 155 kariösen Wurzeloberflächen wurden Zahnschliffe angefertigt. Sechs Zahnflächen wurden von der Untersuchung ausgeschlossen, da die Proben während der Herstellung der Zahnschliffe verloren gingen. Nach dem Ausmessen dieser Schnitte unter dem digitalen Mikroskop ergab sich folgende Anzahl der Wurzeloberflächen sowie die unten genannten durchschnittlichen Kavitationstiefen (Tabelle 4).

Tabelle 4 Ergebnisse nach histologischer Auswertung der Zahnschliffe. Darstellung des Anteils der Wurzeloberflächen mit Kariesläsionen in unterschiedlichen Graden 0-2 (angepasst an die ICDAS-Klassifikation W0-W2) sowie in Klammern der prozentuale Anteil dessen. Und die Darstellung der mittleren Kavitationstiefe mit dessen Standardabweichung in Klammern.

	Einteilung		
	Grad 0	Grad 1	Grad 2
Anzahl (in Prozent)	145 (49,32%)	113 (38,44%)	36 (12,24%)
Mittelwert Kavitationstiefe (Standardabweichung des Mittelwertes)	/ (/)	209 µm (161,36 µm)	811 µm (329,48 µm)

5.2 Ergebnisse der diagnostischen Tests

Das Verfahren der Nahinfrarot-Transillumination ließ keine adäquate Diagnose für Wurzelkaries zu (Abbildung 12). Die Interdentalräume stellten sich stark überbelichtet dar und somit war bei keiner Messung die Beurteilung der Wurzeloberfläche möglich. Die anderen diagnostischen Methoden konnten für alle Studienmodelle angewandt werden.

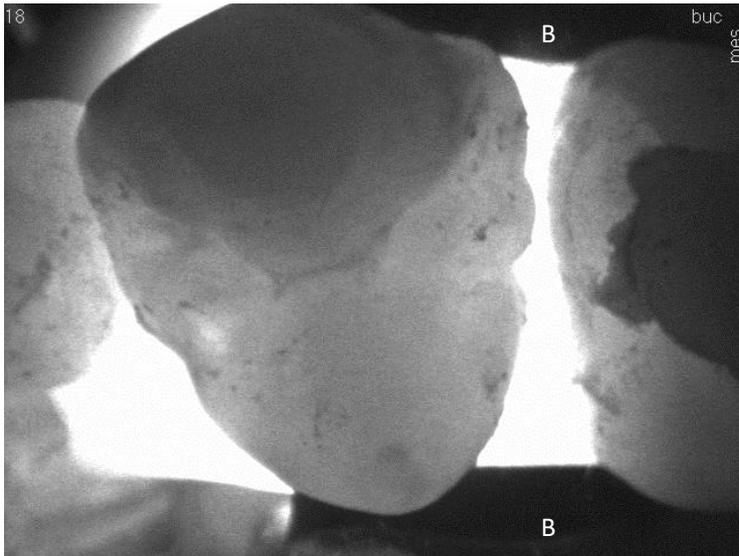


Abbildung 12 Exemplarische Aufnahme mit der DIAGNOcam. Der Interdentalraum stellt sich überbelichtet dar – eine Beurteilung der Wurzeloberfläche ist nicht möglich. Abkürzungen: B: Beleuchtungsarme, Mes: Ausrichtung nach mesial, Buc: Ausrichtung nach bukkal.

5.2.1 Sensitivität und Spezifität

Auf Grundlage der Testergebnisse der vier diagnostischen Methoden und den histologischen Ergebnissen (Tabelle 4) der einzelnen Wurzeloberflächen wurde jeweils die Spezifität und Sensitivität sowie der negative (NPV) und positive (PPV) prädiktive Wert für die vier diagnostischen Methoden berechnet. Das Laserfluoreszenzverfahren wies für alle Läsionen insgesamt die höchste Genauigkeit auf. Die Sensitivität lag bei 0,81 und die Spezifität bei 0,95, der PPV lag bei 0,94 und der NPV bei 0,84 (Tabelle 5). Auch die visuell-taktile Inspektion hatte für die Erfassung aller Läsionen eine hohe Genauigkeit (Sensitivität 0,76, Spezifität 0,88, PPV 0,87, NPV 0,79). Röntgenbilder hatten bei der Erfassung aller Läsionen die gleiche Sensitivität (0,81) wie das Laserfluoreszenzverfahren, jedoch eine deutlich geringere Spezifität (0,63) (PPV 0,68, NPV 0,77). Die Genauigkeit zur Detektion von fortgeschrittenen Läsionen war vergleichbar hoch für die visuell-taktile Inspektion und die Messung mittels Laserfluoreszenzverfahren. Die Sensitivität/Spezifität lag für die visuell-taktile Inspektion bei 0,67/0,99, für das Laserfluoreszenzverfahren bei 0,83/0,78 und für die röntgenologische Diagnostik bei 0,43/0,94 (Tabelle 6). Der PPV/NPV für die Detektion fortgeschrittener Läsionen lag für die röntgenologische Diagnostik bei 0,50/0,92, für die visuell-taktile Inspektion bei 0,88/0,96 und das Laserfluoreszenzverfahren bei 0,34/0,97.

Tabelle 5 Genauigkeit der unterschiedlichen diagnostischen Methoden für die Erfassung aller Wurzelkariesläsionen. Darstellung von Sensitivität, Spezifität, positiven prädiktiven Wert (PPV) und negativen prädiktiven Wert (NPV) für die Erfassung aller Wurzelkariesläsionen.

Diagnostische Methode	Sensitivität	Spezifität	PPV	NPV
Röntgenologische Diagnostik	0,81	0,63	0,68	0,77
Visuell-taktile Inspektion	0,76	0,88	0,87	0,79
Laserfluoreszenzverfahren	0,81	0,95	0,94	0,84

Tabelle 6 Genauigkeit der unterschiedlichen diagnostischen Methoden für die Erfassung fortgeschrittener Wurzelkariesläsionen. Darstellung von Sensitivität, Spezifität, positiven prädiktiven Wert (PPV) und negativen prädiktiven Wert (NPV) für die Erfassung fortgeschrittener Wurzelkariesläsionen.

Diagnostische Methoden	Sensitivität	Spezifität	PPV	NPV
Röntgenologische Diagnostik	0,43	0,94	0,50	0,92
Visuell-taktile Inspektion	0,67	0,99	0,88	0,96
Laserfluoreszenzverfahren	0,83	0,78	0,34	0,97

5.2.2 ROC-Kurven

In Abbildung 13 sind die Ergebnisse aus Tabelle 5, in Abbildung 14 die Ergebnisse aus Tabelle 6 graphisch dargestellt.

Für die Diagnostik aller Läsionen hatte das Laserfluoreszenzverfahren den höchsten diagnostischen Nutzen (AUC: 0,88), gefolgt von der visuell-taktile Diagnostik (0,82) und der röntgenologischen Diagnostik (0,72) (Tabelle 7). Für die fortgeschrittenen Läsionen hatte die visuell-taktile Inspektion den höchsten AUC-Wert (0,83), gefolgt von dem Laserfluoreszenzverfahren (0,80) und der röntgenologischen Diagnostik (0,69).

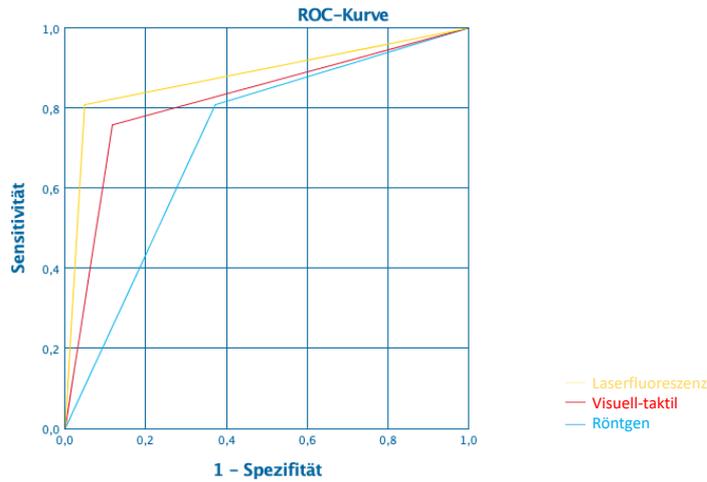


Abbildung 13 ROC-Kurven der Sensitivität und Spezifität der diagnostischen Methoden für alle Läsionen. Gebildet aus den Werten der Sensitivität an der y-Achse und 1-Spezifität an der x-Achse. Gelb: Laserfluoreszenz, rot: visuell-taktile Untersuchung, blau: Röntgen.

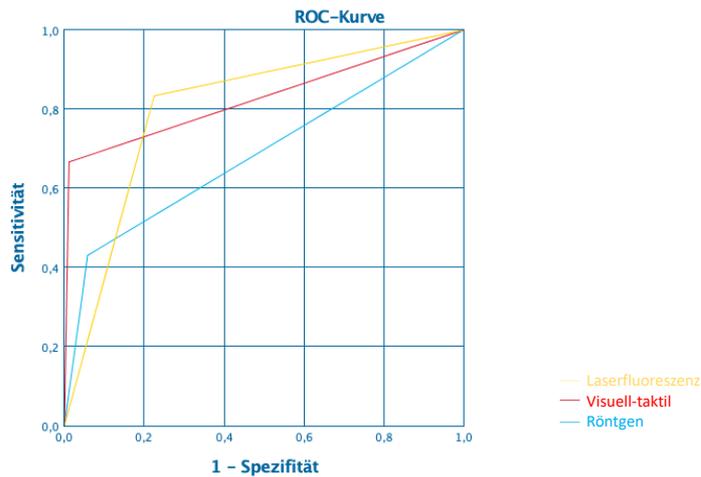


Abbildung 14 ROC-Kurven der Sensitivität und Spezifität der diagnostischen Methoden für fortgeschrittene Läsionen. Gebildet aus den Werten der Sensitivität an der y-Achse und 1-Spezifität an der x-Achse. Gelb: Laserfluoreszenz, rot: visuell-taktile Untersuchung, blau: Röntgen.

Tabelle 7 Mittlere AUC-Werte der diagnostischen Methoden für die Erfassung aller und fortgeschrittener Läsionen. Darstellung der AUC-Werte, welche sich nach Berechnung der jeweiligen Fläche unter der ROC-Kurve aus Abbildung 13 und 14 ergaben.

Diagnostische Methode	Alle Läsionen	Fortgeschrittene Läsionen
Röntgenologische Diagnostik	0,72	0,69
Visuell-taktile Inspektion	0,82	0,83
Laserfluoreszenzverfahren	0,88	0,80

Tabelle 8 stellt die Signifikanzwerte beim Vergleich der diagnostischen Genauigkeit (=AUC-Werte) der unterschiedlichen diagnostischen Methoden mittels T-Test dar. Das Signifikanzniveau wurde bei $p < 0,05$ festgelegt. Für die Detektion aller Wurzelkariesläsionen war das Laserfluoreszenzverfahren signifikant genauer als die visuell-taktile Inspektion ($p = 0,01$) und die röntgenologische Diagnostik ($p < 0,00$). Die visuell-taktile Inspektion war hierbei signifikant genauer als die röntgenologische Diagnostik ($p = 0,00$). Die AUC-Werte zur Detektion der fortgeschrittenen Wurzelkariesläsionen waren für das Laserfluoreszenzverfahren signifikant genauer als die röntgenologische Diagnostik ($p = 0,01$), ebenso war die visuell-taktile Inspektion signifikant genauer als die röntgenologische Diagnostik ($p = 0,01$). Bei der Erkennung von fortgeschrittenen Läsionen ließ sich jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen der visuell-taktile Untersuchung und dem Laserfluoreszenzverfahren feststellen ($p = 0,59$).

Tabelle 8 Ergebnisse des Two-Sample T-Test. Darstellung der *p*-Werte, welche sich aus der statistischen Auswertung der Unterschiede mittlerer AUC-Werte zwischen den diagnostischen Methoden ergaben. Das Signifikanzniveau wurde bei $p < 0,05$ festgelegt.

Diagnostische Methode	Alle Läsionen	Fortgeschrittene Läsionen
Röntgenologische Diagnostik / Visuell-taktile Inspektion	0,0002	0,0059
Röntgenologische Diagnostik / Laserfluoreszenzverfahren	<0,0001	0,0146
Visuell-taktile Inspektion/ Laserfluoreszenzverfahren	0,0118	0,5901

5.2.3 Interrater- und Intrarater-Reliabilität

Die Interrater-Reliabilität (Tabelle 9) wurde mithilfe der Kappa-Statistik auf Grundlage der Testergebnisse der vier diagnostischen Methoden evaluiert, welche anhand der 50 Studienmodelle erhoben wurden. Für die Detektion aller Läsionen zeigte das Laserfluoreszenzverfahren den höchsten Kappa-Wert (0,72 - substantielle Übereinstimmung). Die Interpretation der Kappa-Werte der röntgenologischen Diagnostik (0,42) und der visuell-taktile Untersuchung (0,60) moderate Übereinstimmung (Landis and Koch, 1977). Für fortgeschrittene Läsionen hatten das Laserfluoreszenzverfahren (0,70) und die visuell-taktile Untersuchung (0,65) die höchsten Kappa-Werte mit einer substantiellen Übereinstimmung. Bei der röntgenologischen Diagnostik (0,52) lag eine substantielle Übereinstimmung vor.

Die Intrarater-Reliabilität wurde auf Grundlage der Testergebnisse der vier diagnostischen Methoden gebildet, welche an den 5 Kalibrierungsmodellen erhoben wurden. Bei der Erfassung aller Läsionen zeigte die röntgenologische Diagnostik den höchsten mittleren Kappa-Wert (1,0 – perfekte Übereinstimmung). Das Laserfluoreszenzverfahren (0,68) und die visuell-taktile Untersuchung (0,66) erreichten eine substantielle Übereinstimmung. Für die Erfassung fortgeschrittener Läsionen hatte die röntgenologische Diagnostik (0,67) und die visuell-taktile Untersuchung (0,62) die höchsten Kappa-Werte mit einer substantiellen Übereinstimmung. Das Laserfluoreszenzverfahren hatte bei fortgeschrittenen Läsionen eine moderate Übereinstimmung (0,56) bei der Intrarater-Reliabilität.

Tabelle 9 Kappa-Werte Intrarater- und Interrater-Reliabilität der diagnostischen Methoden für alle und fortgeschrittene Läsionen. Die Intrarater-Reliabilität wurde auf Grundlage der 5 Kalibrierungsmodelle und die Interrater-Reliabilität auf Grundlage der 50 Studienmodelle gebildet. Für die Intrarater-Reliabilität wird jeweils der mittlere Kappa-Wert angegeben und die Kappa-Wert von Untersucher 1 (U_1) und Untersucher 2 (U_2).

Diagnostische Methoden	Intrarater-Reliabilität		Interrater-Reliabilität	
	Alle Läsionen	Fortgeschrittene Läsionen	Alle Läsionen	Fortgeschrittene Läsionen
Röntgenologische Diagnostik	1,0 $U_1 = 1,00$ $U_2 = 1,00$	0,67 $U_1 = 0,63$ $U_2 = 0,71$	0,42	0,52
Visuell-taktile Inspektion	0,66 $U_1 = 0,71$ $U_2 = 0,60$	0,62 $U_1 = 0,63$ $U_2 = 0,61$	0,60	0,65
Laserfluoreszenzverfahren	0,68 $U_1 = 0,80$ $U_2 = 0,55$	0,56 $U_1 = 0,60$ $U_2 = 0,52$	0,72	0,70

6 Diskussion

Moderne zahnerhaltende Therapieansätze zur Behandlung von Karies zielen auf non- oder mikro-invasive Interventionen ab. Hierbei sollen irreversible invasive Maßnahmen wie das Legen einer Restauration bestmöglich hinausgezögert werden (Schwendicke et al., 2016). Diese Prämisse gilt auch für Wurzelkariesläsionen, da hier die restaurative Therapie mit einer hohen Misserfolgsrate verbunden ist (AlQranei et al., 2020). Aus diesem Grunde ist eine frühzeitige und genaue Diagnostik von Wurzelkariesläsionen entscheidend. Zur Weiterentwicklung und Etablierung neuer diagnostischer Methoden ist es daher notwendig, die Genauigkeit und Reliabilität von verschiedenen vorhandenen Methoden zur Kariesdetektion und Diagnostik zu evaluieren.

In dieser Studie wurde die Genauigkeit von vier unterschiedlichen Methoden zur Diagnostik approximaler Wurzelkaries untersucht – die röntgenologische Kariesdiagnostik, die visuell-taktile Inspektion, das Laserfluoreszenzverfahren und die Nahinfrarot-Transillumination. Die visuell-taktile Inspektion und das Laserfluoreszenzverfahren waren dabei signifikant genauer im Vergleich zur röntgenologischen Diagnostik. Das Laserfluoreszenzverfahren war signifikant genauer als die visuell-taktile Inspektion zur Erkennung von allen Läsionen, während bei der Erkennung von fortgeschrittenen Läsionen kein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Methoden erkennbar war. Die Intrarater- und Interrater-Reliabilität zeigten je nach diagnostischer Methode eine moderate bis perfekte Reproduzierbarkeit. Die Untersuchung mittels Nahinfrarot-Transillumination eignete sich nicht zur Erkennung von approximalen Wurzelkariesläsionen. Da signifikante Unterschiede zwischen den unterschiedlichen diagnostischen Methoden hinsichtlich der Genauigkeit festgestellt wurden, wurde die Nullhypothese verworfen.

6.1. Diskussion der Methodik

6.1.1 Auswahl und Lagerung der Zähne

Für die vorliegende Studie wurden ausschließlich bleibende humane Zähne verwendet. Zähne mit ausgedehnten Füllungen oder restaurativen Versorgung, die bis auf die approximalen Wurzeloberflächen reichten, wurden ausgeschlossen, da der Fokus auf primäre Wurzelkariesläsionen gelegt wurde. Es wurden ausschließlich Molaren und Prämolaren verwendet, da deren Approximalflächen aufgrund ihrer Anatomie schlechter einsehbar sind und dort in der Folge häufig unentdeckte Wurzelkaries entsteht (Fure and

Zickert, 1990). Bei den Probezähnen mit Wurzelkaries wurde darauf geachtet, dass sich die Läsion auf die mesiale beziehungsweise distale Fläche des Zahnes beschränkte. Die Läsion sollte von vestibulär oder oral nicht direkt sichtbar sein, um nicht offensichtlich auf eine Wurzelkariesläsion schließen zu können.

Die Zähne wurden zur Desinfektion in Chloramin-T gelagert, da diese Substanz eine hohe bakterizide Wirkung besitzt. Gleichzeitig wurde durch die feuchte Lagerung eine Austrocknung und eine damit verbundene Gewebeschrumpfung vermieden. Das Lagermedium von Zähnen kann das Fluoreszenzverhalten von Kariesläsionen beeinflussen. So konnte nach einer 24-stündigen Lagerung von Zähnen in 1% NaOCl eine signifikante Reduktion der fluoreszierenden Eigenschaften mittels DIAGNOdent festgestellt werden (Burin et al., 2005). In Studien, die die Veränderung der Laserfluoreszenz von extrahierten Zähnen in unterschiedlichen Lagerlösungen über einen längeren Zeitraum betrachteten, wurde lediglich für eingefrorene Proben keine signifikante Änderung der Fluoreszenzreaktion beobachtet (Francescut et al., 2006, Kaul et al., 2014). Bei den Proben, welche in 1% Chloramin, gelagert wurden konnte ein Abfall der Laserfluoreszenz-Werte gemessen werden (Kaul et al., 2014). Das Einfrieren der Probezähne direkt nach Extraktion bis zur Durchführung der Versuche konnte jedoch für die vorliegende Studie nicht praktiziert werden. Das Fluoreszenzverhalten von Wurzelkariesläsionen in Abhängigkeit des Lagermediums Chloramin-T sollte in weiteren Studien untersucht werden. In diesem Zusammenhang muss festgestellt werden, ob aufgrund der möglichen Abnahme des Fluoreszenzwertes von in Chloramin-T gelagerten Zähnen der Schwellenwert für In-vitro-Studien nach unten korrigiert werden sollte.

6.1.2 Herstellen der Studienmodelle und Diagnostik

Um die klinische Situation möglichst exakt nachzuahmen, wurden Studienmodelle hergestellt und zur Diagnostik in einen Phantomkopf eingeschraubt. Dabei wurden die Probezähne in Anlehnung an eine andere Untersuchung in unserem Hause in einem Modell aus Epoxidharz befestigt (Elhennawy et al., 2018). Die natürliche Beweglichkeit der Zähne durch die faserige Befestigung in den Alveolen wurde durch dieses Vorgehen nicht simuliert. Die Eigenbeweglichkeit von Zähnen kann klinisch den Zugang bei der visuell-taktilen Untersuchung und beim Laserfluoreszenzverfahren durch Separation theoretisch verbessern. Dies gilt insbesondere bei Zähnen mit parodontaler Lockerung.

Das transparente Epoxidharz zur Fixierung der Zähne im Modell sollte den Einsatz des Nahinfrarot-Transilluminationsverfahren mit DIAGNOcam theoretisch ermöglichen (Elhennawy et al., 2018). Die mittels DIAGNOcam entstandenen Bilder innerhalb der vorliegenden Studie stellten sich jedoch überbelichtet dar. Als mögliche Erklärung hierfür kann das Fehlen von Gingiva und Alveolarknochen als lichtbrechende Strukturen angenommen werden (Lederer et al., 2019b, Abogazalah et al., 2017).

Die gingivalen Verhältnisse wurden mit einer Modellation aus rosa Plattenwachs simuliert. Bei der Gestaltung des Gingivaverlaufs wurde beachtet, dass sich Wurzelkaries meist supragingival befindet, aber auch innerhalb einer Parodontaltasche vorhanden sein kann oder durch die noch vorhandene Papille erschwert einzusehen sein könnte. Allerdings bildet das modellierte Plattenwachs nur ansatzweise die natürliche Gingiva nach. So könnten Interferenzen mit dem Weichgewebe oder vorhandener Zahnstein die Ergebnisse der Laserfluoreszenzmessung verändern. Zwar scheint Blut die Laserfluoreszenzmessung nicht zu verändern (Lussi et al., 2006), etwaiger Zahnstein weist jedoch ähnliche Fluoreszenzeigenschaften wie Karies auf. Insgesamt konnten also die komplexen Bedingungen in der Mundhöhle im Rahmen dieser Untersuchung nur bedingt simuliert werden. Das Design der Studienmodelle spiegelt die klinische Situation nur stark vereinfacht wider. So können klinisch die Einflüsse von Plaque, Zahnstein, menschlichem Speichel oder Speiseresten, welche nicht simuliert wurden, die Kariesdiagnostik beeinflussen (Bittar et al., 2012, Zhang et al., 2016). Ebenso können anatomische Anomalien von Zunge, Hart- und Weichgewebe im klinischen Alltag die Diagnostik erschweren.

Um Wurzelkaries zu klassifizieren, sind unterschiedliche Systeme verfügbar. Die Klassifizierung in der vorliegenden Studie wurde dem ICDAS-System angelehnt (Topping and Pitts, 2009) und auf die unterschiedlichen Parameter der vier diagnostischen Methoden angepasst. Neben der Einteilung von Wurzelkaries nach ICDAS ist noch eine weitere feinstufigere Klassifizierung von Wurzelkaries verfügbar (siehe Kapitel 2.2.4) (Billings, 1986). Die Verwendung einer feinstufigeren Klassifikation könnte Einfluss auf die Ergebnisse haben. Das ICDAS-System ist jedoch derzeit die international etablierteste Methode zur Klassifizierung von Karies und kann klinisch zu einem Therapieentscheid beitragen (Topping and Pitts, 2009).

Die Einteilung nach ICDAS beachtet eine mögliche Verfärbung der Wurzeloberfläche und misst die Ausdehnung der Kavität. Entscheidend für die Beurteilung einer Wurzelkaries

und die damit verbundene Therapie ist neben der Kavitationstiefe auch der Aktivitätszustand einer Läsion. Nyvad und Fejerskov teilten die Läsionen unter Beachtung ihres dynamischen Charakters in aktive und inaktive Läsionen ein. Demnach werden Läsionen mit dunkelbrauner bis schwarzer Verfärbung, harter Oberfläche und kaum Plaquebesiedelung als inaktive Läsionen angesehen. Gelbliche bis hellbraune Läsionen, weicher Oberfläche beziehungsweise lederartiger Konsistenz und regelmäßiger Plaquebesiedelung gelten hingegen als aktiv (Fejerskov et al., 1991). Immer wieder konnte festgestellt werden, dass die Farbe jedoch wenig aussagekräftig ist (Leake, 2001, Lynch and Beighton, 1994). Auch der Abstand zum Gingivarand gilt als Indikator für die Beurteilung der Aktivität einer Wurzelkaries. Läsionen mit einer gewissen Distanz zum Gingivarand gelten als inaktiv und Läsionen in der Nähe des Gingivarandes als aktiv (Lynch and Beighton, 1994, Carvalho and Lussi, 2017). Ob eine aktive oder inaktive Wurzelkaries vorliegt, kann auf extrahierten Zähnen nicht untersucht werden. Da jedoch kavitierte Wurzelkariesläsionen im Approximalraum klinisch mit hoher Wahrscheinlichkeit aktiv sind, sollten sich die diagnostischen Methoden dennoch zur Beurteilung einer Behandlungsbedürftigkeit eignen.

6.1.3 Herstellung und Evaluation der Zahnschliffe als Referenz

Um die tatsächliche Ausdehnung der Wurzelkariesläsion als Referenz feststellen zu können, wurden Zahnschliffe der Probezähne angefertigt. Die histologische Beurteilung von Zahnschliffen ist ein vielfach angewandtes Standardverfahren innerhalb von In-vitro-Studien (Neuhaus et al., 2012, Rodrigues et al., 2010). Die Probezähne wurden hierfür in mesio-distaler Richtung durchtrennt und die Schnitte unter dem digitalen Mikroskop betrachtet. Digital wurden mit Hilfe einer kalibrierten Okularmikrometerskala Referenzlinien eingezeichnet (Karlsson et al., 2009). Als größte Ausdehnung der Wurzelkariesläsion wurde der Schnitt an der am weitesten nach apikal-reichenden Ausdehnung der Läsion gesetzt. Aufgrund der dreidimensionalen Ausbreitung der Karies besteht das Risiko, die vermeintliche Läsionsausdehnung nicht präzise zu erfassen, da die am weitesten nach apikal-reichende Ausdehnung der Karies nicht zwingend der tiefsten Läsionsausdehnung entspricht. Dazu wäre es notwendig gewesen, Serienschnitte der Läsion anzufertigen, um die am weitesten nach zentral reichende Läsionsausdehnung zu ermitteln (Jablonski-Momeni et al., 2012). Aufgrund der Vielzahl der Probezähne hätte dies einen enormen Aufwand bedeutet und wurde daher in der

vorliegenden Studie nicht durchgeführt. Andere Möglichkeiten zur dreidimensionalen Darstellung der tatsächlichen Läsionsausdehnung wie MicroCT (Abogazalah et al., 2017) erschienen aufgrund des relativ hohen Aufwandes ebenfalls als nicht sinnvoll.

6.2. Diskussion der Ergebnisse

6.2.1 Röntgenologische Diagnostik

Die Approximalkariesdiagnostik anhand von Röntgenbildern ist eine klinisch etablierte Methode. Eine Übersichtsarbeit, die Forschungsergebnisse über den Nutzen von Röntgenbildern bei der Kariesdiagnose zusammenfasste, zeigte auf, dass dieser hoch genug sei, um Untersuchungen mittels ionisierender Röntgenstrahlung zu rechtfertigen (Pitts, 1996). Für die Erfassung aller Läsionen hatte die röntgenologische Kariesdiagnostik innerhalb der vorliegenden Studie insgesamt eine signifikant niedrigere Genauigkeit als die visuell-taktile Inspektion und das Laserfluoreszenzverfahren. Die röntgenologische Kariesdiagnostik hatte für alle Läsionen die gleiche Sensitivität wie das Laserfluoreszenzverfahren. Beide diagnostischen Methoden hatten eine höhere Sensitivität als die visuell-taktile Untersuchung. Die Spezifität der röntgenologischen Diagnostik war jedoch geringer als die der beiden anderen diagnostischen Methoden. Insgesamt scheint also die röntgenologische Diagnostik in der vorliegenden Untersuchung gegenüber anderen Methoden unterlegen zu sein, was deren Nutzen für die Erfassung von Wurzelkaries in Frage stellt.

Eine systematische Übersichtsarbeit, die sich mit der Genauigkeit der röntgenologischen Karieserkennung von koronaler Karies beschäftigte, konnte sowohl für In-vitro-Studien als auch innerhalb klinischer Studien eine höhere Spezifität für die Detektion von allen Läsionsarten und von Dentinläsionen finden als die vorliegende Studie (Schwendicke et al., 2015). Eine mögliche Ursache für falsch positive Befunde bei der Wurzelkariesdiagnostik im Röntgenbild ist der sogenannte „Burnout-Effekt“ (Berry, 1983). Hierbei kann es am Zahnhals zu einer Überlagerungserscheinung kommen aufgrund des fehlenden marginalen Knochens und des dünnen Zahnhalses. Dadurch können gesunde Wurzeloberflächen fälschlicherweise als Wurzelkaries interpretiert werden. Dieses Phänomen tritt bei Oberkieferzähnen stärker auf als im Unterkiefer (Rahmatulla and Wyne, 1995). Klinische Studien, die die Genauigkeit der Diagnostik mittels Bissflügelaufnahmen von koronaler Dentinkaries im Approximalbereich untersuchten, fanden überwiegend eine höhere Sensitivität als die vorliegende Untersuchung (Kocak

and Cengiz-Yanardag, 2020, Ozkan and Guzel, 2017, Kuhnisch et al., 2016). Eine Erklärung für diese Diskrepanz könnte sein, dass bei koronalen Dentinläsionen die Karies bereits auch den Schmelz betrifft und somit auf Röntgenbildern kontrastreicher dargestellt wird. Bei der Wurzelkaries entstehen oft zunächst keine tiefen Läsionen, stattdessen breiten sich die Läsionen zirkulär entlang der Zement- oder Dentinoberfläche aus (Meyer-Luckel et al., 2012). Daher können initiale Wurzelkariesläsionen im Röntgenbild übersehen worden sein.

Ein Review zur Diagnostik von Wurzelkaries (Fee et al., 2020) berichtete von zwei In-vitro-Studien die für die röntgenologische Diagnostik geringere Sensitivitätswerte (Neuhaus et al., 2012, Rodrigues et al., 2010) und geringere (Rodrigues et al., 2010) beziehungsweise höhere (Neuhaus et al., 2012) Spezifitätswerte fanden. Bei den eingeschlossenen Studien wurde die Wurzelkaries jedoch am Restaurationsrand untersucht, weshalb die Daten nur bedingt vergleichbar mit den Daten der vorliegenden Untersuchung sind. Ergebnisse früherer In-vitro-Studien zeigten, dass die röntgenologische Diagnostik von koronaler Sekundärkaries bei röntgenopaken Füllungsmaterialien, besonders Amalgam, erschwert ist (Espelid et al., 1991, Tveit et al., 1991).

Für fortgeschrittene Läsionen zeigte die röntgenologische Diagnostik in der vorliegenden Studie insgesamt eine signifikant geringere Genauigkeit als die visuell-taktile Inspektion und das Laserfluoreszenzverfahren. So war die Sensitivität niedriger als beim Laserfluoreszenzverfahren und der visuell-taktile Inspektion. Bei der röntgenologischen Diagnostik wurde eine ähnliche hohe Spezifität wie mittels visuell-taktile Inspektion gemessen. Beide diagnostischen Methoden hatten eine höhere Spezifität als das Laserfluoreszenzverfahren. Die vergleichsweise niedrige Sensitivität bedeutet, dass weit fortgeschrittene Läsionen fälschlicherweise als zu klein diagnostiziert oder gar nicht erkannt wurden. Dass die tatsächliche Läsionsausdehnung im zweidimensionalen Röntgen durchaus unterschätzt wird, sollte bei der röntgenologischen Diagnostik stets beachtet werden (Syriopoulos et al., 2000, Syriopoulos et al., 1999). Eine In-vitro-Studie zur Diagnostik von koronaler Approximalkaries konnte ebenfalls eine Abnahme der Sensitivität bei Zunahme der Läsionsausdehnung feststellen (Ko et al., 2015).

Bei der Interrater-Reliabilität der röntgenologischen Untersuchung lag für alle Läsionen und für fortgeschrittener Läsionen jeweils eine moderate Übereinstimmung vor. Auch hier war das Röntgen der visuell-taktile Inspektion und der Untersuchung mit dem

Laserfluoreszenzverfahren unterlegen. Studien, die die Interrater-Reliabilität an koronaler Approximalkaries untersuchten, konnten eine höhere Interrater-Reliabilität als die hier vorliegende Studie finden (Mitropoulos et al., 2010, Lederer et al., 2019b). Eine mögliche Erklärung für die Diskrepanz der Interrater-Reliabilität zwischen koronalen Läsionen und Wurzelkariesläsionen könnte sein, dass koronale Läsionen aufgrund des fehlenden Burn-out Effekts insgesamt genauer diagnostiziert werden könnten und weshalb sich die auch die Interrater-Reliabilität verbessern würde.

Die Intrarater-Reliabilität für die röntgenologische Diagnostik war perfekt für alle Läsionen und für die fortgeschrittenen Läsionen substantiell und damit höher als beim Laserfluoreszenzverfahren und der visuell-taktilen Inspektion. Eine mögliche Erklärung für diese Beobachtung ist die bessere Standardisierbarkeit der röntgenologischen Auswertung, da die Diagnostik auf identischen Röntgenbildern erfolgte. Bei der visuell-taktilen Inspektion und dem Laserfluoreszenzverfahren wurde hingegen zu jedem Messzeitpunkt individuelle Messergebnisse durch die jeweilige Untersuchung generiert. So kann unter anderem der Anpressdruck während der visuell-taktilen Inspektion in den unterschiedlichen Messungen die Diagnoseergebnisse beeinflussen (Banting, 2001). Auch könnte das Einführen der DIAGNOdent pen Sonde in unterschiedlichen Winkeln in den Approximalraum zu Abweichungen führen. Diese Hypothese kann durch In-vitro-Studien zur Diagnostik von koronaler Approximalkaries mittels röntgenologischer Kariesdiagnostik nicht bestätigt werden. So war in diesen Studien die Intrarater-Reliabilität der röntgenologischen Diagnostik anderen diagnostischen Methoden wie Laserfluoreszenz oder visuell-taktile Diagnostik nicht überlegen (Lederer et al., 2019a, Lederer et al., 2019b). Studien, welche die Intrarater- beziehungsweise Interrater-Reliabilität für röntgenologische Wurzelkariesdiagnostik untersuchten, sind jedoch nicht verfügbar.

Im Gegensatz zu den anderen untersuchten diagnostischen Methoden hat die röntgenologische Diagnostik zwei Nachteile. Zum einen werden die Patienten bei der röntgenologischen Diagnostik ionisierender Strahlung ausgesetzt. Die Strahlenbelastung zur zahnärztlichen Diagnostik ist jedoch relativ gering, weshalb der Nutzen von Röntgenbildern den Schaden übersteigt (Pitts, 1996). Bei älteren Patienten scheint der Einsatz ionisierender Strahlung zudem weniger relevant, da Strahlenschäden zumeist erst viele Jahre nach der Behandlung auftreten (Gremmel and Vieten, 1969).

Ein relevanterer Nachteil dieses Verfahrens ist eher die Tatsache, dass ältere Patienten - die Hauptrisikogruppe für Wurzelkaries - oft nur eingeschränkt in der Lage sind eine Zahnarztpraxis aufzusuchen, in welcher ein Röntgengerät zur Verfügung steht. Zwar sind mobile Röntgengeräte für orale Untersuchungen prinzipiell verfügbar, jedoch kommen diese aufgrund der damit verbundenen hohen Kosten bisher nicht regelhaft zum Einsatz (Ludwig, 2010). Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung deuten darauf hin, dass für die Diagnostik approximaler Wurzelkariesläsionen die röntgenologische Diagnostik ohnehin keinen wesentlichen Vorteil gegenüber den anderen hier getesteten Verfahren bietet.

6.2.2 Visuell-taktile Inspektion

Das Standardverfahren zur Kariesdiagnostik ist die visuell-taktile Untersuchung (Pretty, 2017). Dabei wird die Läsion anhand der Farbe und Oberflächenbeschaffenheit (Kavitation, Härte) beurteilt (Zhang et al., 2009, Banting, 2001). Die visuell-taktile Inspektion zeigte innerhalb der vorliegenden Studie insgesamt eine signifikant geringere Genauigkeit als das Laserfluoreszenzverfahren bei der Erfassung aller Läsionen, jedoch eine signifikant höhere Genauigkeit als die röntgenologische Diagnostik. Die Sensitivität zur Erfassung aller Läsionen war für die röntgenologische Diagnostik und das Laserfluoreszenzverfahren höher als bei der visuell-taktile Inspektion. Die Spezifität war höher als für die röntgenologische Diagnostik, jedoch geringer als für das Laserfluoreszenzverfahren.

Eine dieser Arbeit ähnlich aufgebaute In-vitro-Studie, die koronale Approximalkaries untersuchte, fand eine deutlich geringere Sensitivität, aber eine vergleichbare Spezifität für die visuell-taktile Untersuchung (Todorova et al., 2020). Eine mögliche Erklärung für die höhere Sensitivität in der vorliegenden Untersuchung könnte die bessere Zugänglichkeit der Wurzeloberflächen sein. Die Kariesläsionen waren in der vorliegenden Studie nicht im weniger zugänglichen Approximalkontakt lokalisiert, sondern im zervikalen Interdentalraum, der aufgrund der anatomischen Gegebenheiten häufig einen besseren Zugang erlaubt. Die Studienlage ist hier jedoch nicht einheitlich. So wurde in einer anderen In-vitro-Studie eine ähnlich hohe Sensitivität und eine geringere Spezifität im Vergleich zur vorliegenden Studie für proximale Schmelz- und Dentinläsionen gefunden (Ko et al., 2015).

Vergleiche zu Studien, die die visuell-taktile Untersuchung an Wurzelkariesläsionen untersuchten, lassen sich nur bedingt ziehen. In einer In-vitro-Studie wurden Wurzelkariesläsionen mit einer ähnlich hohen Sensitivität und geringeren Spezifität als in der vorliegenden Untersuchung diagnostiziert (Rodrigues et al., 2010). Jedoch handelte es sich dabei um Sekundärkaries unter Kompositfüllungen auf Wurzeloberflächen. Es konnte bereits gezeigt werden, dass Sekundärkaries klinisch schwer zu diagnostizieren ist (Mjor and Toffenetti, 2000, Tyas, 1991).

Die Genauigkeit zur Erfassung fortgeschrittener Wurzelkariesläsionen mittels visuell-taktile Inspektion war auf einem Niveau mit dem Laserfluoreszenzverfahren und signifikant höher als mittels röntgenologischer Diagnostik. Die Sensitivität lag dabei über der Sensitivität der röntgenologischen Diagnostik, jedoch unter der des Laserfluoreszenzverfahrens. Die Spezifität war ähnlich hoch wie die röntgenologische Diagnostik und höher als das Laserfluoreszenzverfahren.

Die Sensitivität der visuell-taktile Diagnostik war für die Erfassung aller Läsionen höher als für fortgeschrittene Läsionen. Diese Methode eignet sich somit besser dafür, generell zu erkennen, ob eine Läsion vorhanden ist, als eine Graduierung der Läsion vorzunehmen. Daher könnte klinisch der Einsatz zusätzlicher diagnostischer Methoden, wie dem Laserfluoreszenzverfahren, hilfreich sein, um die Diagnostik zu verfeinern. Eine Metaanalyse gibt jedoch an, dass sich Wurzelkariesläsionen mittels visuell-taktile Untersuchung erst im fortgeschrittenen Stadium zuverlässig diagnostizieren lassen (Banting, 2001). Aufgrund der widersprüchlichen Datenlage wird deutlich, dass zukünftige Studien notwendig sind, um Aussagen über die Genauigkeit der Diagnostik mittels visuell-taktile Inspektion bei fortgeschrittener Wurzelkaries treffen zu können. Die Spezifität der visuell-taktile Inspektion der vorliegenden Studie war insgesamt hoch, was bedeutet, dass innerhalb der vorliegenden Studie gesunde Wurzeloberflächen tatsächlich als gesund erkannt wurden. Dieses Ergebnis unterstreicht den Nutzen der visuell-taktile Diagnostik als Screeningmethode.

Die Interrater-Reliabilität der visuell-taktile Diagnostik war für alle Läsionen moderat und für fortgeschrittene Läsionen substantiell und damit höher als bei der röntgenologischen Diagnostik und niedriger als für das Laserfluoreszenzverfahren. Eine Metaanalyse klinischer Studien fand eine gute bis ausgezeichnete Interrater-Reliabilität für die Diagnose von Wurzelkaries mittels visuell-taktile Diagnostik (Banting, 2001). Jedoch nahm die Interrater-Reliabilität für die Diagnostik von ausschließlich primären

Wurzelkariesläsionen ab und erreichte vergleichbare Werte wie die vorliegende Studie (Rosen et al., 1996). Als mögliche Ursache für die Abnahme der Interrater-Reliabilität wurde Unstimmigkeit der Untersucher bezüglich der relativen Härte der Läsion aufgrund der unterschiedlichen taktilen Sensibilität vermutet (Banting, 2001).

Die Intrarater-Reliabilität der visuell-taktilen Diagnostik zeigte eine substantielle Übereinstimmung für alle und fortgeschrittene Läsionen. Für alle Läsionen lag sie damit etwa auf einem Niveau mit dem Laserfluoreszenzverfahren, war jedoch geringer als für die röntgenologischen Diagnostik. Bei fortgeschrittenen Läsionen war die Intrarater-Reliabilität bei der visuell-taktilen Diagnostik höher als beim Laserfluoreszenzverfahren, jedoch niedriger als bei der röntgenologischen Diagnostik. In einer klinischen Studie wurden für die Diagnostik von Wurzelkariesläsionen etwas niedrigere Intrarater-Reliabilitätswerte gefunden (Rosen et al., 1996). Grund für die Diskrepanz könnte sein, dass es sich bei den Ergebnissen der hier vorliegenden In-vitro-Studie mit idealisierten Messbedingungen handelt, welche die Genauigkeit der Diagnostik erleichtern.

Die visuell-taktile Inspektion ist mit einem vergleichsweise geringen apparativen Aufwand verbunden und eignet sich daher auch als Verfahren zur Wurzelkariesdiagnostik in Umgebungen außerhalb der Zahnarztpraxis (zum Beispiel in Pflegeeinrichtungen). Weiterhin kann die visuell-taktile Inspektion beliebig oft angewendet werden. Nachteilig ist jedoch die Tatsache, dass es sich bei dieser Methode um eine subjektive und schwer zu dokumentierende Methode handelt (Gunther et al., 2020, Hellyer, 2020). Dabei stellt vor allem die Erfassung der Oberflächenhärte zwischen verschiedenen Untersuchungszeitpunkten eine besondere Herausforderung dar, was insbesondere das Monitoring von kariösen Läsionen erschwert (Pretty, 2017). Aufgrund des unterschiedlichen Anpressdrucks, der Morphologie der Zähne sowie der Größe und Schärfe der Sondenspitze, besteht keine Möglichkeit die Ausdehnung der Wurzelkaries standardisiert zu erfassen. Somit ist die Beurteilung eines möglichen Voranschreitens immer von subjektiven Faktoren abhängig (Pretty, 2017, Gunther et al., 2020). Das forcierte Sondieren von Wurzeloberflächen kann sogar Defekte erzeugen, die nicht vollständig remineralisieren (Warren et al., 2003).

6.2.3 Laserfluoreszenzverfahren

Das Laserfluoreszenzverfahren hatte innerhalb der vorliegenden Studie insgesamt eine signifikant höhere Genauigkeit als die röntgenologische Diagnostik und die visuell-taktile

Inspektion bei der Erfassung aller Läsionen. Für alle Läsionen war die Sensitivität des Laserfluoreszenzverfahrens auf einem Niveau mit der röntgenologischen Diagnostik und höher als die visuell-taktile Inspektion. Das Laserfluoreszenzverfahren hatte die höchste Spezifität der untersuchten diagnostischen Methoden.

Auch andere Studien kommen zu dem Ergebnis, dass das DIAGNOdent pen Gerät aufgrund seiner höheren Sensitivität und Spezifität der röntgenologischen Kariesdiagnostik approximaler Läsionen überlegen ist (Lussi et al., 2006). So hatte der DIAGNOdent pen im Seitenzahnbereich bei der Erfassung von kavitierten und nicht kavitierten approximalen Kariesläsionen ebenfalls eine signifikant höhere Sensitivität und Spezifität als die Bissflügeldiagnostik (Menem et al., 2017).

In klinischen Studien, die die Diagnostik von approximaler koronaler Dentinkaries an bleibenden Zähnen untersuchten, lagen Sensitivität und Spezifität unter den Ergebnissen der vorliegenden Studie (Ozkan and Guzel, 2017, Kocak and Cengiz-Yanardag, 2020). Aufgrund der Lokalisation dieser koronalen Kariesläsionen im Kontaktpunkt, wird das Eindringen der Approximalsonde des Laserfluoreszenzgerätes erschwert und teilweise verhindert (Lussi et al., 2006). In der vorliegenden Untersuchung waren die Läsionen unterhalb des Kontaktpunktes in weiteren Interdentalräumen lokalisiert. Daher kann vermutet werden, dass in dieser Situation die Zugänglichkeit für die Messsonde des Laserfluoreszenzgerätes besser war und daher genauere Messungen erfolgten. Grund zu dieser Annahme liefern auch Ergebnisse einer In-vitro-Studie, die die Auswertung von Bitewing Röntgenbildern und dem Laserfluoreszenzverfahren zur Diagnostik von approximaler Karies untersuchte. Dort konnten höhere Sensitivitäts- und Spezifitätswerte für Messungen eines DIAGNOdent Gerätes an Zähnen ohne Nachbarzähnen gefunden werden als für Zähne, die in engem Approximalontakt standen (Virajsilp et al., 2005). Weiter kann aufgrund des großen Interdentalraumes ein möglicher verzerrender Effekt der Laserfluoreszenzwerte durch zwei eng beieinander liegender kariöser Approximalflächen weitestgehend vermieden werden.

Ein kürzlich erschienenenes Review zur Diagnostik von Wurzelkaries berichtete von vier Studien (Neuhaus et al., 2012, Rodrigues et al., 2010, Zhang et al., 2016, Zhang et al., 2009), die das Laserfluoreszenzverfahren an kariösen Wurzeloberflächen untersuchten (Fee et al., 2020). Dabei konnten überwiegend geringere Sensitivitäts- und Spezifitätswerte als in der vorliegenden Studie bei der Erfassung aller Läsionen mittels Laserfluoreszenz gefunden werden. Zwei dieser Studien (Neuhaus et al., 2012,

Rodrigues et al., 2010) untersuchten Sekundärkaries an Wurzeloberflächen in-vitro und nutzten ebenfalls die histologische Auswertung als Referenzwert. Als mögliche Erklärung für die Differenz der Sensitivitäts- und Spezifitätswerte kann der Einfluss von Füllungsmaterialien auf den Laserfluoreszenzwert angenommen werden (Kavo, 2001). In den anderen beiden Studien des Reviews wurde die Wurzelkariesdiagnostik unter In-vivo-Bedingungen durchgeführt und mit den Ergebnissen der visuell-taktilen Untersuchung als Referenz verglichen (Zhang et al., 2016, Zhang et al., 2009). Da die visuell-taktile Untersuchung als Referenz möglicherweise weniger präzise ist als das Ausmessen der Läsionsausdehnung auf histologischen Schnitten sind diese Daten nicht direkt mit den Daten der vorliegenden Studie vergleichbar. In einer Studie mit dem DIAGNOdent konnte gezeigt werden, dass Versuche unter In-vitro-Bedingungen sowohl für Dentin- und Schmelzläsionen als auch ausschließlich Dentinläsionen höhere Sensitivitäts- und Spezifitätswerte aufwiesen als In-vivo-Versuche (de Paula et al., 2011). Ein möglicher Faktor, der die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung unter klinischen Bedingungen beeinflussen könnte, ist das Vorhandensein von Plaque und Zahnstein. Gemäß den Angaben des Herstellers ist eine korrekte und unverfälschte Diagnose mittels DIAGNOdent pen nur in Abwesenheit von Plaque, Zahnstein und Flüssigkeiten wie Blutung und Sulkusflüssigkeit sowie Fluorpasten möglich (Kavo, 2001). Das Vorhandensein von Porphyrinen in Plaque oder Zahnstein kann die Messung verzerren. Folglich würden die Oberflächen als kariös fehlinterpretieren werden und klinisch möglicherweise zu Übertherapien führen (Bittar et al., 2012, Zhang et al., 2016). Ebenso können Speisereste die Fluoreszenzwerte verfälschen (Lussi et al., 2005). Diese Bedingungen wurden in der vorliegenden Studie nicht simuliert, da die Zähne im Vorfeld gereinigt wurden. Somit können aus den Ergebnissen der vorliegenden Studie noch keine klinischen Empfehlungen abgeleitet werden. Sie weisen aber darauf hin, dass der Einsatz von Laserfluoreszenz zur Wurzelkariesdiagnostik ein vielversprechender Ansatz ist, der unter klinischen Bedingungen näher untersucht werden sollte.

Bei fortgeschrittenen Wurzelkariesläsionen hatte das Laserfluoreszenzverfahren eine signifikant höhere Genauigkeit als die röntgenologische Diagnostik. Verglichen mit der Genauigkeit der visuell-taktilen Inspektion konnte kein signifikanter Unterschied zum Laserfluoreszenzverfahren festgestellt werden. Das Laserfluoreszenzverfahren hatte bei der Diagnostik der fortgeschrittenen Läsionen die höchste Sensitivität unter allen diagnostischen Methoden jedoch die geringste Spezifität.

Dies bedeutet, dass das Laserfluoreszenzverfahren, verglichen mit den anderen diagnostischen Methoden, Wurzelkariesläsionen am ehesten fälschlicherweise als fortgeschrittene Läsionen identifiziert. Eine systematische Übersichtsarbeit, die sich mit der Laserfluoreszenzverfahren zur koronalen Kariesdiagnostik beschäftigte, konnte tendenziell höhere Sensitivitäts- und Spezifitätswerte feststellen, wenn sich die kariösen Läsionen bereits in einem fortgeschrittenen Stadium befanden (Gimenez et al., 2013). Grund für diese Diskrepanz könnte möglicherweise die Einteilung der Schwellenwerte (Messwert 0-7: Initialdiagnose, Messwert 8-15: kariöse Frühläsion, Messwert ≥ 16 : kariöse Läsion) darstellen. So wurden die Schwellenwerte für koronale Läsionen in der Literatur bereits umfassend untersucht, wohingegen für die Schwellenwerte von Fluoreszenzmessungen von Wurzelkariesläsionen bisher keine Empfehlungen vorliegen. Möglicherweise ist zur Diagnose von Wurzelkariesläsionen daher eine Anpassung dieser Schwellenwerte notwendig.

Für die Interrater-Reliabilität des Laserfluoreszenzverfahrens lag eine substantielle Übereinstimmung sowohl für die Betrachtung aller Läsionen als auch für die fortgeschrittenen Läsionen vor. Die Reproduzierbarkeit war damit höher als die der anderen untersuchten diagnostischen Methoden. Ähnliche Ergebnisse für die Interrater- und Intrarater-Reliabilität wurden in einer Studie zur Diagnostik von Wurzelkariesläsionen mit dem DIANGOdent (Wicht et al., 2002) und zur Diagnostik koronaler Läsionen mittels DIAGNDOdent pen gefunden (Kuhnisch et al., 2007b). Demgegenüber befand eine andere Studie das Laserfluoreszenzverfahren zur Wurzelkariesdiagnostik für nicht geeignet, da es trotz hoher Reliabilitätswerte mit Messfehlern und erheblichen Abweichungen behaftet war (Karlsson et al., 2009).

Für die Intrarater-Reliabilität des Laserfluoreszenzverfahrens lag für die Diagnostik aller Läsionen eine substantielle und für die Diagnostik fortgeschrittener Läsionen eine moderate Übereinstimmung vor und war insgesamt etwas geringer als die anderen Verfahren. Eine In-vivo-Studie zur Diagnostik von koronalen Approximalläsionen konnte ebenfalls eine höhere Übereinstimmung mit Hilfe der visuell-taktilen Untersuchung und der konventionellen und digitalen Bissflügelradiographie als mit Hilfe des Laserfluoreszenzverfahrens zwischen den zwei Untersuchern feststellen (Bijle et al., 2018). Eine In-vivo-Studie zur Diagnostik von Approximalkaries berichtete jedoch von einer sehr guten Intrarater-Reliabilität für das Laserfluoreszenzverfahren (Menem et al., 2017). Eine hohe Intrarater-Reliabilität ist vor allem für das Kariesmonitoring notwendig.

So sollte eine Kariesläsion zwischen zwei Untersuchungszeitpunkten möglichst reproduzierbar evaluiert werden können. Basierend auf den Ergebnissen dieser Studie ist das Laserfluoreszenzverfahren zum Monitoring der Läsionen weniger geeignet.

Aufgrund der hohen Sensitivität des Laserfluoreszenzverfahrens und der hohen Spezifität der visuell-taktilen Diagnostik wurde in einigen Studien eine Kombination beider Methoden zur Diagnostik von Okklusalkaries empfohlen (Iranzo-Cortes et al., 2017, Kavvadia et al., 2012, Akarsu and Koprulu, 2006). Eine systematische Übersichtsarbeit, welche die Genauigkeit des DIAGNOdent im Vergleich zur visuellen und röntgenologischen Untersuchung an Okklusalfächen untersuchte, schlussfolgerte, dass sich das Laserfluoreszenzverfahren als ergänzende Methode zur Kariesdiagnostik eignet (Nokhbatolfoghahaie et al., 2013). Eine weitere systematische Übersichtsarbeit, die die Genauigkeit verschiedener Diagnostikverfahren untersuchte, kam jedoch zu dem Schluss, dass sowohl aus Kosten- als auch Praktikabilitätsgründen die visuelle Diagnostik Standard für die klinische Beurteilung bleiben sollte. Grund für diese Annahme war die große Varianz der Sensitivitäts- und Spezifitätswerte der eingeschlossenen Studien für die Diagnostik koronaler Approximalläsionen mittels Laserfluoreszenzverfahren (Gomez et al., 2013). Ebenfalls weit auseinanderliegende Sensitivitätswerte der einzelnen eingeschlossenen Studien fand eine weitere systematische Übersichtsarbeit zur Diagnostik von Karies auf Approximal- und Okklusalfächen. Diese Studie kam zudem zum Schluss, dass die Sensitivität des Laserfluoreszenzverfahrens zwar hoch, aber auch die Wahrscheinlichkeit falsch-positiver Diagnosen verglichen mit der visuell-taktilen Diagnostik erhöht sei. Dies schränkt den Nutzen des Laserfluoreszenzverfahrens als Hauptdiagnoseinstrument ein (Bader and Shugars, 2004). Basierend auf den Ergebnissen der vorliegenden Untersuchung, nach denen das Laserfluoreszenzverfahren eine hohe Sensitivität und die visuell-taktile Diagnostik eine hohe Spezifität aufweist, erscheint der zusätzliche Einsatz von Laserfluoreszenz bei klinisch diagnostizierter Wurzelkaries als sinnvoll.

Auch andere Fluoreszenzgeräte, zum Beispiel VistaProof (VistaProof Fluoreszenzkamera, Dürr AG, Bietigheim-Bissingen, Deutschland) und die quantitativ lichtinduzierte Fluoreszenzdiagnostik (kurz, QLF), zum Beispiel QLF™ (Inspektor Research Systems BV, Amsterdam, Niederlande) konnten bereits ihren potenziellen Nutzen für die Diagnostik von Wurzelkaries zeigen. In einer In-vitro-Studie konnte gezeigt werden, dass durch QLF Re- und Demineralisationsprozesse des Wurzelodontins

erfassbar sind. Es wurde daher als eine potenzielle Methode zur Erkennung und Klassifizierung von Wurzelkaries benannt (Pretty et al., 2003). Diesen Nutzen bestätigen auch weitere Studien für andere Läsionstypen (Kuhnisch and Heinrich-Weltzien, 2004, Durmusoglu et al., 2012). Weiterhin wurde in-vivo gezeigt, dass die QLF ein reproduzierbares diagnostisches Instrument war zur nicht-invasiven Erkennung und Differenzierung von nicht kavitierten Wurzelkariesläsionen (Gunther et al., 2020). Innerhalb dieser Studie haben drei Untersucher klinisch Bilder mit Hilfe des QLF (QRayCam) von nicht kavitierten Wurzeloberflächen angefertigt und die Korrelation der Ergebnisse der QLF mit der visuell-taktilen Untersuchung erfasst.

Entscheidend für die klinische Diagnostik und den daraus resultierenden Therapieentscheid ist die Aktivität einer Wurzelkariesläsion. In einer klinischen Studie zur Diagnostik von Wurzelkaries mittels DIAGNOdent wurden die Wurzeloberflächen zunächst gereinigt und anschließend visuell-taktil in klinisch gesund, aktive Kariesläsionen (gelb bis hellbraun verfärbt, weich) und inaktive Kariesläsionen (dunkel verfärbt, glatt und hart) eingeteilt. Anschließend wurden die Zähne mittels Laserfluoreszenzverfahren ausgewertet, dabei konnte ein signifikanter Unterschied der Laserfluoreszenzwerte zwischen Wurzeloberflächen der drei Kategorien festgestellt werden (Zhang et al., 2009). Eine weitere klinische Studie, welche Wurzeloberflächen in aktiv und inaktiv nach den Kriterien von Nyvad und Fejerskov (Fejerskov et al., 1991) einteilte, konnte signifikant höhere durchschnittliche Laserfluoreszenzwerte an aktiven Läsionen finden (Mitchell et al., 2021). Diesen Erkenntnissen zufolge scheint sich das Laserfluoreszenzverfahren zur Differenzierung einer aktiven und inaktiven Wurzelkariesläsion zu eignen.

Eine ergänzende Diagnostik mittels DIAGNOdent pen ist in der zahnärztlichen Praxis mit einem zusätzlichen Zeit- und damit auch Kostenaufwand zu den etablierten Verfahren wie der röntgenologischen Diagnostik oder visuell-taktilen Inspektion verbunden. Im Gegensatz zum herkömmlichen Röntgen und der visuell-taktilen Inspektion, welche über den BEMA-Katalog abrechenbar sind, stellt die Diagnostik mittels Laserfluoreszenzverfahren zum aktuellen Zeitpunkt eine Privatleistung dar, deren Kosten vom Patienten zu tragen sind. Um das Kosten-Nutzen-Verhältnis des Einsatzes der Laserfluoreszenz bei der Wurzelkariesdiagnostik zu evaluieren, sollten weitere Studien durchgeführt werden.

6.2.3.1 Schwellenwerte für die Laserfluoreszenzmessung

Die Schwellenwerte zur Unterscheidung kariöser Läsionen bei koronaler Approximalkaries wurden gemäß den Angaben des Herstellers (Kavo, 2001) auch für die Evaluation der approximalen Wurzelkariesläsionen übernommen. Diese Therapieempfehlungen basieren auf einer randomisiert-kontrollierten klinischen Studie zur approximalen Validität des DIAGNOdent pen von Huth et al. (Huth et al., 2010). In dieser Studie wurden gesunde oder kavitierte Kariesläsionen sowohl visuell-taktil als auch röntgenologisch evaluiert und mit Hilfe des DIAGNOdent pen untersucht. Bei Verdacht auf Dentinkaries wurden die Läsionen mit Restaurationen behandelt. Dabei konnten entsprechende Korrelationen zwischen den DIAGNOdent pen Messwerten und den Tiefen (sowohl klinisch als auch radiologisch) der Kariesläsionen gefunden werden. Gemäß den Ergebnissen dieser Studie liegt der Schwellenwert zur Unterscheidung von gesunden und schmelzbegrenzten Kariesläsionen bei 8 und der Schwellenwert zur Unterscheidung von Schmelz und Dentinkaries bei 16 (Huth et al., 2010).

Für Wurzelkaries sind keine Herstellerangaben oder Studien verfügbar, die entsprechende Schwellenwerte definieren. Die Studien, die das Laserfluoreszenzverfahren an Wurzeloberflächen untersucht haben, verwendeten stattdessen den Schwellenwert, bei dem die höchsten Sensitivitäts- und Spezifitätswerte erfasst wurden. So gab eine dieser Studien den optimalen Schwellenwert für Sekundärkaries auf Wurzeloberflächen mit einem Laserfluoreszenzwert von 18 an (Rodrigues et al., 2010). Zwei In-vivo-Studien gaben für die Schwellenwerte von primärer Wurzelkaries eine Spanne zwischen 5-10 an (Zhang et al., 2009, Zhang et al., 2016). Eine klinische Studie, die die Genauigkeit des Laserfluoreszenzverfahrens untersuchte, legte den Schwellenwert insgesamt auf eine Spanne von 20-35 fest. Die optimalen Schwellenwerte für Läsionen innerhalb einer Furkation oder an einem Kronenrand sowie für Läsionen auf Prämolaren und Molaren waren wesentlich höher (40-45) (Mitchell et al., 2021). Vor dem Hintergrund, dass das Laserfluoreszenzverfahren für die Wurzelkaries einen Nutzen haben könnte, ist es daher dringend erforderlich, standardisierte Schwellenwerte zum Therapieentscheid zu definieren.

Insgesamt sollte bei der Anwendung des Laserfluoreszenzverfahrens berücksichtigt werden, dass die Messwerte lediglich als Entscheidungshilfe betrachtet werden sollten (Lussi et al., 2006). Die Entscheidung für die Notwendigkeit einer invasiven Therapie hängt in der Praxis auch von anderen Faktoren ab, wie zum Beispiel dem Alter, der

Compliance, dem Fluorid- und Ernährungsstatus des Patienten. Um eine mögliche Übertherapie zu vermeiden, sollte bei Personen mit geringem Kariesrisiko erst bei höheren Schwellenwerten als den vom Hersteller empfohlenen interveniert werden (Fung et al., 2004). Inwieweit diese Empfehlung für Wurzelkaries zutrifft, müssen klinische Untersuchungen zeigen.

6.2.4 Nahinfrarot-Transillumination

Die Untersuchung der Nahinfrarot-Transillumination zur Wurzelkariesdiagnostik wurde mittels DIAGNOcam evaluiert. Da die Wurzeloberflächen auf den DIAGNOcam Aufnahmen stark überbelichtet waren, konnte kein auswertbares Bildmaterial generiert werden. So konnte die Aussage des Herstellers, dass sich die Nahinfrarot-Transillumination nicht zur Evaluation von Wurzelkariesläsionen eignet, innerhalb der vorliegenden Studie bestätigt werden (KaVo, 2017).

Da die Nahinfrarot-Transillumination jedoch für andere Läsionstypen vielversprechend erscheint, war es Ziel dieser Studie, diese Aussage des Herstellers zu überprüfen. So zeigte die Nahinfrarot-Transillumination beispielsweise in einer klinischen Querschnittsstudie eine höhere Sensitivität als Bissflügel Aufnahmen zur Diagnose von kavitierten Approximalläsionen in Milchzähnen und wurde daher als Alternative zu Röntgenbildern bei Kindern empfohlen (Alamoudi et al., 2019). Ebenso gilt es laut einer In-vitro-Studie als strahlungsfreie Ergänzung oder Alternative zur Anfertigung von Röntgenbildern, um Sekundärkaries unter Kompositfüllungen zu diagnostizieren (Elhennawy et al., 2018). Eine In-vitro-Studie belegte ebenso einen Nutzen der Nahinfrarot-Transillumination zur Diagnostik von nicht kavittierter Approximalkaries aufgrund von einer guten Intrarater- und Interrater-Reliabilität und höherer Sensitivität und Spezifität im Vergleich zur Auswertung von Röntgenbildern (Abogazalah et al., 2017). Auch eine In-vivo-Studie schrieb dem Nahinfrarot-Transilluminationsverfahren aufgrund hoher Sensitivität und Spezifität resümierend ein hohes Potential in der Erkennung von Approximalkaries zu (Kocak and Cengiz-Yanardag, 2020).

Im klinischen Leitfaden des Herstellers zur Anwendung der DIAGNOcam wird deutlich, dass sich vor allem Schmelzkaries klar abgrenzbar und dunkel im erzeugten Bild darstellt (KaVo, 2012). Zur Evaluation der Läsionsausdehnung im Dentin wird jedoch empfohlen, ergänzende Bissflügelaufnahmen anzufertigen.

Dem übereinstimmend konnte in-vivo für die Erkennung von Karies an der Schmelz-Zement-Grenze noch eine Sensitivität von 0,99 festgestellt werden. Wenn sich die Kariesläsion allerdings im Dentin befand, lag sie nur noch bei 0,29 (Kuhnisch et al., 2016). Ebenso konnte eine Metaanalyse keine Überlegenheit der Nahinfrarot-Transillumination zur Diagnostik von Dentinkaries gegenüber anderen Methoden verzeichnen (Marmaneu-Menero et al., 2020). Aufgrund der hohen Opazität von Dentin sind Kontraständerungen beim Durchleuchten mit Licht im Nahinfrarotbereich nicht deutlich feststellbar (Jones et al., 2003). Die Darstellung von Kontraständerungen im Wurzelentin durch Licht im Nahinfrarotbereich ist entsprechend den Ergebnissen der vorliegenden Studie ebenfalls nicht zufriedenstellend.

Auch der vom Hersteller empfohlene Fokussierabstand könnte aufgrund der größeren Distanz der Wurzeloberfläche zur Kamera nicht eingehalten worden sein. So legt der Hersteller diese Distanz mit maximal 4,5 mm fest, welche zumindest bei einigen Wurzelkariesläsionen in der vorliegenden Studie überschritten worden sein könnte.

Die Verwendung von transparentem Epoxidharz zur Simulation des Alveolarknochens in der vorliegenden Studie hat möglicherweise ebenfalls zur Überbelichtung der DIAGNOcam Aufnahmen beigetragen. Die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Modelle wurden mit einem Verfahren hergestellt, das in einer In-vitro-Studie zu verwertbaren Ergebnissen hinsichtlich der Diagnostik von Sekundärkaries führten (Elhennawy et al., 2018). Es sollte untersucht werden, ob möglicherweise klinisch die Gingiva oder der Alveolarknochen, welche als lichtbrechende Strukturen dienen, zu einem weniger überbelichteten Bild bei der Diagnostik von Wurzelkaries führen (Lederer et al., 2019b, Abogazalah et al., 2017). Alternativ könnte eine Anpassung der Wellenlänge zur besseren Kontrastdarstellung im Dentin oder des Fokussierabstandes vorgenommen werden, um so die vielversprechende Nahinfrarot-Transillumination auch für die Diagnostik von koronalen Läsionen nutzbar zu machen.

6.2.5. Neuere Verfahren

Neben den innerhalb der vorliegenden Studie untersuchten diagnostischen Methoden werden in der Literatur weitere Methoden zur Diagnostik von Wurzelkaries beschrieben. In aktuellen Studien wird ein neuer Ansatz zur Bestimmung möglicher Remineralisationsvorgänge untersucht. Mit der Hilfe von Verdampfungswärme, welche auf der Zahnoberfläche mit Wärmebildsystemen gemessen wurde, konnten klinisch

Rückschlüsse auf mögliche Remineralisationsvorgänge der Wurzeloberfläche gezogen werden (Hellyer, 2020, Yang et al., 2020). Bisherige diagnostische Methoden sind bezüglich der Aktivität und einer möglichen Remineralisation einer Wurzelkariesläsion begrenzt genau. Daher erscheint dieser neue Ansatz zum Monitoring zukünftig relevant, insbesondere für die schnell voranschreitende Wurzelkaries. Der Einsatz dieses Verfahrens für die Diagnostik approximaler Wurzelkariesläsionen, wie sie in der vorliegenden Studie untersucht worden sind, erscheint jedoch bisher zweifelhaft.

7 Schlussfolgerung

In der vorliegenden In-vitro-Studie wurden die Genauigkeit und Reliabilität unterschiedlicher diagnostischer Methoden zur Kariesdiagnostik an approximalen Wurzeloberflächen evaluiert. Das Laserfluoreszenzverfahren und die visuell-taktile Untersuchung waren insgesamt signifikant genauer als die Wurzelkariesdiagnostik anhand von Röntgenbildern. Das Laserfluoreszenzverfahren zur Erkennung von allen Wurzelkariesläsionen war signifikant genauer als die visuell-taktile Inspektion, während bei der Erkennung von fortgeschrittenen Läsionen kein signifikanter Unterschied zu verzeichnen war. Nahinfrarot-Transillumination eignete sich nicht zur Wurzelkariesdiagnostik. Bezüglich der Reliabilität waren alle untersuchten diagnostischen Methoden insgesamt überwiegend moderat bis substantiell reproduzierbar.

Zur Diagnostik von approximalen Wurzelkaries erscheint der Einsatz des Laserfluoreszenzverfahrens ergänzend zu der klassischen visuell-taktile Inspektion als Screeningmethode vielversprechend. Dabei könnte das Laserfluoreszenzverfahren insbesondere bei der Erkennung früher Läsionen Vorteile aufweisen. Da das Laserfluoreszenzverfahren mobil einsetzbar ist, eignet es sich zudem für den Einsatz bei Patienten außerhalb der zahnärztlichen Praxis.

In klinischen Studien muss überprüft werden, ob sich die Ergebnisse dieser Studie in der Praxis bestätigen, da es sich bei dieser Arbeit um eine In-vitro-Studie handelt. Unter klinischen Bedingungen besteht das Risiko verfälschter Messergebnisse, die mögliche Übertherapien verursachen könnten. Weiterhin sollte überprüft werden, ob eine Anpassung der vom Hersteller für koronale Kariesläsionen definierten Schwellenwerte in der Diagnostik von Wurzelkaries zu einer höheren Genauigkeit beitragen kann. Zudem sollte durch Kosten-Wirksamkeits-Analysen die Wirtschaftlichkeit des Laserfluoreszenzverfahrens bewertet werden.

8 Literaturverzeichnis

- ABDELAZIZ, M., KREJCI, I., PERNEGER, T., FEILZER, A. & VAZQUEZ, L. 2018. Near infrared transillumination compared with radiography to detect and monitor proximal caries: A clinical retrospective study. *J Dent*, 70, 40-45.
- ABOGAZALAH, N., ECKERT, G. J. & ANDO, M. 2017. In vitro performance of near infrared light transillumination at 780-nm and digital radiography for detection of non-cavitated approximal caries. *J Dent*, 63, 44-50.
- AKARSU, S. & KOPRULU, H. 2006. In vivo comparison of the efficacy of DIAGNOdent by visual inspection and radiographic diagnostic techniques in the diagnosis of occlusal caries. *J Clin Dent*, 17, 53-8.
- ALAMOUDI, N. M., KHAN, J. A., EL-ASHIRY, E. A., FELEMBAN, O. M., BAGHER, S. M. & AL-TUWIRQI, A. A. 2019. Accuracy of the DIAGNOcam and bitewing radiographs in the diagnosis of cavitated proximal carious lesions in primary molars. *Niger J Clin Pract*, 22, 1576-1582.
- ALJEHANI, A., YANG, L. & SHI, X. Q. 2007. In vitro quantification of smooth surface caries with DIAGNOdent and the DIAGNOdent pen. *Acta Odontol Scand*, 65, 60-3.
- ALQRANEI, M. S., BALHADDAD, A. A. & MELO, M. A. S. 2020. The burden of root caries: Updated perspectives and advances on management strategies. *Gerodontology*.
- BADER, J. D. & SHUGARS, D. A. 2004. A systematic review of the performance of a laser fluorescence device for detecting caries. *J Am Dent Assoc*, 135, 1413-26.
- BAIER, R. E. & GLANTZ, P. O. 1978. Characterization of oral in vivo films formed on different types of solid surfaces. *Acta Odontol Scand*, 36, 289-301.
- BANTING, D. W. 2001. The diagnosis of root caries. *J Dent Educ*, 65, 991-6.
- BERRY, H. M., JR. 1983. Cervical burnout and Mach band: two shadows of doubt in radiologic interpretation of carious lesions. *J Am Dent Assoc*, 106, 622-5.
- BIJLE, M. N. A., CHUNAWALA, Y. K. & BOHARI, M. R. 2018. Interrater agreement and reliability assessment of proximal caries detection tools in mixed dentition: An in-vivo study. *Quintessence Int*, 49, 469-477.
- BILLINGS, R. J. 1986. Restoration of carious lesions of the root. *Gerodontology*, 5, 43-9.
- BITTAR, D. G., GIMENEZ, T., MORAIS, C. C., DE BENEDETTO, M. S., BRAGA, M. M. & MENDES, F. M. 2012. Influence of moisture and plaque on the performance of a laser fluorescence device in detecting caries lesions in primary teeth. *Lasers Med Sci*, 27, 1169-74.
- BUCHALLA, W., LENNON, A. M. & ATTIN, T. 2004. Comparative fluorescence spectroscopy of root caries lesions. *Eur J Oral Sci*, 112, 490-6.
- BUNDESGESETZBLATT. 2020. §23-Röntgenverordnung (RöV) [Online]. buzer.de. [Accessed 02.02. 2020].
- BURIN, C., BURIN, C., LOGUERCI, A. D., GRANDE, R. H. & REIS, A. 2005. Occlusal caries detection: a comparison of a laser fluorescence system and conventional methods. *Pediatr Dent*, 27, 307-12.
- CARVALHO, T. S. & LUSSI, A. 2017. Assessment of Root Caries Lesion Activity and Its Histopathological Features. *Monogr Oral Sci*, 26, 63-69.
- CORBY, P. M., LYONS-WEILER, J., BRETZ, W. A., HART, T. C., AAS, J. A., BOUMENNA, T., GOSS, J., CORBY, A. L., JUNIOR, H. M., WEYANT, R. J. & PASTER, B. J. 2005. Microbial risk indicators of early childhood caries. *J Clin Microbiol*, 43, 5753-9.

- CORTES, D. F., EKSTRAND, K. R., ELIAS-BONETA, A. R. & ELLWOOD, R. P. 2000. An in vitro comparison of the ability of fibre-optic transillumination, visual inspection and radiographs to detect occlusal caries and evaluate lesion depth. *Caries Res*, 34, 443-7.
- DE PAULA, A. B., CAMPOS, J. A., DINIZ, M. B., HEBLING, J. & RODRIGUES, J. A. 2011. In situ and in vitro comparison of laser fluorescence with visual inspection in detecting occlusal caries lesions. *Lasers Med Sci*, 26, 1-5.
- DE ZUTTER, M., VANDENBULCKE, J. D., VAN ACKER, J. W. G. & MARTENS, L. C. 2020. In vivo correlation of near-infrared transillumination and visual inspection with bitewing radiography for the detection of interproximal caries in permanent and primary teeth. *Eur Arch Paediatr Dent*, 21, 509-518.
- DUNDAR, A., CIFTCI, M. E., ISMAN, O. & AKTAN, A. M. 2020. In vivo performance of near-infrared light transillumination for dentine proximal caries detection in permanent teeth. *Saudi Dent J*, 32, 187-193.
- DURMUSOGLU, O., TAGTEKIN, D. A. & YANIKOGLU, F. 2012. Clinical evaluation of demineralization and remineralization of intact root surface lesions in the clinic by a quantitative light-induced fluorescence system. *Lasers Med Sci*, 27, 397-402.
- EKSTRAND, K. R., POULSEN, J. E., HEDE, B., TWETMAN, S., QVIST, V. & ELLWOOD, R. P. 2013. A randomized clinical trial of the anti-caries efficacy of 5,000 compared to 1,450 ppm fluoridated toothpaste on root caries lesions in elderly disabled nursing home residents. *Caries Res*, 47, 391-8.
- ELHENNAWY, K., ASKAR, H., JOST-BRINKMANN, P. G., REDA, S., AL-ABDI, A., PARIS, S. & SCHWENDICKE, F. 2018. In vitro performance of the DIAGNOcam for detecting proximal carious lesions adjacent to composite restorations. *J Dent*, 72, 39-43.
- ESPELID, I., TVEIT, A. B., ERICKSON, R. L., KECK, S. C. & GLASSPOOLE, E. A. 1991. Radiopacity of restorations and detection of secondary caries. *Dent Mater*, 7, 114-7.
- FEATHERSTONE, J. D. & RODGERS, B. E. 1981. Effect of acetic, lactic and other organic acids on the formation of artificial carious lesions. *Caries Res*, 15, 377-85.
- FEE, P. A., MACEY, R., WALSH, T., CLARKSON, J. E. & RICKETTS, D. 2020. Tests to detect and inform the diagnosis of root caries. *Cochrane Database Syst Rev*, 12, CD013806.
- FEJERSKOV, O., LUAN, W. M., NYVAD, B., BUDTZ-JORGENSEN, E. & HOLM-PEDERSEN, P. 1991. Active and inactive root surface caries lesions in a selected group of 60- to 80-year-old Danes. *Caries Res*, 25, 385-91.
- FRANCESCUT, P., ZIMMERLI, B. & LUSSI, A. 2006. Influence of different storage methods on laser fluorescence values: a two-year study. *Caries Res*, 40, 181-5.
- FUNG, L., SMALES, R., NGO, H. & MOUN, G. 2004. Diagnostic comparison of three groups of examiners using visual and laser fluorescence methods to detect occlusal caries in vitro. *Aust Dent J*, 49, 67-71; quiz 101.
- FURE, S. & ZICKERT, I. 1990. Prevalence of root surface caries in 55, 65, and 75-year-old Swedish individuals. *Community Dent Oral Epidemiol*, 18, 100-5.
- GEDDES, D. A. 1975. Acids produced by human dental plaque metabolism in situ. *Caries Res*, 9, 98-109.
- GIBBONS, R. J. 1989. Bacterial adhesion to oral tissues: a model for infectious diseases. *J Dent Res*, 68, 750-60.
- GIMENEZ, T., BRAGA, M. M., RAGGIO, D. P., DEERY, C., RICKETTS, D. N. & MENDES, F. M. 2013. Fluorescence-based methods for detecting caries lesions:

- systematic review, meta-analysis and sources of heterogeneity. *PLoS One*, 8, e60421.
- GOMEZ, J., TELLEZ, M., PRETTY, I. A., ELLWOOD, R. P. & ISMAIL, A. I. 2013. Non-cavitated carious lesions detection methods: a systematic review. *Community Dent Oral Epidemiol*, 41, 54-66.
- GREMMEL, H. & VIETEN, H. 1969. *Strahlenschäden*, Springer, Berlin, Heidelberg.
- GUNTHER, E., PARK, K. J., MEISSNER, T., KOTTMANN, T., SCHMALZ, G., HAAK, R. & ZIEBOLZ, D. 2020. Assessment of non-cavitated root caries lesions by quantitative light-induced fluorescence -an in vivo feasibility study. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 101671.
- HAAK, R. & WICHT, M. J. 2004. Caries detection and quantification with DIAGNOdent: prospects for occlusal and root caries? *Int J Comput Dent*, 7, 347-58.
- HAYES, M., BURKE, F. & ALLEN, P. F. 2017. Incidence, Prevalence and Global Distribution of Root Caries. *Monogr Oral Sci*, 26, 1-8.
- HAYESA M, D. M. C. E. A. 2016. Root caries: Risk indicators associated with root caries in independently living older adults. *Br Dent J*, 221, 234.
- HEINRICH, R., KUNZEL, W. & TAWFIQ, H. 1991. [The diagnosis of approximal caries-- a comparison of clinical, fiber optic and x-ray diagnostic procedures (the diagnosis of approximal caries)]. *Dtsch Zahn Mund Kieferheilkd Zentralbl*, 79, 535-42.
- HELLYER, P. 2020. The diagnosis of active root caries is difficult. *Br Dent J*, 229, 473.
- HINTZE, H., WENZEL, A., DANIELSEN, B. & NYVAD, B. 1998. Reliability of visual examination, fibre-optic transillumination, and bite-wing radiography, and reproducibility of direct visual examination following tooth separation for the identification of cavitated carious lesions in contacting approximal surfaces. *Caries Res*, 32, 204-9.
- HOPPENBROUWERS, P. M., DRIESSENS, F. C. & BORGGREVEN, J. M. 1986. The vulnerability of unexposed human dental roots to demineralization. *J Dent Res*, 65, 955-8.
- HUTH, K. C., LUSSI, A., GYGAX, M., THUM, M., CRISPIN, A., PASCHOS, E., HICKEL, R. & NEUHAUS, K. W. 2010. In vivo performance of a laser fluorescence device for the approximal detection of caries in permanent molars. *J Dent*, 38, 1019-26.
- IRANZO-CORTES, J. E., TERZIC, S., MONTIEL-COMPANY, J. M. & ALMERICH-SILLA, J. M. 2017. Diagnostic validity of ICDAS and DIAGNOdent combined: an in vitro study in pre-cavitated lesions. *Lasers Med Sci*, 32, 543-548.
- JABLONSKI-MOMENI, A., ROSEN, S. M., SCHIPPER, H. M., STOLL, R., ROGGENDORF, M. J., HEINZEL-GUTENBRUNNER, M., STACHNISS, V. & PIEPER, K. 2012. Impact of measuring multiple or single occlusal lesions on estimates of diagnostic accuracy using fluorescence methods. *Lasers Med Sci*, 27, 343-52.
- JONES, R., HUYNH, G., JONES, G. & FRIED, D. 2003. Near-infrared transillumination at 1310-nm for the imaging of early dental decay. *Opt Express*, 11, 2259-65.
- JORDAN, R. A., BODECHTEL, C., HERTRAMPF, K., HOFFMANN, T., KOCHER, T., NITSCHKE, I., SCHIFFNER, U., STARK, H., ZIMMER, S., MICHEELIS, W. & GROUP, D. V. S. I. 2014. The Fifth German Oral Health Study (Funfte Deutsche Mundgesundheitsstudie, DMS V) - rationale, design, and methods. *BMC Oral Health*, 14, 161.
- KARLSSON, L., JOHANSSON, E. & TRANAEUS, S. 2009. Validity and reliability of laser-induced fluorescence measurements on carious root surfaces in vitro. *Caries Res*, 43, 397-404.
- KATZ, R. V. 1986. The clinical identification of root caries. *Gerodontology*, 5, 21-4.

- KATZ, R. V. 1990. Clinical signs of root caries: measurement issues from an epidemiologic perspective. *J Dent Res*, 69, 1211-5.
- KAUL, R., KAUL, V., FAROOQ, R., WAZIR, N. D., KHATEEB, S. U., MALIK, A. H. & MASOODI, A. A. 2014. Cut off values of laser fluorescence for different storage methods at different time intervals in comparison to frozen condition: A 1 year in vitro study. *J Conserv Dent*, 17, 124-8.
- KAVO 2001. Gebrauchsanweisung DIAGNOdent® pen 2190. KaVo. Dental Excellence
- KAVO 2012. DIAGNOcam Klinischer Leitfaden. Biberach/Riß.
- KAVO. 2017. *Die wichtigsten Fragen zur DIAGNOcam* [Online]. Available: <https://blog.kavo.com/de/die-wichtigsten-fragen-zur-diagnocam/> [Accessed 09.07.2020].
- KAVVADIA, K., LAGOUVARDOS, P. & APOSTOLOPOULOU, D. 2012. Combined validity of DIAGNOdent and visual examination for in vitro detection of occlusal caries in primary molars. *Lasers Med Sci*, 27, 313-9.
- KO, H. Y., KANG, S. M., KIM, H. E., KWON, H. K. & KIM, B. I. 2015. Validation of quantitative light-induced fluorescence-digital (QLF-D) for the detection of approximal caries in vitro. *J Dent*, 43, 568-75.
- KOCAK, N. & 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*.
- KONIG, K., FLEMMING, G. & HIBST, R. 1998. Laser-induced autofluorescence spectroscopy of dental caries. *Cell Mol Biol (Noisy-le-grand)*, 44, 1293-300.
- KUHNISCH, J., BUCHER, K., HENSCHER, V. & HICKEL, R. 2007a. Reproducibility of DIAGNOdent 2095 and DIAGNOdent Pen measurements: results from an in vitro study on occlusal sites. *Eur J Oral Sci*, 115, 206-11.
- KUHNISCH, J., BUCHER, K. & HICKEL, R. 2007b. The intra/inter-examiner reproducibility of the new DIAGNOdent Pen on occlusal sites. *J Dent*, 35, 509-12.
- KUHNISCH, J. & HEINRICH-WELTZIEN, R. 2004. Quantitative light-induced fluorescence (QLF)--a literature review. *Int J Comput Dent*, 7, 325-38.
- KUHNISCH, J., SOCHTIG, F., PITCHIKA, V., LAUBENDER, R., NEUHAUS, K. W., LUSSI, A. & HICKEL, R. 2016. In vivo validation of near-infrared light transillumination for interproximal dentin caries detection. *Clin Oral Investig*, 20, 821-9.
- KUNISCH, J., SCHAEFER, G., PITCHIKA, V., GARCIA-GODOY, F. & 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, 74-80.
- KWEON, H. H., LEE, J. H., YOUK, T. M., LEE, B. A. & KIM, Y. T. 2018. Panoramic radiography can be an effective diagnostic tool adjunctive to oral examinations in the national health checkup program. *J Periodontal Implant Sci*, 48, 317-325.
- LANDIS, J. R. & KOCH, G. G. 1977. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33, 159-74.
- LEAKE, J. L. 2001. Clinical decision-making for caries management in root surfaces. *J Dent Educ*, 65, 1147-53.
- LEDERER, A., KUNZELMANN, K. H., HECK, K., HICKEL, R. & LITZENBURGER, F. 2019a. In vitro validation of near-infrared transillumination at 780 nm for the detection of caries on proximal surfaces. *Clin Oral Investig*, 23, 3933-3940.

- LEDERER, A., KUNZELMANN, K. H., HECK, K., HICKEL, R. & LITZENBURGER, F. 2019b. In-vitro validation of near-infrared reflection for proximal caries detection. *Eur J Oral Sci*, 127, 515-522.
- LINDHE, J. & NYMAN, S. 1975. The effect of plaque control and surgical pocket elimination on the establishment and maintenance of periodontal health. A longitudinal study of periodontal therapy in cases of advanced disease. *J Clin Periodontol*, 2, 67-79.
- LOESCHE, W. J. 1986. Role of *Streptococcus mutans* in human dental decay. *Microbiol Rev*, 50, 353-80.
- LUDWIG, E. 2010. *Mobile Behandlungseinheit in der Behandlung pflegebedürftiger Menschen* [Online]. Landes Zahnärztekammer BW. Available: https://lzk-bw.de/fileadmin/user_upload/1.Zahnärzte/110.Alters-_und_Behindertenzahnheilkunde/40.Barrierefreiheit/Mobile-Behandlungseinheiten.pdf [Accessed 04.12. 2020].
- LUSI, A. 2000. Laserinduzierte Fluoreszenz zur Erkennung der Okklusalkaries - Erste In-vivo-Resultate. *Acta Med Dent Helv* 5, 15-19.
- LUSI, A., HACK, A., HUG, I., HECKENBERGER, H., MEGERT, B. & STICH, H. 2006. Detection of approximal caries with a new laser fluorescence device. *Caries Res*, 40, 97-103.
- LUSI, A., HIBST, R. & PAULUS, R. 2004. DIAGNOdent: an optical method for caries detection. *J Dent Res*, 83 Spec No C, C80-3.
- LUSI, A., IMWINKELRIED, S., PITTS, N., LONGBOTTOM, C. & REICH, E. 1999. Performance and reproducibility of a laser fluorescence system for detection of occlusal caries in vitro. *Caries Res*, 33, 261-6.
- LUSI, A., LONGBOTTOM, C., GYGAX, M. & BRAIG, F. 2005. Influence of professional cleaning and drying of occlusal surfaces on laser fluorescence in vivo. *Caries Res*, 39, 284-6.
- LYNCH, E. & BEIGHTON, D. 1994. A comparison of primary root caries lesions classified according to colour. *Caries Res*, 28, 233-9.
- MARCZUK-KOLADA, G., LUCZAJ-CEPOWICZ, E., OBIDZINSKA, M. & ROZYCKI, J. 2020. Performance of ICDAS II and fluorescence methods on detection of occlusal caries-An ex vivo study. *Photodiagnosis Photodyn Ther*, 29, 101609.
- MARMANEU-MENERO, A., IRANZO-CORTES, J. E., ALMERICH-TORRES, T., ORTOLA-SISCAR, J. C., MONTIEL-COMPANY, J. M. & ALMERICH-SILLA, J. M. 2020. Diagnostic Validity of Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination (DIFOTI) and Near-Infrared Light Transillumination (NILT) for Caries in Dentine. *J Clin Med*, 9.
- MARSH, P. D. 2003. Are dental diseases examples of ecological catastrophes? *Microbiology*, 149, 279-294.
- MARSH, P. D. 2006. Dental plaque as a biofilm and a microbial community - implications for health and disease. *BMC Oral Health*, 6 Suppl 1, S14.
- MENEM, R., BARNKGGEI, I., BEIRUTI, N., AL HAFAR, I. & JOURY, E. 2017. The diagnostic accuracy of a laser fluorescence device and digital radiography in detecting approximal caries lesions in posterior permanent teeth: an in vivo study. *Lasers Med Sci*, 32, 621-628.
- MEYER-LUCKEL, H., PARIS, S. & EKSTRAND, K. R. 2012. *Karies - Wissenschaft und Klinische Praxis*, Thieme.
- MEYER-LUECKEL, H., MACHIULSKIENE, V. & GIACAMAN, R. A. 2019. How to Intervene in the Root Caries Process? Systematic Review and Meta-Analyses. *Caries Res*, 53, 599-608.

- MITCHELL, C., ZAKU, H., MILGROM, P., MANCL, L. & PRINCE, D. B. 2021. The accuracy of laser fluorescence (DIAGNOdent) in assessing caries lesion activity on root surfaces, around crown margins, and in furcations in older adults. *BDJ Open*, 7, 14.
- MITROPOULOS, P., RAHIOTIS, C., STAMATAKIS, H. & KAKABOURA, A. 2010. Diagnostic performance of the visual caries classification system ICDAS II versus radiography and micro-computed tomography for proximal caries detection: an in vitro study. *J Dent*, 38, 859-67.
- MJOR, I. A. & TOFFENETTI, F. 2000. Secondary caries: a literature review with case reports. *Quintessence Int*, 31, 165-79.
- MOJON, P., FAVRE, P., CHUNG, J. P. & BUDTZ-JORGENSEN, E. 1995. Examiner agreement on caries detection and plaque accumulation during dental surveys of elders. *Gerodontology*, 12, 49-55.
- NEUHAUS, K. W., RODRIGUES, J. A., SEEMANN, R. & LUSSI, A. 2012. Detection of proximal secondary caries at cervical class II-amalgam restoration margins in vitro. *J Dent*, 40, 493-9.
- NOKHBATOLFOGHAHAIE, H., ALIKHASI, M., CHINIFORUSH, N., KHOEI, F., SAFAVI, N. & YAGHOUB ZADEH, B. 2013. Evaluation of Accuracy of DIAGNOdent in Diagnosis of Primary and Secondary Caries in Comparison to Conventional Methods. *J Lasers Med Sci*, 4, 159-67.
- NORDENRAM, G., BERGKVIST, A., JOHNSON, G., HENRIKSSON, C. O. & ANNEROTH, G. 1988. Macroscopic and radiographic examination of proximal root surface caries. *Acta Odontol Scand*, 46, 95-9.
- NYVAD, B. & KILIAN, M. 1987. Microbiology of the early colonization of human enamel and root surfaces in vivo. *Scand J Dent Res*, 95, 369-80.
- NYVAD, B., TEN CATE, J. M. & FEJERSKOV, O. 1997. Arrest of root surface caries in situ. *J Dent Res*, 76, 1845-53.
- OGAARD, B., ROLLA, G. & ARENDS, J. 1988. In vivo progress of enamel and root surface lesions under plaque as a function of time. *Caries Res*, 22, 302-5.
- OZKAN, G. & GUZEL, K. G. U. 2017. Clinical evaluation of near-infrared light transillumination in approximal dentin caries detection. *Lasers Med Sci*, 32, 1417-1422.
- PITTS, N. B. 1996. The use of bitewing radiographs in the management of dental caries: scientific and practical considerations. *Dentomaxillofac Radiol*, 25, 5-16.
- PITTS, N. B., ZERO, D. T., MARSH, P. D., EKSTRAND, K., WEINTRAUB, J. A., RAMOS-GOMEZ, F., TAGAMI, J., TWETMAN, S., TSAKOS, G. & ISMAIL, A. 2017. Dental caries. *Nat Rev Dis Primers*, 3, 17030.
- PRETTY, I. A. 2017. Monitoring of Root Caries Lesions. *Monogr Oral Sci*, 26, 70-75.
- PRETTY, I. A., INGRAM, G. S., AGALAMANYI, E. A., EDGAR, W. M. & HIGHAM, S. M. 2003. The use of fluorescein-enhanced quantitative light-induced fluorescence to monitor de- and re-mineralization of in vitro root caries. *J Oral Rehabil*, 30, 1151-6.
- RAHMATULLA, M. & WYNE, A. H. 1995. Classification of cervical burnout and its distribution in the dentition. *Indian J Dent Res*, 6, 13-9.
- RAMS, T. E. & ALWAQYAN, A. Y. 2017. In vitro performance of DIAGNOdent laser fluorescence device for dental calculus detection on human tooth root surfaces. *Saudi Dent J*, 29, 171-178.
- RAVALD, N. & BIRKHED, D. 1991. Factors associated with active and inactive root caries in patients with periodontal disease. *Caries Res*, 25, 377-84.

- REIKER, J., VAN DER VELDEN, U., BARENDREGT, D. S. & LOOS, B. G. 1999. A cross-sectional study into the prevalence of root caries in periodontal maintenance patients. *J Clin Periodontol*, 26, 26-32.
- RODRIGUES, J. A., NEUHAUS, K. W., HUG, I., STICH, H., SEEMANN, R. & LUSSI, A. 2010. In vitro detection of secondary caries associated with composite restorations on approximal surfaces using laser fluorescence. *Oper Dent*, 35, 564-71.
- ROSEN, B., BIRKHED, D., NILSSON, K., OLAVI, G. & EGELBERG, J. 1996. Reproducibility of clinical caries diagnoses on coronal and root surfaces. *Caries Res*, 30, 1-7.
- SCHNEIDERMAN, A., ELBAUM, M., SHULTZ, T., KEEM, S., GREENEBAUM, M. & DRILLER, J. 1997. Assessment of dental caries with Digital Imaging Fiber-Optic Transillumination (DIFOTI): in vitro study. *Caries Res*, 31, 103-10.
- SCHUPBACH, P., GUGGENHEIM, B. & LUTZ, F. 1990. Human root caries: histopathology of advanced lesions. *Caries Res*, 24, 145-58.
- SCHUPBACH, P., LUTZ, F. & GUGGENHEIM, B. 1992. Human root caries: histopathology of arrested lesions. *Caries Res*, 26, 153-64.
- SCHWENDICKE, F., FRENCKEN, J. E., BJORNDAL, L., MALTZ, M., MANTON, D. J., RICKETTS, D., VAN LANDUYT, K., BANERJEE, A., CAMPUS, G., DOMEJEAN, S., FONTANA, M., LEAL, S., LO, E., MACHIULSKIENE, V., SCHULTE, A., SPLIETH, C., ZANDONA, A. F. & INNES, N. P. 2016. Managing Carious Lesions: Consensus Recommendations on Carious Tissue Removal. *Adv Dent Res*, 28, 58-67.
- SCHWENDICKE, F., MEYER-LUECKEL, H., SCHULZ, M., DORFER, C. E. & PARIS, S. 2014. Radiopaque Tagging Masks Caries Lesions following Incomplete Excavation in vitro. *J Dent Res*, 93, 565-70.
- SCHWENDICKE, F., TZSCHOPPE, M. & PARIS, S. 2015. Radiographic caries detection: A systematic review and meta-analysis. *J Dent*, 43, 924-33.
- SHAKIBAIE, F. & WALSH, L. J. 2015. DIAGNOdent Pen versus tactile sense for detection of subgingival calculus: an in vitro study. *Clin Exp Dent Res*, 1, 26-31.
- SHAKIBAIE, F. & WALSH, L. J. 2016. Laser fluorescence detection of subgingival calculus using the DIAGNOdent Classic versus periodontal probing. *Lasers Med Sci*, 31, 1621-1626.
- SHI, X. Q., WELANDER, U. & ANGMAR-MANSSON, B. 2000. Occlusal caries detection with KaVo DIAGNOdent and radiography: an in vitro comparison. *Caries Res*, 34, 151-8.
- SIKRI, V. & SIKRI, P. 1991. Clinical and radiological examination of root surface caries. An in vitro study. *Indian J Dent Res*, 2, 1-6.
- SOCHTIG, F., HICKEL, R. & KUHNISCH, J. 2014. Caries detection and diagnostics with near-infrared light transillumination: clinical experiences. *Quintessence Int*, 45, 531-8.
- SOCRANSKY, S. S., MANGANIELLO, A. D., PROPAS, D., ORAM, V. & VAN HOUTE, J. 1977. Bacteriological studies of developing supragingival dental plaque. *J Periodontal Res*, 12, 90-106.
- SUMNEY, D. L., JORDAN, H. V. & ENGLANDER, H. R. 1973. The prevalence of root surface caries in selected populations. *J Periodontol*, 44, 500-4.
- SURME, K., KARA, N. B. & YILMAZ, Y. 2020. In Vitro Evaluation of Occlusal Caries Detection Methods in Primary and Permanent Teeth: A Comparison of CarieScan PRO, DIAGNOdent Pen, and DIAGNOcam Methods. *Photobiomodul Photomed Laser Surg*, 38, 105-111.

- SYRIOPOULOS, K., SANDERINK, G. C., VELDEERS, X. L. & VAN DER STELT, P. F. 2000. Radiographic detection of approximal caries: a comparison of dental films and digital imaging systems. *Dentomaxillofac Radiol*, 29, 312-8.
- SYRIOPOULOS, K., VELDEERS, X. L., SANDERINK, G. C., VAN GINKEL, F. C., VAN AMERONGEN, J. P. & VAN DER STELT, P. F. 1999. The effect of developer age on the detection of approximal caries using three dental films. *Dentomaxillofac Radiol*, 28, 208-13.
- TAKAHASHI, N. & NYVAD, B. 2016. Ecological Hypothesis of Dentin and Root Caries. *Caries Res*, 50, 422-31.
- TASSOKER, M., OZCAN, S. & KARABEKIROGLU, S. 2020. Occlusal Caries Detection and Diagnosis Using Visual ICDAS Criteria, Laser Fluorescence Measurements, and Near-Infrared Light Transillumination Images. *Med Princ Pract*, 29, 25-31.
- THOMSON, W. M. 1990. Root surface caries--an overview of aetiology, prevalence, prevention, and management. *N Z Dent J*, 86, 4-9.
- TODOROVA, V., FILIPOV, I. & PETROVA, R. 2020. In Vitro Comparison of Several Methods for Initial Proximal Caries Detection. *Folia Med (Plovdiv)*, 62, 358-364.
- TOPPING, G. V. A. & PITTS, N. B. 2009. Clinical visual caries detection. *Monogr Oral Sci*, 21, 15-41.
- TVEIT, A. B., ESPELID, I., ERICKSON, R. L. & GLASSPOOLE, E. A. 1991. Vertical angulation of the X-ray beam and radiographic diagnosis of secondary caries. *Community Dent Oral Epidemiol*, 19, 333-5.
- TYAS, M. J. 1991. Cariostatic effect of glass ionomer cement: a five-year clinical study. *Aust Dent J*, 36, 236-9.
- UMWALI, A., ASKAR, H., PARIS, S. & SCHWENDICKE, F. 2016. Radiographic, antibacterial and bond-strength effects of radiopaque caries tagging. *Sci Rep*, 6, 27319.
- UNLU, N., ERMIS, R. B., SENER, S., KUCUKYILMAZ, E. & CETIN, A. R. 2010. An in vitro comparison of different diagnostic methods in detection of residual dentinal caries. *Int J Dent*, 2010, 864935.
- VAARKAMP, J., TEN BOSCH, J. J., VERDONSCHOT, E. H. & BRONKHOORST, E. M. 2000. The real performance of bitewing radiography and fiber-optic transillumination in approximal caries diagnosis. *J Dent Res*, 79, 1747-51.
- VIRAJSILP, V., THEARMONTREE, A., ARYATAWONG, S. & PAIBOONWARACHAT, D. 2005. Comparison of proximal caries detection in primary teeth between laser fluorescence and bitewing radiography. *Pediatr Dent*, 27, 493-9.
- WADIA, R. 2020. Topical fluoride to prevent root caries. *Br Dent J*, 228, 761.
- WALLS, A. W. & MEURMAN, J. H. 2012. Approaches to caries prevention and therapy in the elderly. *Adv Dent Res*, 24, 36-40.
- WARREN, J. J., LEVY, S. M. & WEFEL, J. S. 2003. Explorer probing of root caries lesions: an in vitro study. *Spec Care Dentist*, 23, 18-21.
- WHO 1997. Oral health surveys: Basic Method. World Health Organization.
- WICHT, M. J., HAAK, R., STUTZER, H., STROHE, D. & NOACK, M. J. 2002. Intra- and interexaminer variability and validity of laser fluorescence and electrical resistance readings on root surface lesions. *Caries Res*, 36, 241-8.
- YANG, V., ZHU, Y., CURTIS, D., LE, O., CHANG, N. Y. N., FRIED, W. A., SIMON, J. C., BANAN, P., DARLING, C. L. & FRIED, D. 2020. Thermal Imaging of Root Caries In Vivo. *J Dent Res*, 22034520951157.
- ZHANG, J., LEUNG, K. C. M., CHU, C. H. & LO, E. C. M. 2020. Risk indicators for root caries in older adults using long-term social care facilities in Hong Kong. *Community Dent Oral Epidemiol*, 48, 14-20.

- ZHANG, W., MCGRATH, C. & LO, E. C. 2009. A comparison of root caries diagnosis based on visual-tactile criteria and DIAGNOdent in vivo. *J Dent*, 37, 509-13.
- ZHANG, W., MCGRATH, C. & LO, E. C. M. 2016. Effectiveness of DIAGNOdent in Detecting Root Caries Without Dental Scaling Among Community-dwelling Elderly. *Oral Health Prev Dent*, 14, 555-561.

9 Eidesstattliche Versicherung

„Ich, Mareike Dörthe Preus, versichere an Eides statt durch meine eigenhändige Unterschrift, dass ich die vorgelegte Dissertation mit dem Thema: „Genauigkeit und Reliabilität unterschiedlicher Methoden zur Diagnostik von approximaler Wurzelkaries in-vitro“/ „*Accuracy and reliability of different approaches for detecting proximal root caries lesions in vitro*“ selbstständig und ohne nicht offengelegte Hilfe Dritter verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel genutzt habe.

Alle Stellen, die wörtlich oder dem Sinne nach auf Publikationen oder Vorträgen anderer Autoren/innen beruhen, sind als solche in korrekter Zitierung kenntlich gemacht. Die Abschnitte zu Methodik (insbesondere praktische Arbeiten, Laborbestimmungen, statistische Aufarbeitung) und Resultaten (insbesondere Abbildungen, Graphiken und Tabellen) werden von mir verantwortet.

Ich versichere ferner, dass ich die in Zusammenarbeit mit anderen Personen generierten Daten, Datenauswertungen und Schlussfolgerungen korrekt gekennzeichnet und meinen eigenen Beitrag sowie die Beiträge anderer Personen korrekt kenntlich gemacht habe (siehe Anteilserklärung). Texte oder Textteile, die gemeinsam mit anderen erstellt oder verwendet wurden, habe ich korrekt kenntlich gemacht.

Meine Anteile an etwaigen Publikationen zu dieser Dissertation entsprechen denen, die in der untenstehenden gemeinsamen Erklärung mit dem Erstbetreuer, angegeben sind. Für sämtliche im Rahmen der Dissertation entstandenen Publikationen wurden die Richtlinien des ICMJE (International Committee of Medical Journal Editors; www.icmje.org) zur Autorenschaft eingehalten. Ich erkläre ferner, dass ich mich zur Einhaltung der Satzung der Charité – Universitätsmedizin Berlin zur Sicherung Guter Wissenschaftlicher Praxis verpflichte.

Weiterhin versichere ich, dass ich diese Dissertation weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits an einer anderen Fakultät eingereicht habe.

Die Bedeutung dieser eidesstattlichen Versicherung und die strafrechtlichen Folgen einer unwahren eidesstattlichen Versicherung (§§156, 161 des Strafgesetzbuches) sind mir bekannt und bewusst.“

Datum

Unterschrift

Anteilerklärung an etwaigen erfolgten Publikationen

Mareike Dörthe Preus hatte folgenden Anteil an der folgenden Publikation:

Göstemeyer G., Askar H., Preus M., Elhennawy K., Paris S., Schwendicke F.: Accuracy of Different Approaches for Detecting Proximal Root Caries Lesions In Vitro; 67. Kongress der European Organisation for Caries Research (ORCA), Online-Kongress, 2020

Beitrag im Einzelnen:

- Idee und Konzeption des Studiendesigns in enger Zusammenarbeit mit Herrn PD Dr. Gerd Göstemeyer und Herrn Prof. Dr. Sebastian Paris
- Selbstständige Literaturrecherche
- Selbständige Durchführung des praktischen Abschnittes (Sammeln und Fotografieren der Probezähne, Herstellung der Kalibrierungs- und Studienmodelle, Anfertigung der Zahnschliffe, Messung der Läsionstiefen)
- Durchführung der diagnostischen Tests zusammen mit Herrn PD Dr. Gerd Göstemeyer und Herrn Dr. Haitham Askar
- Selbständige Aufbereitung der gewonnenen Daten in statistisch auswertbare Form
- Datenanalyse und -interpretation der Ergebnisse zusammen mit PD Dr. Gerd Göstemeyer

Unterschrift, Datum und Stempel des erstbetreuenden Hochschullehrers

Unterschrift der Doktorandin

10 Lebenslauf

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

11 Publikationsliste

Göstemeyer G., Askar H., Preus M., Elhennawy K., Paris S., Schwendicke F.: Accuracy of Different Approaches for Detecting Proximal Root Caries Lesions In Vitro; *67. Kongress der European Organisation for Caries Research (ORCA), Online-Kongress, 2020*

<https://www.karger.com/Article/Pdf/511860>

12 Danksagung

Ein großer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Sebastian Paris für die freundliche Überlassung des Themas und die Möglichkeit, die Ausstattung der Abteilung für Zahnerhaltung und Präventivmedizin der Charité Universitätsmedizin Berlin für die Anfertigung dieser Dissertationsarbeit nutzen zu dürfen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn PD Dr. Gerd Göstemeyer für die geduldige Unterstützung, die wertvollen Ratschläge und all die konstruktive Kritik, ohne die eine Verwirklichung dieser Dissertationsarbeit nicht möglich gewesen wäre.

Ein herzlicher Dank gilt auch Herrn Dr. Haitham Askar für die Mithilfe bei der Durchführung der Tests. Ebenso danke ich Herrn Dr. Karim Elhennawy für all die Tipps zur Durchführung der gesamten Untersuchung.

Des Weiteren gilt mein Dank der Laborabteilung der Zahnerhaltung und Präventivmedizin der Charité Berlin. Insbesondere danke ich Herrn Rainer Toll und Frau Annette Steinke, die mich geduldig und kompetent in die labortechnische Arbeit einführten und so für ein reibungsloses Abwickeln dieses Abschnittes sorgten.

Zu guter Letzt gilt mein großer Dank meiner Familie und meinen Freunden. Insbesondere darf ich meinen Eltern danken, die mich stets bestärkt und grenzenlos unterstützt haben während des Studiums und beim Anfertigen dieser Arbeit. Mein herzlicher Dank gilt meinem Freund Sebastian, der mich immer mit seinem Vertrauen und seiner Geduld begleitet hat und mir während des Schreibens mit Rat und Tat zur Seite stand.

13 Bescheinigung Statistik



Charité | Orale Diagnostik, Digitale Zahnheilkunde und Versorgungsforschung
Charité C.C03 | Aßmannhauser Str. 4-6 | 14197 Berlin

Name, Vorname: Preus, Mareike

Emailadresse: mareike.preus@charite.de

PromotionsbetreuerIn: PD Dr. Gerd Göstemeyer

Promotionsinstitution / Klinik: Charité Zahnklinik

Bescheinigung

Hiermit bescheinige ich, dass Frau *Mareike Preus* bei mir eine statistische Beratung zu einem Promotionsvorhaben wahrgenommen hat. Folgende Beratungstermine wurden wahrgenommen:

- Termin 1: 25.01.2018
- Termin 2: 15.01.2020

Folgende wesentliche Ratschläge hinsichtlich einer sinnvollen Auswertung und Interpretation der Daten wurden während der Beratung erteilt:

- Evaluierung geeigneter Anzahl der Fälle für statistisch signifikante Ergebnisse
- Ermitteln der interexaminären und intraexaminären Reproduzierbarkeit
- Erstellen einer ROC-Kurve

Diese Bescheinigung garantiert nicht die richtige Umsetzung der in der Beratung gemachten Vorschläge, die korrekte Durchführung der empfohlenen statistischen Verfahren und die richtige Darstellung und Interpretation der Ergebnisse. Die Verantwortung hierfür obliegt allein dem Promovierenden. Das Institut für Biometrie und klinische Epidemiologie übernimmt hierfür keine Haftung.


UNIVERSITÄTSMEDIZIN BERLIN
Centrum 3

CHARITÉ –
UNIVERSITÄTSMEDIZIN
BERLIN

Körperschaft des öffentlichen Rechts
Gliederkörperschaft der Freien Universität
Berlin, der Humboldt-Universität
zu Berlin und des Berliner Instituts
für Gesundheitsforschung

Charitéplatz 1 | 10117 Berlin
Telefon +49 30 450 50
www.charite.de

Berlin, 15.10.20

ABTEILUNG FÜR ORAL
DIAGNOSTIK, DIGITALE
ZAHNHEILKUNDE UND
VERSORGUNGSFORSCHUNG

DIREKTOR
Prof. Dr. Falk Schwendicke

Aßmannhauser Str. 4-6
14197 Berlin

Telefon +49 30 450 662556
Fax +49 30 450 7562556
falk.schwendicke@charite.de
www.charite.de



GUTES-TUN.CHARITE.DE