

Aus der Poliklinik für Kieferorthopädie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Direktor: Univ.-Prof. Dr. Drescher

**Vergleichende Analyse zur Sensitivität und Spezifität verschiedener
bildgebender Verfahren bei der radiologischen Kariesdiagnostik**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin

der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
Henrike Ehrlich

2025

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät der
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter: Prof. Dr. med. dent. Dieter Drescher

Zweitgutachter: Prof. Dr. med. dent. Jürgen Becker

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

Becker, K., Ehrlich, H., Hübner, M., Rauch, N., Busch, C., Schwarz-Herzke, B., Drescher, D. & Becker, J. (2024). Eligibility of a novel BW + technology and comparison of sensitivity and specificity of different imaging methods for radiological caries detection. *Oral radiology*, 40(3), 424–435. <https://doi.org/10.1007/s11282-024-00748-4>

Zusammenfassung

Die Bissflügelaufnahme stellt den Goldstandard in der Kariesdiagnostik dar. Aufgrund der zweidimensionalen Darstellung können Überlagerungen von Zähnen die Sensitivität und Spezifität beeinträchtigen. In der vorliegenden Studie wird untersucht, ob das neuartige Röntgenprogramm *Bitewing+* (BW+) diese Limitationen ausgleichen kann. BW+ bietet auf Basis eines Tomosyntheseverfahrens Ansichten in verschiedenen Ebenen und Betrachtungswinkeln. Ziel dieser Arbeit ist es, die Sensitivität und Spezifität von BW+ mit den gebräuchlichsten Röntgenverfahren zu vergleichen. Hierzu zählen intraorale Bissflügel mit digitalem Sensor oder Speicherfolie, extraorale Bissflügel sowie die digitale Volumentomographie.

Die Studie erfolgte, da aufgrund des Strahlenschutzes keine multiplen Röntgenaufnahmen an klinischen Patienten möglich waren, an kryokonservierten humanen Kopfpräparaten, bei denen in zahnlose Bereiche extrahierte Zähne transplantiert wurden. Zur Berechnung von Sensitivität und Spezifität wurden alle Aufnahmen durch 10 erfahrene Zahnärzte begutachtet. Dabei erfolgte eine Einstufung der Kariesgrade nach C0-C4. An Tag eins wurden je Person 96 Zähne pro Aufnahmemodalität und Einstellung befundet (insgesamt: 700 Röntgenaufnahmen). Am zweiten Tag wurden zufällig ausgewählte Aufnahmen (vier von jeder Aufnahmeart) zur Bestimmung der Intrarater-Reliabilität wiederholt betrachtet und bewertet. Referenzaufnahmen erfolgten mit dem Mikro-CT.

Die höchste Sensitivität wurde allgemein für C4-Läsionen (46,67%) erreicht. In der Diagnostik von C3-Karies wurden signifikante Unterschiede zwischen den Aufnahmemodalitäten gefunden ($p < 0,001$). Innerhalb dieser Läsionsart erreichte BW+ die höchste Sensitivität (33,55%). Schmelzkaries (C1-C2) wurde unabhängig von der Aufnahmetechnik selten erkannt. Am häufigsten erfolgte eine richtige Diagnose hierbei mit intraoralem Sensor und DVT. Die Spezifität lag bei allen Modalitäten über 90,5%. Die Interrater-Reliabilität zeigte eine eher schwache Übereinstimmung (Fleiss Kappa $< 0,36$). Die Intrarater-Reliabilität war hingegen relativ hoch und lag bei $0,80 \pm 0,04$.

Innerhalb der Limitationen dieser Studie scheint BW+ insbesondere Vorteile bei C3-Läsionen zu bieten, wobei eine Vielzahl von Läsionen bei allen Modi nur von 1-2 Observern erkannt wurde. Vor klinischer Anwendung von BW+ sind detaillierte Angaben zur effektiven Dosis erforderlich.

Summary

The bitewing radiograph represents the gold standard in caries diagnostics. Due to the two-dimensional imaging, overlapping teeth can affect sensitivity and specificity. The present study investigates whether the novel X-ray program *Bitewing+* (BW+) can overcome these limitations. BW+ provides views in different planes and angles based on a tomosynthesis procedure. The aim of this work is to compare the sensitivity and specificity of BW+ with the most common radiographic techniques in dentistry. These include intraoral bitewings with digital sensor and imaging plate, extraoral bitewings and cone beam computed tomography (CBCT).

The study was performed on cryopreserved human cadavers because multiple radiographs on clinical patients were not possible due to radiation protection. Edentulous areas were supplemented by transplanting donor teeth. To calculate sensitivity and specificity, all images were viewed by 10 experienced dentists. Caries severity was classified according to C0-C4. On day one, each person evaluated 96 teeth per imaging modality and setting (total: 700 radiographs). On day two, randomly selected images (four from each imaging modality) were viewed and evaluated repeatedly to determine intrarater reliability. Reference images were taken using micro-CT.

The highest sensitivity was achieved for C4 lesions (46.67%). Significant differences were found between imaging modalities in the diagnosis of C3 caries ($p < 0.001$). Within this lesion type, BW+ achieved the highest sensitivity (33.55%). Enamel caries (C1-C2) was rarely detected regardless of the imaging technique. Correct diagnosis in this case was most frequently made with intraoral sensor and DVT. Specificity was above 90.5% for all modalities. Interrater reliability showed rather weak agreement (Fleiss Kappa < 0.36). Intrarater reliability, on the other hand, was relatively high and was 0.80 ± 0.04 .

Within the limitations of this study, BW+ showed advantages in the diagnosis of dentine caries, especially in C3 lesions. Overall, there was a high proportion of false negative findings in all imaging modalities.

More detailed information on the effective dose is required before clinical application of BW+.

Abkürzungsverzeichnis

BW+	<i>Bitewing+</i>
CT	Computertomographie
DMFS	<i>Decayed Missing Filled Surfaces</i> (kariöse, fehlende, gefüllte Zahnflächen)
DMFT	<i>Decayed Missing Filled Teeth</i> (kariöse, fehlende, gefüllte Zähne)
dmft	<i>decayed missing filled teeth</i> (Milchzahn-Index)
DVT	Digitale Volumentomographie
FOV	<i>Field of View</i>
HU	Hounsfield Units
kV	Kilovolt
mA	Milliampere
OPT	Orthopantomogramm
ROI	<i>Region of Interest</i>
s	Sekunden

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Kariesepidemiologie	1
1.2	Kariesdiagnostik	3
1.2.1	Intraorale Bissflügelaufnahmen	3
1.2.2	Extraorale Aufnahmen	8
1.2.3	Digitale Volumentomographie	11
1.2.4	Beeinträchtigung der Bildqualität und Artefakte	14
1.2.5	Rechtfertigende Indikation	18
1.3	Ziele der Arbeit	21
2	Material und Methoden	22
2.1	Kopfpräparate	22
2.1.1	Ein- und Ausschlusskriterien	22
2.1.2	Ethische und rechtliche Unbedenklichkeit	22
2.1.3	Zahntransplantation	22
2.2	Anfertigung der Röntgenaufnahmen	23
2.2.1	Digitale Volumentomographie	23
2.2.2	Intraorale Bissflügelaufnahmen	25
2.2.3	Mikro-CT-Aufnahmen	26
2.3	Bereitstellung der Röntgenaufnahmen	27
2.3.1	Betrachterausswahl	27
2.3.2	Erstellung der Datenbank	27
2.3.3	Erstellung des Auswertungsbogens	29
2.3.4	Durchführung	30
2.4	Statistische Auswertung	31
3	Ergebnisse	32
3.1	Spezifität	32
3.2	Sensitivität	34
3.3	Unsicherheiten	41
3.4	Betrachterdaten	41
3.5	Interrater-Reliabilität	42
3.6	Intrarater-Reliabilität	43
3.7	Ergebnisse des Abschlussfragebogens	43
4	Diskussion	45
4.1	Diskussion der Ergebnisse	45
4.1.1	Kariesdiagnostik in zweidimensionalen Aufnahmen	45
4.1.2	Kariesdiagnostik in der DVT	47
4.1.3	Kariesdiagnostik in <i>Bitewing</i> +	51
4.1.4	Inter- und Intrarater-Reliabilität	53
4.2	Diskussion der Methodik	54
4.2.1	Durchführung anhand von Humanpräparaten und extrahierten Zähnen	54
4.2.2	Limitationen der Studie	55
4.2.3	Analyse der Daten	56
4.3	Schlussfolgerungen	56
4.3.1	Ausblick	57
5	Literatur- und Quellenverzeichnis	58
6	Anhang	64

1 Einleitung

1.1 Kariesepidemiologie

Karies ist weltweit eine der häufigsten Erkrankungen [1]. In Deutschland zeigte sich die Prävalenz in den letzten Jahren jedoch abnehmend. Dieser Rückgang lässt sich in allen sozioökonomischen Bevölkerungsschichten verzeichnen. Es besteht allerdings ein deutlicher Zusammenhang zwischen dem sozialen Status und dem Auftreten von Karies. Liegt der durchschnittliche DMFT (*Decayed Missing Filled Teeth*) -Wert bei 12-jährigen Kindern bei 0,5, so zeigt sich bei Betrachtung der einzelnen Sozialschichten innerhalb dieser Altersklasse eine Diskrepanz. Während der DMFT-Wert bei hohem Sozialstatus bei 0,3 liegt, so ist er bei sozialbenachteiligten Schichten auf 0,7 erhöht [2].

Der Rückgang der Karieserfahrung lässt sich in allen Altersklassen beobachten. So weisen Patienten auch im höheren Alter mehr eigene Zähne auf und erhalten aus diesem Grund vermehrt festsitzenden Zahnersatz [2].

Die Reduktion der Karieslast lässt sich durch verschiedene Faktoren begründen. Durch Vorsorgeprogramme im Sinne einer Individual- und Gruppenprophylaxe werden Läsionen heute früh erkannt und Missstände im Bereich der Mundhygiene können optimiert werden. Die regelmäßige Anwendung von Fluorid konnte nachweislich zur Kariesprophylaxe beitragen [3, 4]. Diese Empfehlungen wurden ebenfalls in der aktuellen S2k-Leitlinie „Kariesprophylaxe bei bleibenden Zähnen – grundlegende Empfehlungen“ festgehalten [5].

Zudem hat sich das Bewusstsein für gesunde Zähne und deren Pflege innerhalb der Bevölkerung verbessert. Die Anwendung von Zahnseide, Zahnzwischenraumbürsten und elektrischen Zahnbürsten ist gebräuchlicher geworden. Die Patienten gehen regelmäßig zur Kontrolluntersuchung und professionellen Zahnreinigung.

Trotz der Verbesserungen in den letzten Jahrzehnten zeigen Daten der zweiten Welle des Kinder- und Jugendgesundheitssurvey (KiGGS) aus dem Jahr 2018, dass weiterhin Handlungsbedarf besteht. So stellen neben Kindern aus sozial schwächeren Regionen auch Kinder mit Migrationshintergrund eine Risikogruppe dar. Sie haben eine geringere Putzfrequenz und nehmen seltener an zahnärztlichen Routineuntersuchungen teil [6]. Die

Kariesentwicklung ist während des Kindes- und Jugendalters am höchsten, weshalb auf diese Altersgruppen ein besonderes Augenmerk gelegt werden sollte [7, 8].

Ein Teil der Karies entsteht bereits in einem sehr frühen Alter. Die *Early Childhood Caries* (ECC) bezeichnet das Auftreten von kariösen, fehlenden oder gefüllten Zahnoberflächen bis zum sechsten Lebensjahr. Grundlegend für die ECC ist die Besiedelung mit *Streptococcus mutans*. Als Infektionskrankheit wird der Keim vorwiegend von den Eltern weitergegeben [9]. Prädisponierend für das Auftreten der Karies wirkt zusätzlich das Ernährungsverhalten. Durch Konsum von zuckerhaltigen Getränken über Saugflaschen sind insbesondere die oberen Milchzahninzisivi dem kariogenen Zucker ausgesetzt, während die Unterkieferinzisivi durch Zunge und Speichel vor der Plaqueakkumulation geschützt sind. Das *Nursing-Bottle-Syndrom* bezeichnet kariöse Läsionen im Milchgebiss insbesondere an den Oberkiefer Milchzahninzisivi, später auch an den Milchmolaren, die bis zur vollständigen Zerstörung der Zahnsubstanz reichen können. Der durchschnittliche DMFT für dreijährige Kinder in Deutschland liegt bei 0,48. Betrachtet man allerdings, dass 86,3 % dieser Altersgruppe ein kariesfreies Gebiss vorweisen, konzentriert sich die Karieslast mit einem dmft von 3,57 auf eine kleine Risikogruppe [10]. Zu dieser lassen sich Kinder mit Migrationshintergrund zuordnen, die einen höheren dmft-Wert aufweisen [11].

2021 formulierte die Bundeszahnärztekammer Mundgesundheitsziele für das Jahr 2030. Zielsetzung sei unter anderem, dass mindestens 80% der sechsjährigen Kinder ein kariesfreies Milchgebiss aufweisen [12]. Ein besonderes Interesse liegt somit in der Reduktion der Karies während der primären Dentition, denn Kinder, die bereits einen hohen Kariesbefall im Milchgebiss aufweisen, haben später auch vermehrt Karies im bleibenden Gebiss [13, 14]. Präventionsmaßnahmen wurden bisher von den gesetzlichen Krankenkassen als Früherkennungsuntersuchung ab dem 30. Lebensmonat unterstützt. Nach dem Beschluss des Gemeinsamen Bundesausschusses besteht seit dem 01.07.2019 Anspruch auf drei Früherkennungsuntersuchungen ab dem sechsten bis zum 34. Lebensmonat, um eine ECC früh zu erkennen und die Karieslast bei Kindern zu reduzieren.

In Deutschland konnten bereits große Erfolge bei der Reduzierung der Karieserfahrung verzeichnet werden. Aber weltweit gehört Karies zu den häufigsten Erkrankungen. Während die Industrieländer die Karieslast durch Gesundheitsprogramme, die ihren Fokus auf Prophylaxe und die richtige Vorsorge setzen, senken konnten, tritt Karies

vermehrt in den Entwicklungsländern auf. Die Karieserfahrung lag in den letzten Jahren noch unter der der Industrienationen, jedoch wird durch die Änderung von Ernährungsgewohnheiten und den höheren Konsum von zuckerhaltigen Lebensmitteln Karies in diesen Ländern immer mehr zu einem Problem, da die Aufklärung unter den Menschen und die Vorsorgeprogramme noch nicht so weit entwickelt sind. Oftmals ist der Zugang zu zahnärztlicher Hilfe nicht gewährleistet [15].

Die rechtzeitige Diagnose der Karies spielt hierbei eine Schlüsselrolle, um Karies bereits im Initialstadium zu erkennen und zu behandeln.

1.2 Kariesdiagnostik

Die einfachste Form der Kariesdiagnostik erfolgt im Rahmen der Befunderhebung durch visuelle Betrachtung der gereinigten und getrockneten Zahnoberfläche und taktile Überprüfung mit einer Sonde. Eine spitze Sonde wird hierfür aufgrund der iatrogen zuführbaren Schmelzeinbrüche nicht mehr empfohlen [16, 17]. Die Vorteile der rein klinischen Untersuchung sind die schnelle Durchführbarkeit sowie kein gesundheitliches Risiko für den Patienten. Nachteilig ist, dass Läsionen ohne Kavitation oder im Bereich der Approximalflächen meist nicht diagnostiziert werden können [18, 19]. Als Kariesprädispositionsstellen gelten besonders die Fissuren und Approximalflächen aufgrund ihrer Plaqueretention. Durch alleiniges Putzen mit der Zahnbürste werden die Zahnzwischenräume nur ungenügend erreicht. Die zusätzliche Pflege mit Zahnseide und Interdentalbürsten wird von vielen Patienten oftmals nur unzureichend durchgeführt, weshalb Karies im Bereich der Approximalflächen vermehrt vorkommt.

1.2.1 Intraorale Bissflügelaufnahmen

Als Goldstandard hat sich die radiologische Kariesdiagnostik mithilfe von Bissflügelaufnahmen etabliert. Hierbei werden Röntgenaufnahmen im Seitenzahnbereich angefertigt, bei der die Zahnkronen des Ober- und Unterkiefers jeweils einer Seite erfasst werden. Optimalerweise sollte die Aufnahme die distale Fläche des Eckzahns bis hin zur distalen Fläche des letzten durchgebrochenen Molaren darstellen. Indem Bissflügelaufnahmen in zeitlichen Abständen wiederholt durchgeführt werden, eignen sie sich neben der primären Diagnostik auch zum Monitoring, bei dem die Kariesprogression beurteilt werden kann [20]. In der Literatur finden sich unterschiedliche Empfehlungen, in welchen Intervallen Bissflügel angefertigt werden sollten. Diese reichen von sechs

Monaten bis zu vier Jahren. Insgesamt sollte die Frequenz der Aufnahmen an das individuelle Kariesrisiko des jeweiligen Patienten angepasst werden, wobei meist zwischen hohem, mittleren und niedrigem Risiko unterschieden wird [21]. Individuelle Faktoren, die hierbei eine Rolle spielen, sind Karieserfahrung, Mundhygiene, Fluoridexposition, Speichelflussrate sowie sozioökonomische Faktoren.

In Bissflügelaufnahmen lassen sich insbesondere Dentinläsionen und auch insuffiziente Füllungen detektieren, die durch klinische Untersuchungen nicht diagnostiziert werden konnten [22]. Außerdem lässt sich die Ausdehnung und Tiefe der Karies besser einschätzen. Eine okklusale Karies, bei der die Schmelzoberfläche des Zahns klinisch intakt erscheint, aber auf dem Röntgenbild diagnostiziert werden kann, wird auch als *hidden caries* bezeichnet [23]. Hierbei breitet sich die Karies unterminierend im Dentin aus. Diese versteckten Dentinläsionen lassen sich ebenfalls mithilfe von Bissflügelaufnahmen feststellen [24]. Auch im Milchgebiss erzielt man eine verbesserte Diagnostik durch Bissflügelaufnahmen, da bereits in der primären Dentition nicht jede Karies klinisch ersichtlich ist. Hierbei sollte die rechtfertigende Indikation aufgrund der Strahlenbelastung jedoch besonders eng gestellt werden. Auch in Regionen, in denen die Karieserfahrung niedrig ist, werden Bissflügelaufnahmen empfohlen [25]. Die *European Academy of Paediatric Dentistry* empfiehlt die Anfertigung der Röntgenaufnahmen zur Kariesdiagnostik sowohl im Milch- und Wechselgebiss als auch im bleibenden Gebiss [26]. Durch die zusätzlich radiologisch festgestellte Karies können sich leichte Änderungen im klinisch erstellten DMFS-Wert ergeben und diesen erhöhen [27]. Die Bissflügelaufnahme hat sich somit zu einem essenziellen Bestandteil der Kariesdiagnostik etabliert. Herkömmliche Röntgenfilme werden in unterschiedliche Empfindlichkeitsklassen eingeordnet. Aufgrund der recht zeitaufwendigen Entwicklung und nur einmaligen Nutzbarkeit werden, auch im Hinblick auf die Digitalisierung von Zahnarztpraxen, vermehrt Speicherfolien und digitale Intraoralsensoren verwendet. Vorteile der digitalen Röntgentechnik sind die mögliche Bildbearbeitung durch Schärfen, Einstellung des Kontrastes und der Helligkeit. Die digitale Aufnahme kann vergrößert dargestellt werden und somit die Patientenkommunikation bei Erklärung von Befunden verbessern. Zudem ist die Archivierung durch die digitalen Röntgenbilder vereinfacht und erleichtert einen schnellen Zugriff auf bereits vorhandene Röntgenbilder des Patienten. Bei digitalen Sensoren wird die auftreffende Röntgenstrahlung in ein elektrisches Signal umgewandelt und mit dem Computer verarbeitet. Das Signal ist

hierbei proportional zur Intensität der eintreffenden Röntgenstrahlung und wird als Grauwert dargestellt. Die handelsüblichen Sensoren im Bereich der Zahnmedizin sind Halbleitersensoren. Unterschieden wird hauptsächlich zwischen CCD (*charge coupled device*) - Sensoren und CMOS (*complementary-metal-oxid-semiconductor*) - Sensoren. Das Grundprinzip dieser Sensoren ist die indirekte digitale Radiographie. Hierbei wird zunächst mittels eines Szintillators die hochenergetische Röntgenstrahlung in sichtbares Licht umgewandelt. Der Halbleiter misst nachfolgend die langwelligere Strahlung [28].

Der Gebrauch von Speicherfolien erfordert die Verwendung eines speziellen Scanners. Die wiederverwendbare Folie speichert mittels der Phosphorschicht ein latentes Bild, entsprechend der auftreffenden Röntgenstrahlung. Die Strahlung versetzt die Elektronen innerhalb der Phosphorschicht in einen angeregten Zustand. Durch das Prinzip der photostimulierten Lumineszenz (indirekt digitale Lumineszenzradiographie (DLR)) wird die gespeicherte Energie in Form von Licht emittiert, indem die Elektronen durch das Laserlicht des Scanners abermals angeregt werden. Ein Photomultiplier wandelt dieses Lichtsignal in ein elektrisches Signal um und es entsteht ein digitales Bild [29]. Speicherfolien erreichen ein Auflösungsvermögen von durchschnittlich 22 Linienpaaren pro Millimeter (Lp/mm), wobei dieses durch häufige Verwendung der Folie über die Zeit abnehmen kann [28]. Digitale Sensoren können bis zu 33 Lp/mm darstellen. Vorteile der Speicherfolien im Vergleich zum digitalen Sensor sind ihre geringere Größe und die kabelfreie Anwendung. Nachteilhaft ist, dass ein zusätzlicher Scanner benötigt wird, um die belichtete Folie auszulesen sowie die empfindliche Oberfläche. Außerdem ist das digitale Bild erst nach dem Scan verfügbar, während das Bild des digitalen Sensors sofort zur Verfügung steht [30].

Das Erstellen von Bissflügelaufnahmen ist techniksensitiv. Eine Anfertigung erfolgt mit einem orthoradialen Strahlengang. Dies bedeutet, dass der Zentralstrahl senkrecht auf die Tangente des Zahnbogens trifft. Nur so lässt sich eine Überlagerung der Approximalräume minimieren. Überlappungen der Zahnkronen können Aufhellungen im Röntgenbild überdecken und somit die Sensitivität und Spezifität beeinträchtigen.



Abb. 1: rechtsseitige Darstellung einer intraoralen Bissflügelaufnahme aufgenommen mit digitalem Sensor (70kV, 0,08s Belichtungszeit). Die Aufnahme zeigt Überlagerungen der Approximalräume 17/16 sowie 45/46

Hilfreich für eine optimale Einstellung und Platzierung des Films bzw. des Sensors im Mund sind Filmhalter. Hierbei wird der Röntgenfilm mittels einer Vorrichtung im Mund des Patienten platziert. Die Fixierung von diesem erleichtert eine Positionierung in der Paralleltechnik, bei der der Film parallel zur Zahnachse steht. Ein extraoral gelegener Ring erleichtert zusätzlich die Positionierung des Röntgentubus und dadurch die Einstellung eines orthoradialen Strahlengangs, sodass Ausblendungen weitestgehend vermieden werden können. Die Verwendung von Filmhaltern ermöglicht eine gewisse Standardisierung und damit eine bessere Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Aufnahmen, insbesondere im Bereich des Kariesmonitorings [31]. Problematisch stellt sich allerdings die Positionierung im Patientenmund dar und führt bei einigen Patienten zu Ablehnung, da der Film beim Zubeißen in den Mundboden drücken kann. Bei Patienten mit starkem Würgereiz ist die Platzierung nach dorsal stark limitiert und somit teilweise die Bildgebung, insbesondere der letzten Molaren, nicht möglich [32].

Die Röntgenaufnahmen spielen eine wichtige Rolle bei der Entscheidung, ob eine restaurative Therapie erforderlich ist. Bei einer auf den Schmelz begrenzten Läsion (röntgenologisch C1, C2) kann versucht werden durch Präventionsmaßnahmen, wie z.B. Optimierung der Mundhygiene und Fluoridapplikation, den Zustand zu arretieren. So ist die Progression auf einer im Schmelz begrenzten Läsion langsam, während sie im Dentin schneller fortschreitet [8]. Eine Kariesverlaufskontrolle im Sinne eines Monitorings mit Bissflügelaufnahmen sollte stattfinden, um die Entwicklung der Karies beurteilen zu können. Bei Kavitätenbildungen und fortgeschrittenen Läsionen, die das Dentin erreicht

haben, sollte eine invasive Therapie angestrebt werden, da durch Einbrüche in der Zahnhartsubstanz die Hygienefähigkeit nicht mehr gewährleistet ist [33].

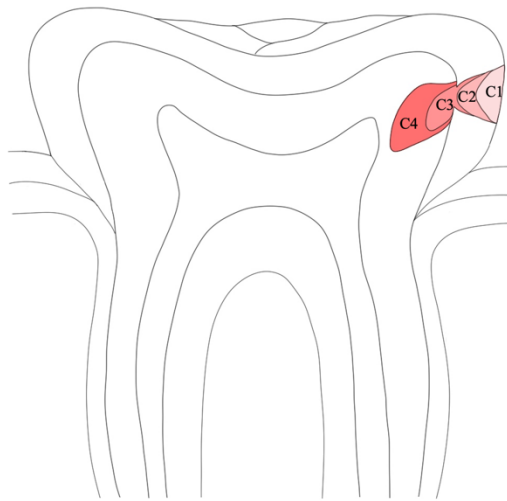


Abb. 2: schematische Darstellung der C-Klassifikation zur radiologischen Diagnostik der Kariesgrade nach Hintze et al. [34]: C1: Karies bis in die äußere Schmelzhälfte, C2: Karies in der inneren Schmelzhälfte, C3: Karies bis in die äußere Dentinschicht, C4: Karies in der inneren Dentinschicht / Pulpennähe

Die Röntgenaufnahme gibt nur einen Hinweis auf Lokalisation und ungefähre Ausdehnung der Karies. Die tatsächliche Ausbreitung wird anhand dieser meist unterschätzt. In histologischen Schnitten zeigt sich die Karies meist weiter fortgeschritten als auf dem Röntgenbild erkennbar [30]. Eine Aussage über das Vorliegen einer Kavitation lässt sich durch Röntgenaufnahmen nur schwer treffen. Pitts und Rimmer stellten in einer Studie fest, dass ein Einbruch abhängig von der Tiefe der Läsion ist. So lag bei einer radiologisch feststellbaren Transluzenz bis in die äußere Dentinhälfte in 40% der Fälle eine Kavität vor, während bei einer Aufhellung bis in die innere Dentinhälfte zu 100% ein Einbruch feststellbar war. Hingegen zeigten sich bei Aufhellungen bis zur Schmelz-Dentin-Grenze nur in 10% der Fälle eine Kavität [35].

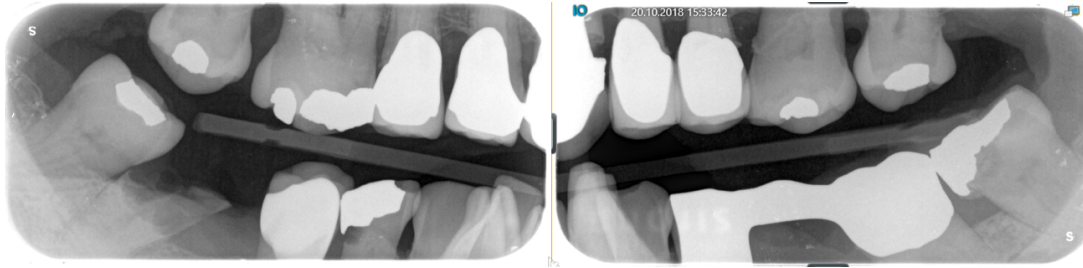


Abb. 3: intraorale Bissflügelaufnahme aus der Studie aufgenommen mit Speicherfolie (60kV, 0,32s Belichtungszeit)

1.2.2 Extraorale Aufnahmen

Das Orthopantomogramm (OPT), auch Panoramaschichtaufnahme genannt, bietet die Möglichkeit, Zähne und Kiefer mit den benachbarten Gesichtsschädelstrukturen darzustellen. Auf dieser Panoramaaufnahme lassen sich verlagerte Zähne, die Kiefergelenke und die basalen Anteile der Kieferhöhlen erkennen, weshalb sie häufig als Übersichtsaufnahme dient. Laut aktueller Studienlage ist sie allerdings als alleiniges Mittel zur Kariesdiagnostik ungeeignet [36].

Die Aufnahme erfolgt nach dem Prinzip der linearen Verwischungstomographie. Röntgenröhre und Bildempfänger rotieren bei der Aufnahme um verschiedene Drehzentren und bilden so den Zahnbogen ab. Eine vertikale Schlitzblende am Röntgenstrahler und vor dem Sensor blenden die Strahlung ein. Strukturen, die außerhalb der abgebildeten Schicht liegen, werden unscharf dargestellt. Strukturen, die vor der Schicht liegen werden verschmälert, hinter der Schicht liegende Strukturen werden vergrößert dargestellt [28]. Die Positionierung des Zahnbogens innerhalb dieser Schicht ist dementsprechend Voraussetzung für eine auswertbare Aufnahme. Insbesondere zeigt sich dies im unteren Frontzahnbereich, der eine geringere Schichtbreite hat und somit eine exakte Positionierung erfordert, um Fehlprojektionen zu vermeiden. Aufgrund dessen ist oftmals die Diagnostik, insbesondere an den Unterkieferfrontzähnen eingeschränkt. Die Einstellung des Patienten im OPT erfolgt anhand der Mediansagittalebene und der Frankfurter Horizontalen (Ebene entlang des Unterrandes der Orbita und höchstem Punkt des *Forus acusticus externus*). Einblendbare Laserkreuze zur Ebeneneinstellung, Aufbissbehelf und anklappbare Kopfstützen erleichtern die Positionierung des Patienten.

Um eine überlappungsfreie Darstellung zu erlangen, sollte der Röntgenstrahl möglichst orthoradial auf die Zahnoberfläche treffen [28]. Durch eine Vielzahl von

Einzelprojektionen aus verschiedenen Winkeln sind moderne Panoramaeinheiten inzwischen fähig, die am besten fokussierten Aufnahmen zu errechnen und somit den Zahnbogen zeichenscharf abzubilden. Aus einer Vielzahl von Einzelaufnahmen können durch das Prinzip der Tomosynthese verschiedene Schichten rekonstruiert werden. Hierbei wird anhand der während des Scans generierten Tiefeninformationen ein limitierter 3D-Effekt erzielt. Dieser ermöglicht die Korrektur von Überlagerungen im Bereich der Approximalflächen und die Lagelokalisierung von Strukturen in bukkoraler Richtung, indem die Schichten interaktiv im Betrachtungsprogramm verändert werden können [37]. Obwohl das Prinzip der Tomosynthese bereits seit 1930 bekannt ist und von Grant in den 70er Jahren als dreidimensionale Röntgentechnik weiterentwickelt wurde, wurde diese in der Klinik mangels leistungsfähiger Sensoren kaum angewendet [38, 39]. Das Grundprinzip der Tomosynthese besteht darin, Objektdaten innerhalb der zu rekonstruierenden Ebene zeichenscharf, mit hohem räumlichen Auflösungsvermögen, abzubilden. Daten außerhalb dieser werden unscharf dargestellt. Erreicht wird dies durch Algorithmen, die die aus unterschiedlichen Winkeln aufgenommenen Einzelprojektionen durch „shift and add“-Verfahren übereinander lagern. Durch Änderung des Aufnahmewinkels werden hintereinanderliegende Objekte verschieden auf den Detektor projiziert und so Tiefeninformationen generiert. Die abzubildenden Daten einer Schicht werden verschoben und addiert, um mit hohem Kontrast und Schärfe abgebildet zu werden, während Objekte außerhalb der gewünschten Ebene verwischt werden [37, 40].

Seit der Einführung der Panoramageräte im Jahr 1961 wurden die Bildqualität stark optimiert und die Möglichkeiten zur Dosisersparung ausgeschöpft. Durch Verwendung von Cadmium-Tellur (CdTe)-Sensoren wird die Röntgenstrahlung im Gegensatz zu CCD- oder CMOS-Sensoren direkt in ein elektrisches Signal umgewandelt. Das Entfallen des Szintillators führt zu einer Reduktion der benötigten Strahlung bei der Bildgebung [41]. Die Einführung der CdTe-Sensoren ermöglichte die klinische Anwendung der Tomosynthese auch im dentalen Bereich. Anforderungen an die Sensoren sind ein rauscharmes Signal trotz hoher Ausleseraten bei hoher Aufnahmezeit und niedriger Dosis [37].

Zur Dosisreduktion bei Panoramaschichtaufnahmen besteht die Möglichkeit der Einstellung von Teilprojektionen im Sinne von Halbseiten-OPTs oder Aufnahmen von einzelnen Quadranten. Die Panoramaschichtaufnahmegeräte bieten eine Vielzahl an auswählbaren Programmen zur Darstellung ausgewählter Regionen und zur Einstellung

der Strahlungsparameter. In Hinblick auf den Strahlenschutz sollte die geringstmögliche Dosis für den Patienten gewählt werden [42]. Es können von Herstellerseite vorgegebene Aufnahmeprotokolle gewählt werden. Häufig lässt sich die Dosis jedoch auch manuell durch Anpassung der mA und kV-Werte anpassen.

Mit dem Bissflügelprogramm der Panoramaeinheit lassen sich sogenannte extraorale Bissflügelaufnahmen erstellen. Hierbei werden durch Anpassung der Rotationsachsen und Reduktion der Strahlung auf den Seitenzahnbereich ausschließlich begrenzte Areale röntgenologisch abgebildet.

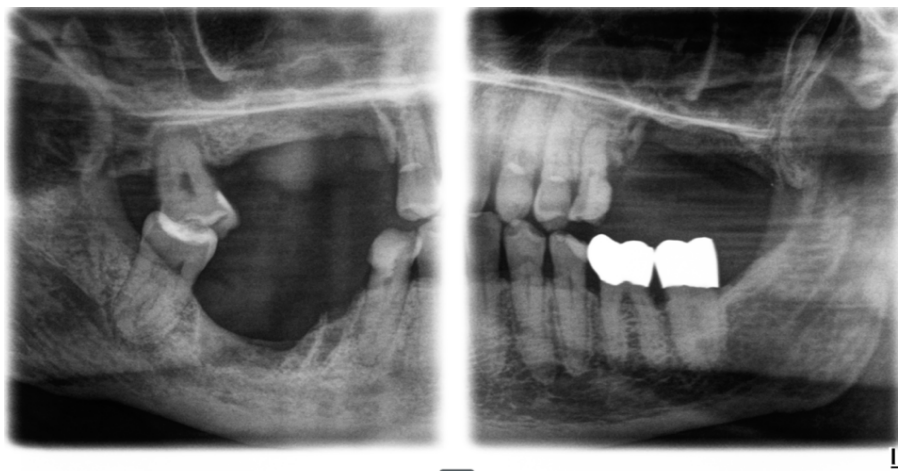


Abb. 4: Extraorale Bissflügelaufnahme aus der Studie aufgenommen mit der Sirona Orthophos SL Panoramaeinheit (Programm BW1 Einstellung Patient 4, 72 kV 14 mA)

Besonders geeignet ist dieses Programm für Personen, bei denen sich die Anfertigung von intraoralen Röntgenaufnahmen problematisch gestaltet. Eine intraorale Positionierung des Sensors kann erschwert sein, wenn ein starker Würgereiz oder ein Trismus besteht sowie im Falle geistiger oder körperlicher Retardierung. Ein weiterer Vorteil der extraoralen Bissflügelaufnahmen ist, dass nicht ausschließlich die Zahnkronen dargestellt werden, sondern auch die Zahnwurzel, sodass eventuelle periapikale Entzündungen mit diagnostiziert werden können.

Bei *Bitewing+* (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) handelt es sich um ein Tomosyntheseverfahren. Durch das permanente Auslesen während des Umlaufes werden mehrere Schichten gleichzeitig aufgezeichnet, aus denen ein dreidimensionaler Effekt errechnet wird. In der Röntgendiagnostik ist es somit möglich, im Betrachtungsprogramm Winkel und Schichtebenen zu verändern. Gegenüber dem bisherigen extraoralen Bissflügelprogramm (BW1) der Sirona Panoramaeinheit wird statt eines Zeilensensors, ein Flächensensor verwendet. Zur Effektivdosis lagen zum Studienzeitpunkt noch keine

Daten vor. Ziel dieser neuartigen Produktentwicklung ist es, die Sensitivität und Spezifität in Bereich der Kariesdiagnostik zu erhöhen, indem Approximalkontakte virtuell separiert werden können.

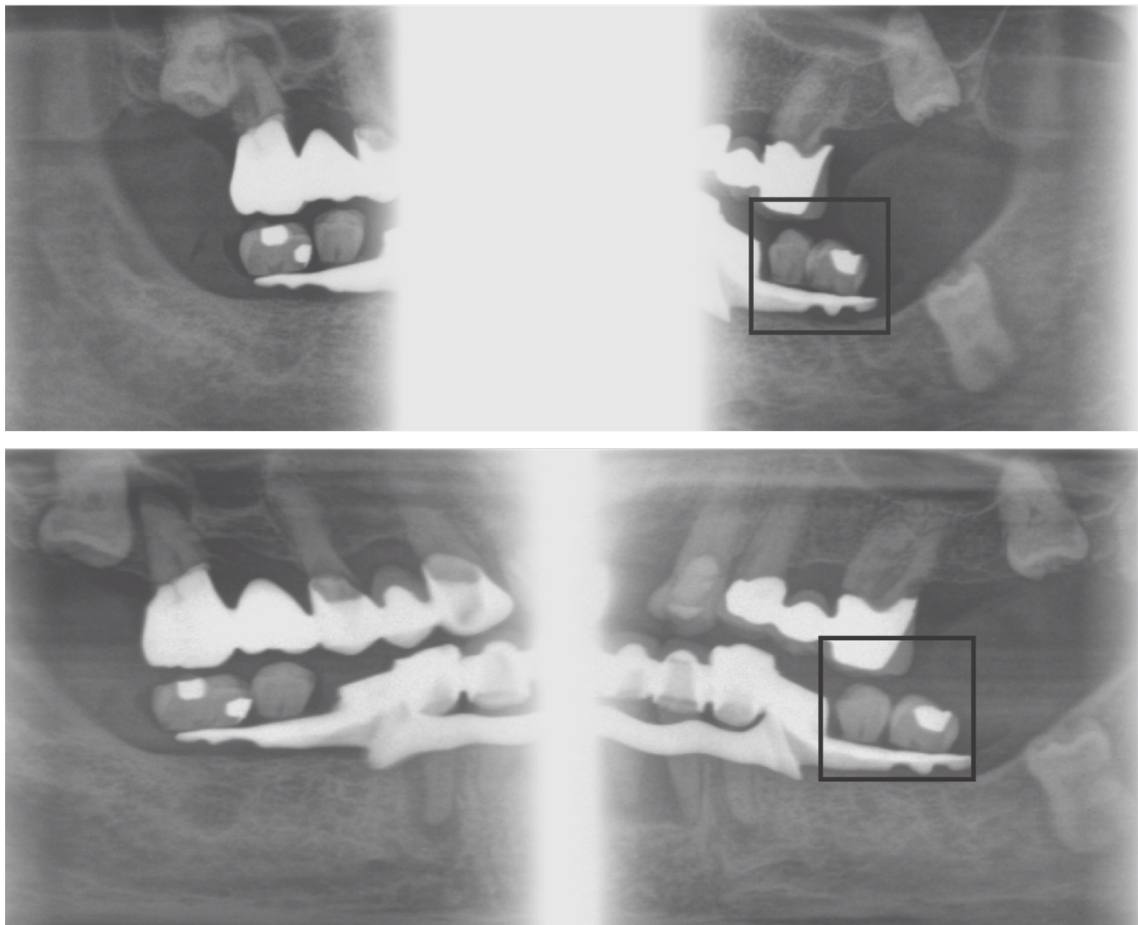


Abb. 5: Aufnahme angefertigt mit dem *Bitewing+*-Programm: Oberer Abbildungsteil zeigt die überlagerten Approximalräume der Zähne im 3. Quadranten, darunter folgende Aufnahme stellt das „Auseinanderziehen der Approximalkontakte“ nach Veränderung des Betrachtungswinkels derselben Aufnahme dar. (Dargestellte Aufnahme war nicht Teil der Studie, sondern wurde vorab mit Prothesen aus extrahierten Zähnen angefertigt.)

1.2.3 Digitale Volumentomographie

Der Gebrauch von digitalen Volumentomographen (DVT) im Bereich der Zahnmedizin begann in den 1990er Jahren [43]. Inzwischen hat sich das DVT als wichtiges diagnostisches Verfahren im Bereich der Implantatplanung, Mundkiefergesichts-chirurgie, Kieferorthopädie und Endodontie etabliert.

Die meisten DVT-Geräte bestehen aus einem C-Arm, bei dem Röntgenstrahler und Detektor 180 oder 360 Grad um den Patientenkopf rotieren. Viele Geräte bieten heute

häufig eine Kombination aus OPT und DVT. Der Patient kann hierbei sitzend oder stehend positioniert werden. Der Röntgenstrahl bei DVT-Geräten ist konus- oder pyramidenförmig und daher im internationalen Sprachgebrauch auch als *Cone Beam Computertomography* (CBCT) bekannt. Während der Rotation entstehen hunderte von zweidimensionalen Röntgenaufnahmen, aus denen später das dreidimensionale Bild rekonstruiert wird.

Je nach Gerät wird die Röntgenstrahlung kontinuierlich während des gesamten Scans emittiert oder erfolgt gepulst, sodass zwischen den einzelnen Projektionen keine Strahlung auf den Körper einwirkt. Weitere Parameter, die die Strahlungsexposition beeinflussen, sind die Stromstärke (mA), die Spannung (kV), die Scanzeit und das gewählte *Field of View* (FOV). Dabei stellt das FOV die anatomische Region dar, die während des Scanvorgangs erfasst werden soll. Es entsteht ein zylindrisches, bei einigen Geräten auch sphärisches 3D-Volumen [44]. Je nach Hersteller und Gerätetypus sind unterschiedlich große FOV einstellbar und reichen von 3x3 (Höhe x Durchmesser in cm) für einzelne Zähne, z.B. als endodontische Indikationsstellung, über mittlere FOV mit einer Größe von 10x10 cm, die die Orbita bis zum unteren Rand des Corpus mandibulae erfassen, bis hin zu Volumina von 15x18 cm, die eine vollständige Schädelrekonstruktion ermöglichen und bei Patienten mit kraniofazialen Fehlbildungen oder auch kieferorthopädisch-kieferchirurgischen Fällen indiziert sein können. Generell gilt, dass das FOV stets auf die zu untersuchende Region (*Region of Interest*, ROI) beschränkt werden sollte. Die Einstellung erfolgt durch Einblendung des Nutzstrahlenbündels mittels Kollimatoren. Limitierender Faktor für die maximale FOV-Größe ist die verfügbare Sensorgröße. Eine Möglichkeit, ein die Sensorgröße übersteigendes FOV zu erhalten, ist das sogenannte *Stitching*. Hierbei werden mehrere kleine Volumina zu einem großen Volumen zusammengerechnet [45].

Die Scanprotokolle sind in unterschiedliche Modi aufteilbar: *Low Dose*, *standard*, *high definition* und inzwischen auch *Ultra-Low-Dose* Protokolle, die Aufnahmen in unterschiedlicher Qualität und Dosis ermöglichen. Hierbei ist zu beachten, dass die Notationen zwischen den Herstellern abweichen. Das entstandene Bild lässt sich in beliebigen Schichtebenen darstellen: z.B. axial, koronal, sagittal. Weitere Möglichkeiten bestehen im Anpassen einer Panoramakurve an den Zahnbogen, um eine dem Panoramabild ähnliche Visualisierung zu erlangen sowie einer 3D-Visualisierung.

Das Grundprinzip besteht darin, dass die Röntgenstrahlen beim Durchtritt durch den Schädel, abhängig von den verschiedenen Materialdichten des Kopfes, abgeschwächt werden. Während der Rekonstruktion werden aus diesen Projektionen Voxel unterschiedlicher Grauwerten rückberechnet. Ein Voxel ist die kleinste Einheit eines dreidimensionalen Bildes, vergleichbar mit dem Pixel zweidimensionaler Aufnahmen. Voxel in DVT-Aufnahmen sind zumeist isotrop, die Größe kann je nach Gerät und Einstellung zwischen 0,06 und 0,40 Millimetern variieren [44]. Ein Bildpunkt weist zumeist eine Graustufenauflösung von 12 Bit entsprechend 4096 Graustufen auf [46]. Um eine optimale Darstellung der interessierten Gewebe (Knochen, Dentin, Zahnschmelz) zu ermöglichen, erlaubt die Bildgebungssoftware eine sogenannte Fensterung. Die Anzahl der dargestellten Grauwerte kann gefenstert werden (*window width*, W). Der niedrigste Wert wird als schwarz dargestellt, der höchste erscheint im Bild als weiß, während das Fensterzentrum (*window level*, L) den zentralen Grauwert definiert. Da im dentalen Bereich der Fokus auf Strukturen mit hoher Dichte, z.B. Knochen und Zähne liegt, erfolgt eine Fensterung zur besseren Darstellung dieser Strukturen [45]. Eine höhere Voxelgröße führt zu einer geringeren Bildauflösung, dafür aber zu einem verminderten Rauschen, während sehr kleine Voxel eine hohe Auflösung bieten, das Rauschen im Bild jedoch erhöht ist. Um dies zu verhindern, werden Aufnahmen mit kleinen Voxelgrößen häufig mit einer höheren Stromstärke aufgenommen, um das Rauschen zu reduzieren. Aufgrund der längeren Scanzeit kommt es bei hochlösenden Aufnahmen zu einem erhöhten Auftreten von Bewegungsartefakten. Außerdem benötigen *High Definition*-Protokolle einen erhöhten Bedarf an Speicherplatz und Rechenzeit [45].

Während in der Computertomographie die Abschwächung der Röntgenstrahlung anhand der Hounsfield-Skala in verschiedenen Grauwerten dargestellt wird, wird diese Skalierung im DVT nicht verwendet, da die Bildrekonstruktionsalgorithmen keine Kalibrierung erlauben. Die Grauwerte schwanken hierbei je nach DVT-Gerät, Scan-Einstellung, aufgrund erhöhter Streustrahlung und durch Abschwächung der Röntgenstrahlung durch Materialien, die auch außerhalb des gewählten FOV liegen [46]. Neuere Rekonstruktionsalgorithmen verbessern die Annäherung des DVTs an eine Hounsfield ähnliche Skala, jedoch liegt der momentane Fokus nicht auf der Darstellung der jeweiligen Dichte, sondern auf deutlich erkennbaren Strukturen, insbesondere von Hochkontrastgeweben, die z.B. für die Implantatplanung von großer Bedeutung ist [47].

Die Anfertigung dreidimensionaler Aufnahmen hat sich im Bereich der digitalen Implantatplanung fest etabliert. Einen besonderen Vorteil stellt dabei die Dimensiontreue der DVT-Aufnahmen dar. Das bedeutet, dass die rekonstruierten Strukturen in ihrer Größe sehr genau die originale Struktur wiedergeben.

Die Speicherung der Daten erfolgt im DICOM (*Digital Imaging and Communications in Medicine*) Format und kann mit der Darstellungssoftware des Geräteherstellers oder auch anderer auf dem Markt verfügbarer und zugelassener Viewer befundet werden.

1.2.4 Beeinträchtigung der Bildqualität und Artefakte

Als Artefakt bezeichnet man eine im rekonstruierten Bild sichtbare Struktur, die im Untersuchungsobjekt nicht vorhanden ist [48]. Sie zeigen sich als Streifen oder Linienstrukturen oder auch als transluzente, schattenhafte Areale, bei denen die Grauwerte von der eigentlichen Dichte des Gewebes abweichen.

Die Ausbildung von Artefakten und Einstellungsfehler beeinflussen die Diagnostik im zweidimensionalen sowie auch im dreidimensionalen Röntgenbild.

Im Bereich der extraoralen Aufnahmen können Form und Größe des Zahnbogens Einfluss auf die Darstellung der Zähne in Bissflügelaufnahme sowie im Panoramabild nehmen. Überlagerungen finden dort insbesondere im Prämolarenbereich aufgrund der Aufnahmegeometrie statt. Durch Überlagerungen und Überlappungen anatomischer Strukturen besteht zusätzlich das Risiko einer falschen Diagnose [49, 50].

Speicherfolien und Sensoren haben einen breiten Belichtungsspielraum. Änderungen der Dosis über diesen hinaus führen jedoch zu einer Beeinflussung der Bildqualität. Eine deutlich verminderte Belichtungszeit führt zu einer Verringerung der an der Oberfläche auftretenden Röntgenquanten und somit zu einem vermehrten Rauschen des Bildes, während es bei einer Erhöhung dieser zu einer vermehrten Schwärzung der Aufnahme kommt. Diese wiederum schwächt den Kontrast und so auch die Qualität der Aufnahme [28, 29].

Bissflügelaufnahmen sind Summationsbilder, die durch die zweidimensionale Darstellung der dreidimensionalen Anatomie entstehen. Beim Durchtritt durch die im Strahlengang befindliche Struktur wird der Röntgenstrahl durch das umliegende Gewebe, z.B. Weichgewebe, bereits abgeschwächt. So können benachbarte Strukturen dazu führen, dass z.B. der Knochen im Röntgenbild opaker dargestellt wird, da die Strahlung

vorher schon abgeschwächt wurde. Dieses bezeichnet man auch als Additionseffekt. Hingegen können strahlendurchlässige Hohlräume dazu führen, dass der Röntgenstrahl ungehindert das Gewebe trifft und es zu einer Auslöschung der Struktur kommt [28]. Eine häufige Fehldiagnose bei der Kariesdiagnostik mittels Bissflügeln entsteht durch den sogenannten Burn-out-Effekt. Transluzente Areale im Bereich der Zahnhälsen stellen sich als kariesähnliche Läsion dar und können zu falsch positiven Ergebnissen führen. Dieser Effekt entsteht durch die unterschiedliche Abschwächung der Röntgenstrahlen im Bereich des Dentins. Hierbei wird der Strahl durch Zahnschmelz und Kieferknochen verhältnismäßig stärker abgeschwächt als im Zahnhalsbereich, wo er ausschließlich die Gingiva durchtritt [51]. Zusätzlich können Mach-band-Effekte zu weiteren falsch positiven Diagnosen führen, die dadurch entstehen, dass das menschliche Auge den Kontrast an der Grenze zweier unterschiedlicher Grautöne subjektiv verstärkt und diese Flächen als transluzenter Bereich wahrgenommen werden [52].

Ein Faktor, der die Bildqualität in allen bildgebenden Verfahren beeinflusst, ist das Rauschen [45, 48]. Eine homogene Struktur sollte in der Aufnahme überall den gleichen Grauwert, bzw. somit die gleiche Dichte aufweisen. Durch verschiedene Faktoren kommt es jedoch zu einer Körnung des Bildes. Dies bedeutet eine Abweichung einiger Voxel vom ursprünglichen Grauwert, durch z.B. Quantenrauschen. Hierbei kommt es aufgrund der zufälligen Verteilung der auf den Detektor auftreffenden Röntgenphotonen bei geringer Dosis und damit verbundener geringerer Anzahl der Photonen zu einer Körnung des Bildes [53]. Die Erhöhung der Stromstärke (mA) führt zu einer vermehrten Strahlungsmenge und demzufolge zu einem besseren Signal, welches am Detektor ankommt. Das Rauschen wird vermindert [28]. Maßgeblich für die Bildqualität und somit das Rauschverhalten ist das Signal-Rausch-Verhältnis (*signal-to-noise-ratio*, SNR), welches das Verhältnis von eingehendem Signal zum Rauschen beschreibt sowie das Kontrast-Rausch-Verhältnis (*contrast-to-noise-ratio*, CNR). Der Kontrast beschreibt hierbei die Grauwertabstufung zweier Gewebe. Ein gutes Kontrast-Rausch-Verhältnis lässt somit gut zwischen unterschiedlichen Geweben im Bild differenzieren [54]. Auflösungsvermögen und Rauschen bedingen sich gegenseitig, während z.B. einerseits eine Verkleinerung der Voxelgröße zu einer höheren Auflösung führt, kommt es andererseits zu einem vermehrten Bildrauschen [45, 48].

Die Streustrahlung stellt einen weiteren Faktor dar, der die Bildqualität beeinträchtigt. Durch das Auftreffen auf den Detektor kommt es zu einer zusätzlichen Schwärzung des

Bildes. Bei der Digitalen Volumentomographie entsteht dieser Effekt durch die Berechnung der Rückprojektion. Es resultiert eine Überschätzung der Abschwächung der Röntgenstrahlung durch die im Strahlengang liegende Struktur. Die Streustrahlung tritt im DVT häufiger auf, als bei der Computertomographie, da bei letzterer die auftreffende Streuung aufgrund des fächerförmigen Röntgenstrahls durch Kollimatoren einfacher zu verhindern ist [48].

Auslöschungsartefakte treten auf, wenn sich Strukturen im Strahlengang befinden, die die Röntgenstrahlung beinahe vollständig oder sogar vollständig absorbieren. Der Detektor empfängt an dieser Stelle kein oder ein sehr geringes Signal, weshalb hier keine Abschwächung des Röntgenstrahles berechnet werden kann. Dies führt zu Artefakten im rekonstruierten Bild, die sich als helle Linien oder Flächen äußern. Die Artefaktbildung ist hierbei abhängig von der Dichte des Materials, der Ordnungszahl und der Schichtdicke. So kann ein umfassend prothetisch saniertes Gebiss mit metallischen Restaurationen, wie z.B. Amalgam, Gold- oder NEM-Kronen sowie Implantaten, eine Diagnostik im DVT, aber auch in zweidimensionalen Röntgenaufnahmen unmöglich machen [55]. Bei der Aufnahme kleiner FOV befindet sich eine große Masse außerhalb der region of interest (ROI), durch die die Strahlung durchtritt. Auch diese trägt zur Abschwächung der Röntgenstrahlen bei und verändert demzufolge die eigentliche Bildqualität [45].

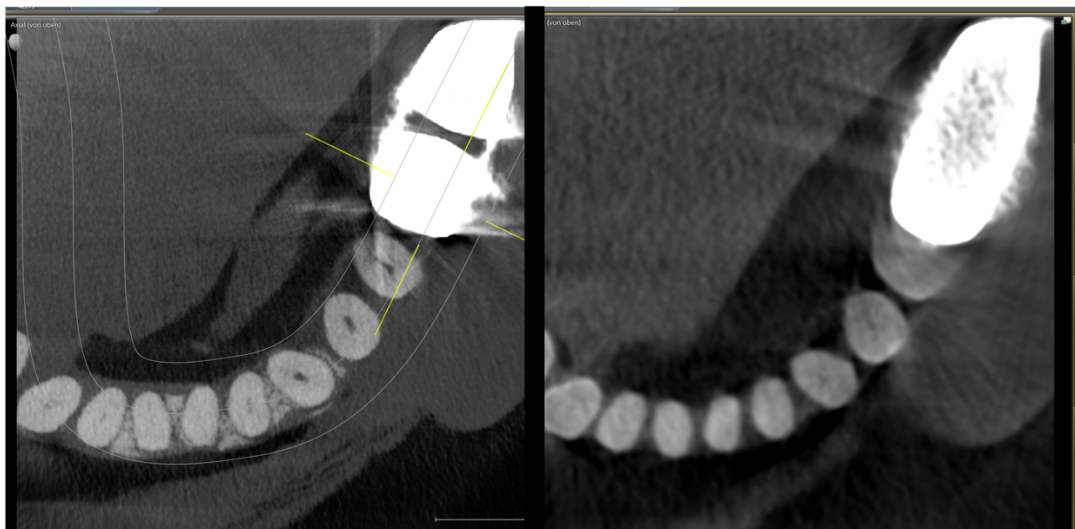


Abb. 6: Ausbildung von Auslöschungsartefakten im DVT aufgrund von metallischen Restaurationen: links: *High Definition*-Protokoll, rechts: *Low Dose*-Protokoll

Das Strahlenspektrum des emittierten Röntgenstrahls ist polychromatisch. Dadurch, dass der energiearme, langwellige Teil dieses Spektrums an röntgendichten Strukturen

absorbiert wird, entstehen Aufhärtungsartefakte. Die am Detektor eintretende Strahlung verschiebt sich hin zu einem Energiespektrum, das im hohen, kurzwelligen Bereich liegt. Da die Rekonstruktion des Bildes anhand der Annahme erfolgt, dass ein monochromatischer Röntgenstrahl vorliegt (Lambert-Beersche-Gesetz), kommt es in Regionen, die neben röntgendichten Materialien liegen, zu einer verhältnismäßig geringen Abschwächung der Röntgenstrahlen. Es bilden sich dunkle Artefaktlinien entlang dieser Strukturen, die die Strahlung im Vergleich zur Nachbarstruktur weniger abschwächen [45].

Bewegungsartefakte entstehen durch Patientenbewegungen während des Scans und erscheinen häufig als Doppelkonturen. Bei einer längeren Aufnahmezeit, insbesondere bei hochauflösenden Scans mit einer geringen Voxelgröße, können minimale Bewegungen zu einer Artefaktbildungen führen (Aufnahmezeit für Panoramaaufnahme mit dem Orthophos SL (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland): 14,1 s, DVT-Aufnahme in HD, unabhängig des FOVs, maximale Strahlzeit: 14,4 s [56]).

In der Praxis bedeutet dies, dass die Diagnostik durch verschiedene Artefakte beeinflusst werden kann [57]. So lassen sich aufgrund von Metallartefakten periimplantäre Knochendefekte schlechter detektieren [58] und Wurzelfrakturen aufgrund von röntgendichten intrakanalikulären Materialien schwerer ausschließen [55].

Lösungsansätze stellen hierbei Rekonstruktionsalgorithmen dar, die bereits im Bereich der CT erprobt werden. Dies sind iterative Rekonstruktionsalgorithmen (ISR), wie z.B. *adaptive statistical iterative reconstruction* (ASIR) sowie *model-based iterative reconstruction* (MBIR) Techniken. Bei ISR werden durch ein sogenanntes *correction loop* die Bilder an ihre tatsächliche Dichteverteilung angenähert und ein Rauschen somit vermindert. Es ließ sich feststellen, dass bei der Verwendung dieser Algorithmen eine 50-prozentige Reduktion der Dosis möglich ist, bei einem Rauschverhalten, das dem eines üblichen Rechenprotokoll entspricht. Asma'a Al-Ekrish et al. zeigten in einer Studie, dass die Verwendung von MBIR und ASIR sowie *Low Dose*-Protokollen ausreichend seien, um hochpräzise Aufnahmen anzufertigen, die im Bereich der digitalen Implantatplanung nötig sind. Längenmessungen des Kieferkamms seien bei Dosis einsparenden Protokollen genauso gut möglich wie beim Standardprotokoll, während erstere eine Dosisreduktion um 97,5% ermöglichten [59]. Zum jetzigen Zeitpunkt sind allerdings noch weitere Forschungen, in Hinblick auf die Darstellbarkeit von wichtigen Strukturen, wie z.B. des Nervus alveolaris inferior im Bereich der Implantatplanung und

der Herstellung von Bohrschablonen auf Basis von dosisreduzierten Rechenprotokollen notwendig [60].

1.2.5 Rechtfertigende Indikation

Etwa 40 Prozent aller in Deutschland angefertigten Röntgenaufnahmen erfolgen im Bereich der Zahnmedizin, wobei der Anteil zahnärztlicher Röntgenuntersuchungen zur Gesamtdosis nur etwa 5 Prozent beträgt [61]. Für die digitale Volumentomographie müssen Zahnärzte eine gesonderte Fachkunde erlangen [62].

Ionisierende Strahlen sind in der Lage, beim Durchtritt durch Gewebe Schäden hervorzurufen, indem es aufgrund von Energietransfer zu Wechselwirkungen kommt. Röntgenaufnahmen dürfen deshalb nur angefertigt werden, wenn eine rechtfertigende Indikation vorliegt. Dies bedeutet, dass der gesundheitliche Nutzen höher als das Strahlenrisiko sein muss (§ 83 Abs.3 StrlSchG). Die Anwendung der Röntgenstrahlung sollte dem ALARA (*as low as reasonably achievable*) - Prinzip folgen. Die Strahlung sollte immer so gering wie möglich gewählt werden. Im Bereich der DVT, wo hochauflösende Aufnahmen möglich sind, sollte immer die Frage gestellt werden, inwieweit die Strahlung reduziert werden kann, um eine diagnostisch aussagekräftige Aufnahme zu erhalten. Aufnahmeparameter wie Spannung, Stromstärke, FOV und *High Definition*-Aufnahmeprotokolle sollten an die jeweilige Indikation angepasst werden, weshalb das ALADA (*as low as diagnostically acceptable*) - Prinzip entstanden ist [42]. Die Vielzahl der sich auf dem Markt befindenden Geräte und die zusätzliche Variation der Scanprotokolle und Einstellungen erschweren die Einschätzung der entstehenden Dosis bei einem DVT-Scan. Die jeweilige Dosis schwankt hierbei je nach Patientenalter, Indikation und Aufnahmeprotokoll. Die Verwendung von *Low Dose*-Protokollen durch Adjustierung des FOV ausschließlich auf die ROI und die Reduzierung der Scanparameter erlauben eine erhebliche Dosisreduzierung [63]. Festzustellen ist jedoch, dass ein kleines FOV, lokalisiert auf eine mandibuläre Region, eine höhere Dosis erreicht als die Aufnahme eines FOV der gleichen Größe im Bereich der Maxilla. Die Begründung hierfür ist, dass bei einer Aufnahme im Bereich der Mandibula sich Speicheldrüsen, Schilddrüse und Ösophagus näher zum Strahlengang befinden [64]. Insgesamt gibt es jedoch bisher wenig Evidenz, inwieweit der Nutzen der dreidimensionalen Technik überwiegt und somit eine höhere Strahlenbelastung rechtfertigt. Bei Kindern werden dreidimensionale Aufnahmen insbesondere im Bereich der Kieferorthopädie angefertigt. Indikationen sind hierfür Mund-Kiefer-Gaumenspalten,

Traumata, Verdacht auf pathologische Befunde sowie prä- und postoperative Aufnahmen in der orthognathen Chirurgie. Der Hauptanteil der DVT im Kindesalter findet allerdings aufgrund dentaler Anomalien statt. Während kleine FOVs bei einzelnen retinierten Zähnen angefertigt werden, wird bei dentalen Lageanomalien, LKG-Spalten und Dysgnathien ein größeres FOV gewählt. Dabei steigt die effektive Dosis mit der Größe des gescannten Areals. Speicheldrüsen, Schilddrüse und Augenlinsen sind hierbei radiosensitive Strukturen, die aufgrund ihrer anatomischen Lage im Bereich der Strahlung liegen können. Die Organdosis des Gehirns steigt bei großen FOV an, da es im Bereich der Primärstrahlung liegt [65]. Die Schilddrüsendosis kann durch die Verwendung eines Schilddrüsenschutzes gesenkt werden [66]. Die höchste Organdosis eines DVT-Scans bei Kindern lässt sich an den Speicheldrüsen feststellen, da diese sich unabhängig des FOVs im Strahlengang befinden [65]. Limitierend aufgrund der aktuellen Datenlage ist hierbei festzustellen, dass die meisten Studien sich, bedingt durch die hohe Variation, nur auf wenige Geräte beschränken.

Zur Dosiseinschätzung kann die effektive Dosis herangezogen werden. Sie berücksichtigt die unterschiedliche Empfindlichkeit der Organe und setzt sich aus der Organdosis $\times$ Gewebewichtungsfaktor zusammen. Im Jahr 2007 änderte die *International Commission on Radiological Protection* (ICRP) die Wichtung der Gewebe aufgrund aktueller Forschung und Datenlage, welches zu einer 10 % Dosiserhöhung bei Röntgenaufnahmen im Bereich des Schädels führte [64]. Die Wichtung von Gewebe, welche bei einer kraniofazialen Röntgenaufnahme im Strahlengang oder in der Nähe von diesem liegt, wurde geändert und zusätzlich wurden Gewebe wie Mukosa, Speicheldrüsen und obere Luftwege hinzugezogen. Unterschiede in der Dosis entstehen zusätzlich, da bei Kindern aufgrund ihrer Körpergröße Gehirn und Schilddrüse als radiosensitive Strukturen näher am Strahlenfeld liegen. Außerdem ist wegen des Zellwachstums und der Organentwicklung die Sensitivität dieser zusätzlich erhöht. Insgesamt haben sie eine längere Lebenserwartung und somit auch eine größere Zeitspanne, in der sich Krebs entwickeln könnte [67].

Der niederenergetische Anteil der Röntgenstrahlung wird von im Strahlengang liegenden Strukturen absorbiert und trägt somit nicht zur Bildgebung bei. Durch Filterung, beispielhaft durch Kupferfilter oder Aluminiumfilter, kann eine Reduktion der Strahlungsmenge bewirkt werden, indem der niederenergetische Anteil vor Durchtritt der Strukturen absorbiert wird und es insgesamt zu einer Verschiebung hin zu

energiereicheren Anteilen kommt, die letztendlich bildgebend sind [63, 68]. Stromstärke und Dosis sind proportional zueinander. Eine Verdoppelung der Stromstärke (mA) führt zu einer Verdoppelung der Dosis. Eine kontinuierliche Exposition der Strahlung während des Scans sollte deshalb vermieden und eine gepulste Aufnahme bevorzugt werden. Da eine Verkleinerung der Voxelgrößen zu einem erhöhten Rauschverhalten führt, werden hochauflösende Scans häufig mit einer erhöhten Strahlendosis angefertigt, um ein zufriedenstellendes Ergebnis und ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis zu erhalten. Dies äußert sich z.B. in einer erhöhten mA-Anzahl oder eine Erhöhung der Basisbilder, bei der die Einstellung schon von Herstellerseite im Protokoll vorgegeben ist [64]. Die S2k-Leitlinie „Dentale digitale Volumentomographie“ der Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften (AWMF) gibt für einzelne Indikationsgebiete unterschiedliche Empfehlungen zur Anfertigung eines DVTs. Auch sie weist darauf hin, dass der Anwender stets im Einzelfall entscheiden sollte, ob der diagnostische Mehrwert dem gesundheitlichen Risiko überwiegt. Zusätzlich sollten alle strahlenreduzierenden Maßnahmen ergriffen werden, die jedoch noch ein diagnostisch brauchbares Bild liefern sollten [69].

1.3 Ziele der Arbeit

In dieser Studie wird der diagnostische Nutzen zweidimensionaler und dreidimensionaler Röntgenaufnahmen in der Kariesdiagnostik vergleichend evaluiert. Hierbei liegt der Fokus auf einem neuartigen Bildkonstruktionsalgorithmus namens *Bitewing+*.

Die zweidimensionale Bissflügelaufnahme hat sich in der zahnärztlichen Praxis fest etabliert und stellt den Goldstandard in der Kariesdiagnostik dar, deren Nutzen sich über Jahre bewiesen hat. Durch Fortschritte im Bereich des digitalen Röntgens hält die dreidimensionale Röntgendiagnostik immer mehr Einzug in die Zahnmedizin. Ihr Mehrwert liegt in der realitätsnahen Darstellung der Anatomie und der damit verbundenen zuverlässigen Lokalisierung von Strukturen. Diese impliziert jedoch eine erhöhte Strahlendosis, weshalb die digitale Volumentomographie nur indikationseingeschränkt verwendet werden sollte.

Ein Nachteil der zweidimensionalen Darstellung ist, dass Strukturen überlagert werden und somit Sensitivität und Spezifität beeinträchtigt werden. In der Kariesdiagnostik tritt dies häufig aufgrund überlappender Approximalflächen bei intraoralen oder extraoralen Bissflügelaufnahmen auf. Das in dieser Studie betrachtete Programm *Bitewing+* bietet die Möglichkeit diesen Nachteil auszugleichen, indem es die Ansicht in verschiedenen Ebenen ermöglicht und erlaubt, den Betrachtungswinkel zu ändern. Da sich dieser Modus noch nicht auf dem Markt befindet, gibt es zum jetzigen Zeitpunkt keine vergleichbaren Arbeiten. Kritisch hinterfragt werden sollte stets der diagnostische Nutzen der Röntgenaufnahme. Im Rahmen dieser Dissertation soll untersucht werden, ob die 3D-Darstellung im Vergleich zu zweidimensionalen bildgebenden Verfahren Vorteile im Bereich der Kariesdiagnostik liefert. Hierbei sollen die gebräuchlichsten Röntgenaufnahmen in der Zahnmedizin untersucht werden. Dazu zählen intraorale Bissflügel mit Speicherfolie und Sensor, Aufnahmen von extraoralen Bissflügeln mit dem Bissflügelprogramm der Panoramaeinheit sowie DVT-Aufnahmen.

2 Material und Methoden

2.1 Kopfpräparate

Elf Präparate wurden vom Zentrum für Anatomie II des Universitätsklinikums Düsseldorf zur Verfügung gestellt. Mit ihrem Einverständnis vermachen die Körperspender nach ihrem Tod ihren Körper zu Lehr- und Forschungszwecken dem Institut. Es wurden insgesamt fünf Präparate, zwei bezahnt, drei unbezahnt, in die Studie eingeschlossen. Durch die Pseudonymisierung ist eine Unterscheidung nach Geschlecht nicht möglich. Die Atrophie des Alveolarkamms lässt bei einem Großteil der Präparate auf ein fortgeschrittenes Lebensalter schließen.

2.1.1 Ein- und Ausschlusskriterien

In die Studie eingeschlossen wurden Humanpräparate, die frisch und demnach nicht fixiert waren und daher eine Mundöffnung erlaubten. Die Lagerung der Präparate erfolgte bei -20°C.

Ausgeschlossen wurden Formalin-fixierte Kopfpräparate, da bei diesen eine Mundöffnung nicht möglich war. Ebenso wurden Präparate, die Bestandteil von vorherigen Forschungen mit intraoralen operativen Eingriffen waren, ausgenommen. Kopfpräparate, die ausschließlich festsitzende prothetische Versorgung mit metallischen Restaurationen aufwiesen und daher keine Kariesdiagnostik ermöglichten, fielen ebenfalls unter die Ausschlusskriterien.

2.1.2 Ethische und rechtliche Unbedenklichkeit

Die Ethikkommission der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf hat das Forschungsvorhaben geprüft und mit einem positiven Votum als ethisch und rechtlich unbedenklich eingestuft. Die Aktennummer lautet: 2018-130-FmB.

2.1.3 Zahntransplantation

Um eine Kariesdiagnostik zu ermöglichen, war es notwendig, dass die Präparate eine Bezahnung aufwiesen. Bei den insgesamt elf Präparaten war dies allerdings nur bei zweien der Fall. Viele der zur Verfügung stehenden Kopfpräparate waren zahnlos oder mit herausnehmbarem Zahnersatz (Totalprothesen, Modellgußprothesen) versorgt. Bei drei von diesen wurde eine Zahntransplantation durchgeführt. Hierzu wurden Zähne, die

im Rahmen von routinemäßigen Extraktionen aufgrund von einer nicht mehr vorhandenen Erhaltungswürdigkeit durch Parodontitis oder Karies in der Poliklinik für zahnärztliche Chirurgie und Aufnahme gezogen wurden, gesammelt.

Zunächst wurden Prothesen aus extrahierten Zähnen angefertigt. Hierzu wurden die Wurzeln der extrahierten Zähne abgetrennt und die Zähne ähnlich den Aufstellungsprinzipien einer Totalprothese angeordnet. Die Aufstellung der Zähne erfolgte zunächst in Wachs (Modellierwachs, Henry Schein, Melville, USA) und späterer Verstärkung mit lichthärtendem Kunststoff (Palatray, Pala, Kulzer, Hanau, Deutschland).

Um eine realitätsnähere Darstellung zu erreichen, bei der die Zähne fest im Knochen verankert zu sein scheinen, wurde die Entscheidung getroffen, eine Zahntransplantation durchzuführen. Im Rahmen einer kleinen Operation wurden bei drei Humanpräparaten Implantatbohrungen im Seitenzahnbereich angefertigt, um in diese extrahierte Zähne einzusetzen. Der Eingriff erfolgte in der oralchirurgischen Abteilung der Westdeutschen Kieferklinik Düsseldorf. Ein Patientenbetrieb fand zu diesem Zeitpunkt nicht statt. Die Auswahl der Zähne wurden nach möglichst realistischen Kriterien getroffen. Es wurden sowohl kariöse als auch klinisch intakt scheinende Zähne verwendet. Die Befestigung im Kieferkamm erfolgte hierbei mit einem knetbaren A-Silikon (Provil novo Putty soft fast set, Kulzer, Hanau, Deutschland).

Nach Anfertigung der Röntgenaufnahmen wurden die Zähne aus dem Spenderkopf entnommen und ausgewechselt, um so mit einer geringen Präparateanzahl möglichst viele verschiedene Fälle zu simulieren. Insgesamt fand in dieser Studie an 96 Zähnen eine Diagnostik statt.

2.2 Anfertigung der Röntgenaufnahmen

2.2.1 Digitale Volumentomographie

Die Anfertigung der dreidimensionalen Aufnahmen erfolgte mit dem DVT-Gerät Orthophos SL 3D (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland). Um das Kopfpräparat im Strahlengang des Gerätes zu platzieren, wurde eine Positionierungshilfe aus Styropor angefertigt. Die Kopfeigung wurde anhand der Mittellinie sowie der Frankfurter Horizontalen ausgerichtet. Die Anfertigung der Aufnahmen erfolgte nach folgendem Scanprotokoll:

Aufnahmemodus	Programm/ FOV	ROI	Dosis	-	kV	mA
PAN	BW+			Patient 3	69	8
PAN	BW+			Patient 4	72	8
PAN	BW1			Patient 3	69	12
PAN	BW1			Patient 4	72	14
DVT	11x10	Front	HD	Patient 3	85	6
			SD	Patient 3	85	10
			Low	Patient 1	85	6
			Low	Patient 2	85	7
			Low	Patient 3	85	10
			Low	Patient 4	85	13
	5x5	OK rechts prämolar	HD	Patient 3	85	6
			SD	Patient 3	85	10
			Low	Patient 1	85	6
			Low	Patient 2	85	7
			Low	Patient 3	85	10
			Low	Patient 4	85	13
	5x5	OK links prämolar	HD	Patient 3	85	6
			SD	Patient 3	85	10
			Low	Patient 1	85	6
			Low	Patient 2	85	7
			Low	Patient 3	85	10
			Low	Patient 4	85	13
	5x5	UK rechts prämolar	HD	Patient 3	85	6
			SD	Patient 3	85	10
			Low	Patient 1	85	6
			Low	Patient 2	85	7
			Low	Patient 3	85	10
			Low	Patient 4	85	13
	5x5	UK links prämolar	HD	Patient 3	85	6
			SD	Patient 3	85	10
			Low	Patient 1	85	6
			Low	Patient 2	85	7
			Low	Patient 3	85	10
			Low	Patient 4	85	13

Tabelle 1: Scanprotokoll dreidimensionaler Aufnahmen

Die extraoralen Bissflügelaufnahmen wurden sowohl in der Programmeinstellung BW1 mittels eines zweidimensionalen Sensors als auch in der Einstellung BW+ mittels eines

dreidimensionalen Flächensensors aufgenommen. Hierbei wurde mithilfe der voreinstellbaren Einstellungen Patient 3 und 4 die Dosis variiert (siehe obige Tabelle).

Die DVT-Aufnahmen erfolgten mit unterschiedlichen FOVs: 11x10 und 5x5 jeweils auf das gewünschte ROI begrenzt. Das gleiche FOV wurde hierbei mit unterschiedlichen Modi aufgenommen: *High Definition*, *Standard* und *Low Dose*, wobei die *Low Dose* Aufnahmen nochmals in ihrer Dosis mittels der unterschiedlichen voreingestellten Patientenmodi (Patient 1-4) variiert wurden.

Die Ansicht der Aufnahmen erfolgte mit der Bildbetrachtungssoftware Sidexis 4 (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland).

2.2.2 Intraorale Bissflügelaufnahmen

Die Anfertigung der intraoralen Aufnahmen erfolgte mit dem dentalen Tubusgerät Heliodent Plus (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland). Es wurden sowohl Bissflügelaufnahmen mit digitalem Sensor der Größe 3x4 (XIOS XG Supreme, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland), als auch mit Speicherfolie (XIOS Scan Speicherfolie, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) durchgeführt. Um die Aufnahmequalität nicht durch Verunreinigungen zu beeinträchtigen, wurden ein Bisschutz und eine Hygieneschutzhülle für die Speicherfolie verwendet. Hierbei wurde die Größe 3 der XIOS Scan Speicherfolien mit der Indikation für Bissflügelaufnahmen verwendet. Die Auslesung der Daten erfolgte mit dem Speicherfolienscanner Xios Scan (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland).

Die Positionierung des intraoralen Sensors wurde mit dem Rinn XCP-DS Fit Universal-Sensorhalter (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) vorgenommen. Bei der Speicherfolie wurde hierzu der XIOS XG AimRight Sensorhalter (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) verwendet. Durch den Gebrauch der Haltersysteme wird eine möglichst gleichmäßig vergrößerte Darstellung des Zahns im Sinne der Paralleltechnik angestrebt.

Die Anfertigung der intraoralen Bissflügel mit digitalem Sensor wurde mit unterschiedlichen Belichtungszeiten (0.08 s und 0.16 s) und zwei verschiedenen Spannungen von 60 kV und 70 kV durchgeführt.

	Spannung	Belichtungszeit	Seite
<u>Sensor</u>	60 kV	0,08 s	rechts
	60 kV	0,16 s	rechts

	70 kV	0,08 s	rechts
	70 kV	0,16 s	rechts
	60 kV	0,08 s	links
	60 kV	0,16 s	links
	70 kV	0,08 s	links
	70 kV	0,16 s	links
<u>Speicherfolie</u>	60 kV	0,32 s	rechts
	60 kV	0,32 s	links

Tabelle 2: Aufnahmeprotokoll intraoraler Aufnahmen

2.2.3 Mikro-CT-Aufnahmen

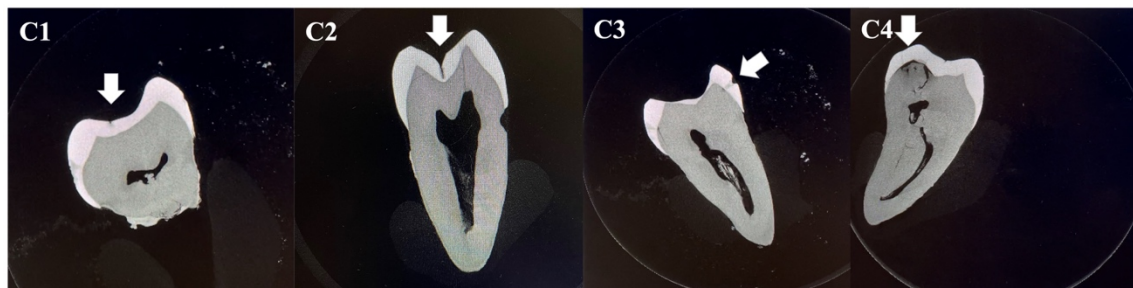


Abb. 7: Darstellung der Kariesgrade im Mikro-CT: (C1 (Karies in der äußeren Schmelzschicht), C2 (Karies in der inneren Schmelzschicht), C3 (Karies in der äußeren Dentinschicht), C4 (Karies in der inneren Dentinschicht, Pulpennähe))

Die Referenzaufnahmen erfolgten im Mikro-CT (Scanco Medical AG, Wangen-Brüttisellen, Schweiz). Die Scanparameter betrugen: 70 kVp, 114 μ A, 250 ms Integrationszeit, 10,4 μ m Auflösevermögen

Die Betrachtung erfolgte durch das Mikro-CT Evaluation Program V6.6 (Scanco Medical AG, Wangen-Brüttisellen, Schweiz). Die Einstufung der Karies erfolgte nach der C-Klassifikation.



Abb. 8: 3D-Rekonstruktion eines Mikro-CT Scans mit der Software Amira (ThermoFisher Scientific, Waltham, Massachusetts, US)

2.3 Bereitstellung der Röntgenaufnahmen

2.3.1 Betrachterauswahl

Bei Planung der Studie war zunächst vorgesehen, die Aufnahmen unabhängigen Betrachtern, d.h. Zahnärzten mit Fachkunde alio loco zur Verfügung zu stellen. Aufgrund mangelnder Standardisierung in den Zahnarztpraxen wurde von dieser Idee im Verlauf der Studie abgesehen. Unterschiedliche Betrachtungsmonitore und Lichtverhältnisse hätten die Aussagekraft der Studie beeinflusst.

Die Auswertung der Röntgenbilder erfolgte durch zehn erfahrene Zahnärzte (Observer 1 bis 10), von denen neun eine DVT-Fachkunde aufwiesen.

2.3.2 Erstellung der Datenbank

Die Betrachtung der Aufnahmen erfolgte im Röntgenübungsraum der Westdeutschen Kieferklinik. Es stehen zwölf Befundungsmonitore zur Verfügung. Zur Darstellung wurde eine eigens angelegte Datenbank des Röntgenbefundungsprogramm Sidexis (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) erstellt. Die angefertigten Röntgenaufnahmen wurden pseudonymisiert eingefügt. Für den Betrachter ist ersichtlich, um welches Aufnahmeformat (z.B. DVT oder intraorale Bissflügel) es sich handelt, jedoch nicht von welchem Präparat das Röntgenbild erstellt wurde. Extraorale *Bitewing*+-Bilder wurden in ein Betrachtungstool (XSensTest, Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) eingefügt, da die Funktionen dieses Tools noch nicht in handelsüblichen Sidexis zur Verfügung stehen. Beide Softwares erlauben die Veränderung von Kontrast- und Gamma-Werten.

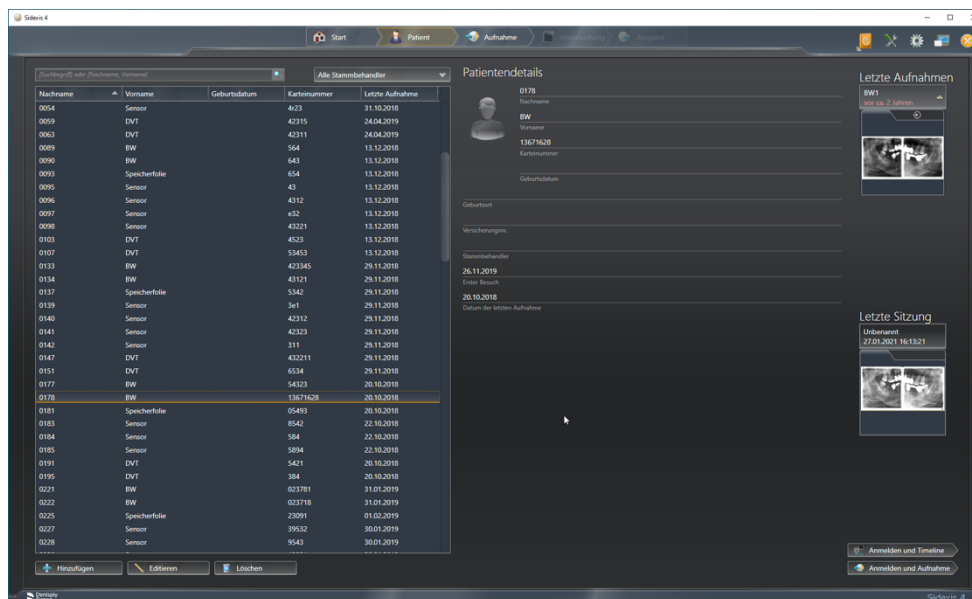


Abb. 9: Ansicht der Datenbank in Sidexis

Zur Pseudonymisierung wurden alle angefertigten Aufnahmen in einer Excel-Tabelle entlang der Präparatenummer aufgelistet und der Reihenfolge nach Nummern zugeordnet. Die Röntgenbilder wurden abermals gesichtet und anhand folgender Kriterien für die Studie zur Verfügung gestellt.

2.3.2.1 Ein- und Ausschlusskriterien

Ausgeschlossen wurden digitale Sensoraufnahmen, die mit der Spannung von 70 kV und einer Belichtungszeit von 0,16 Sekunden aufgenommen worden sind, da die Bildschwärzung keine Diagnostik erlaubte.

DVT-Aufnahmen mit einem FOV von 11x10 wurden nicht in die Studie miteingeschlossen, da für die Kariesdiagnostik die Darstellung einer kleinen ROI, welche nur die Zahnreihen und nicht den vollständigen unteren Gesichtsschädel abbildet, ausreichend ist. Bei den dreidimensionalen Bildern mit einem FOV von 5x5 wurden alle Aufnahmen ausgewählt, die mit der Einstellung *High Definition* und *Low Dose* in der Patienteneinstellung 3 aufgenommen wurden.

Von den insgesamt elf Präparaten wurden sieben in die Studie eingeschlossen. Hierzu gehörten zwei natürlich bezahnte Spender und drei Kopfpräparate, bei denen eine Zahntransplantation durchgeführt wurde. Bei zwei von diesen wurden die Zähne ausgetauscht, um eine größere Fallzahl zu simulieren. Ausgeschlossen wurden

Aufnahmen, die mit Prothesen mit extrahierten Zähnen erfolgten, da die Darstellung nach Zahntransplantation realistischer wirkte.

Es wurden 96 Zähne befundet. 32 von diesen wurden doppelt bewertet. Die Bewertung erfolgte an drei unterschiedlichen Stellen (mesial, distal und okklusal). Somit ergaben sich 384 Positionen pro Einstellung/Gerät. Durch zehn unterschiedliche Aufnahmetechniken wurden 1280 Zähne bewertet und 3840 mögliche Läsionen pro Person. Bei zehn Betrachtern waren dies 38.400 bewertete Läsionen insgesamt.

2.3.3 Erstellung des Auswertungsbogens

Zur Auswertung der Studie wurde ein Zahnschema mittels Microsoft PowerPoint (Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA) erstellt.

Patient 47

(BW Plus)

mesial										
okklusal										
distal										
Zahn	18	17	16	15	14	24	25	26	27	28
Zahn	48	47	46	45	44	34	35	36	37	38
mesial										
okklusal										
distal										

Bemerkungen: _____

Abb. 10: Zahnschema

Auf den Seiten zur Auswertung fanden die Betrachter die Zahnschemata sowie darüber den jeweils pseudonomysierten Patientennamen in Form einer Nummer. Für jeden im Schema angegebenen Zahn soll die Karies in mesial, distal und okklusal lokalisiert und in die passende Zeile eingetragen werden. Außerdem erfolgt eine Einteilung der Läsionen nach Destruktionsgrad:

- C1: Karies in der äußeren Schmelzschicht
- C2: Karies in der inneren Schmelzschicht
- C3: Karies in der äußeren Dentinschicht
- C4: Karies in der inneren Dentinschicht/Pulpanähe
- S: Sekundärkaries

Wenn keine Karies vorhanden war, wurde das entsprechende Feld leer gelassen. Bei Unsicherheiten in der Diagnose wurde der jeweilige Wert umkreist. Weiterhin sollten die

kariösen Läsionen im Zahnschema markiert werden. Zusätzlicher Platz unterhalb des Schemas erlaubte Kommentare und Anmerkungen.

Vor Start der Studie füllte jeder Observer einen Fragebogen zur Ausgangssituation aus. Befragt wurden hierbei persönliche Referenzen (Fachzahnarztausbildung, DVT-Fachkundenachweis) sowie die bisherige persönliche Erfahrung und Einstellung zur radiologischen Kariesdiagnostik im Hinblick auf zweidimensionale und dreidimensionale Verfahren.

Auf den nachfolgenden Seiten fanden die Betrachter die Zahnschemata zur Befundung. Jeder erhielt eine individuell randomisierte Reihenfolge der Aufnahmen. Die Randomisierung erfolgte hierbei durch einen List randomizer (random.org).

mesial										
okklusal		C1								
distal										
Zahn	18	17	16	15	14	24	25	26	27	28
Zahn	48	47	46	45	44	34	35	36	37	38
mesial										
okklusal				C2						
distal					C2					

Bemerkungen: Unsicherheit beim Schweregrad an 45 okklusal

Abb. 11: Beispiel eines ausgefüllten Befundes

Die Studie wurde in zwei Teile untergliedert. Am ersten Tag bewertete jeder Betrachter alle in die Studie eingeschlossenen Aufnahmen. Am zweiten Tag wurden ausgewählte Aufnahmen noch einmal wiederholt angeschaut. Von jeder Aufnahmeart (BW, BW+, Speicherfolie, Sensor, DVT) erhielt jeder Betrachter hierbei nochmals vier Aufnahmen. Die Auswahl wurde ebenfalls randomisiert (List randomizier, random.org) getroffen.

Am Abschluss der Studie stand ein Fragebogen zum Nutzen des *Bitewing+*-Programms.

2.3.4 Durchführung

Die Teilnehmer der Studie erhielten eine kurze Einführung in die Thematik und Bedienung der Software. Der angegebene Patient sollte entweder mit Sidexis 4 oder mit dem *Bitewing-Plus*-Programm geöffnet werden. War letzteres der Fall, so war dies hinter der Patientenummer vermerkt. Der *Bitewing-Plus*-Viewer (XSensTest, Sirona Dentsply

Systems GmbH) konnte mit den Dateien Layer.bat sowie Angle.bat geöffnet werden. Erstere erlaubt hierbei durch die Schichten zu scrollen, letztere den Betrachtungswinkel dynamisch zu verändern. Zusätzlich ermöglicht das Programm XSensTest eine Einstellung der Helligkeit, des Kontrasts und der Gamma-Werte. Zur Auswertung der BW+-Aufnahmen sollten beide Dateien genutzt werden. Die Ansicht der restlichen Aufnahmen erfolgte durch Sidexis 4 (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) an Befundungsmonitoren bei gedämmten Raumlicht ($< 100 \text{ lx}$, DIN 6868-157). Die Bedienung des Programmes war den anwesenden Teilnehmern bekannt, da es als Standardröntgendiagnostikprogramm in der Westdeutschen Kieferklinik verwendet wird.

2.4 Statistische Auswertung

Die Datenauswertung erfolgte mittels Microsoft Excel (Version 16.54, 2021, Microsoft Corporation, Redmond, Washington, USA) und dem Softwareprogramm R (R Core Team, 2021). Hierbei wurde die Berechnung der Sensitivität und Spezifität mit Microsoft Excel und R durchgeführt. Für die Spezifität wurde die Häufigkeit von richtigen und falschen Diagnosen an C0 Lokalisationen betrachtet. Zur Bestimmung der Sensitivität wurde die Häufigkeit einer Kariesdiagnose gegenüber der Kariesgrade in der Referenz überprüft. Die Bestimmung von Fleiss' Kappa bezüglich der Interrater-Reliabilität erfolgte für die Daten von Tag eins. Für die Intrarater-Reliabilität wurden die Werte von neun Betrachtern (Observer 10 nahm aufgrund von Krankheit nicht an Tag 2 teil) hinsichtlich Präparat, Zahn, Lokalisierung (m,o,d) und Aufnahmemodalität betrachtet. Der Chi-Square-Test (Chisq) wurde verwendet, um Unterschiede in Sensitivität und Spezifität hinsichtlich der verschiedenen Aufnahmemodalitäten herauszustellen. Das Signifikanzniveau wurde bei $p < 0,05$ festgelegt.

3 Ergebnisse

Nach der Anfertigung der Röntgenaufnahmen konnten diese den teilnehmenden Zahnärzten zur Verfügung gestellt werden. Das Datenmaterial wurde für beide Studientage ausgewertet und analysiert.

3.1 Spezifität

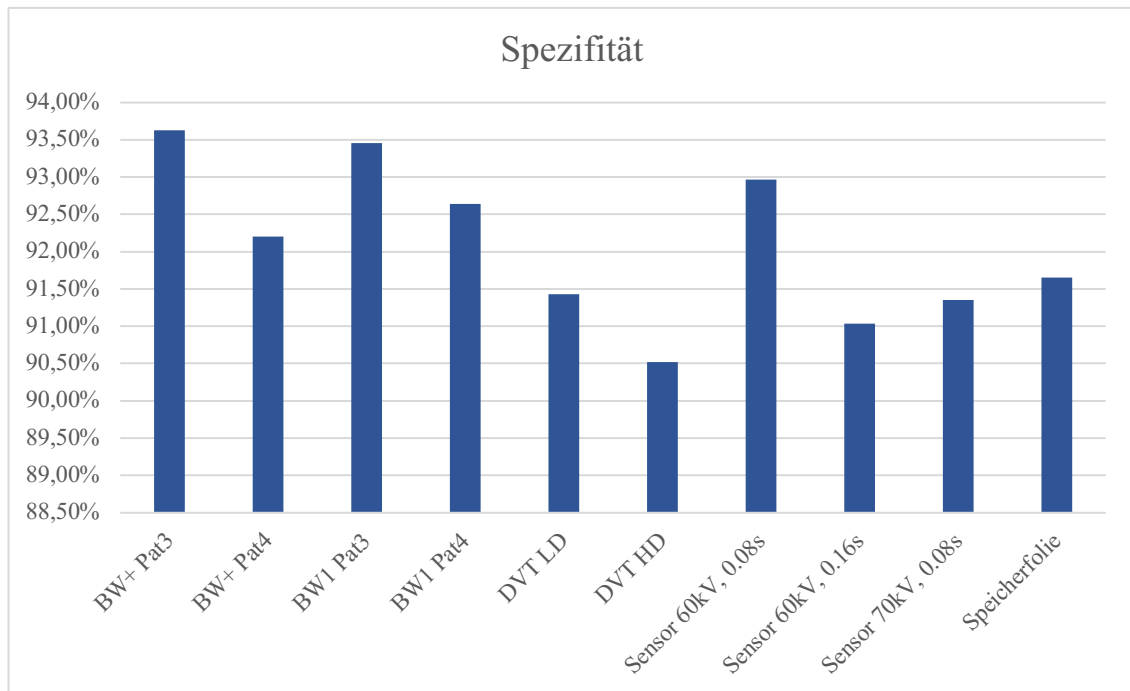


Abb. 12: Spezifität der einzelnen Aufnahmeprogramme

Die Spezifität lag bei allen Aufnahmetechniken über 90,5%. Gesunde Zähne wurden mit BW+ in 93,6% der Fälle als gesund detektiert.

Innerhalb der einzelnen Aufnahmetechniken zeigten sich bei Auswahl der Belichtungsparameter Unterschiede in der Spezifität. Das extraorale Bissflügelprogramm der Panoramaeinheit sowie *Bitewing+* erwiesen die höchste Spezifität im Aufnahmemodus Patient 3. Bei den Aufnahmen mit digitalem Sensor zeigte die Einstellung mit 60 kV und einer Belichtungszeit von 0.08 Sekunden die wenigsten falsch positiven Ergebnisse. Vergleichsweise häufig traten falsch positive Befunde bei DVT-Aufnahmen auf. Hier wurde im *High Definition*-Modus in 9,5% der zu beurteilenden Lokalisationen eine Karies an einem gesunden Zahn detektiert.

	Spezifität	C1	C2	C3	C4	falsch positiv	Chisq (p < 0,001)
BW+ Pat 3	93,63%	0,00%	0,82%	1,87%	3,68%	6,37%	15,64%
BW+ Pat 4	92,20%	0,22%	1,10%	2,47%	4,01%	7,80%	1,44%
BW1 Pat 3	93,46%	0,00%	0,33%	2,80%	3,41%	6,54%	19,35%
BW1 Pat 4	92,64%	0,11%	0,49%	3,13%	3,63%	7,36%	0,24%
DVT LD	91,43%	0,11%	0,71%	3,41%	4,34%	8,57%	0,02%
DVT HD	90,52%	0,11%	0,94%	3,55%	4,88%	9,48%	30,59%
Sensor 60 kV,0.08 s	92,97%	0,49%	1,70%	2,20%	2,64%	7,03%	1,66%
Sensor 60 kV,0.16 s	91,04%	0,71%	1,43%	3,57%	3,24%	8,96%	12,97%
Sensor 70 kV,0.08 s	91,35%	0,78%	1,72%	2,99%	3,16%	8,65%	0,96%
Speicherfolie	91,65%	1,32%	1,21%	2,69%	3,13%	8,35%	1,90%

Tabelle 3: Darstellung der Spezifität und der falsch positiven Befunde, eingeteilt in die diagnostizierten Kariesgrade

Der Chi-Square-Test zeigte signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) zwischen den Aufnahmemodalitäten. Hierbei zeigten sich die höchsten Werte für das DVT HD mit 30,6% und BW1 Pat 3 mit 19,35%.

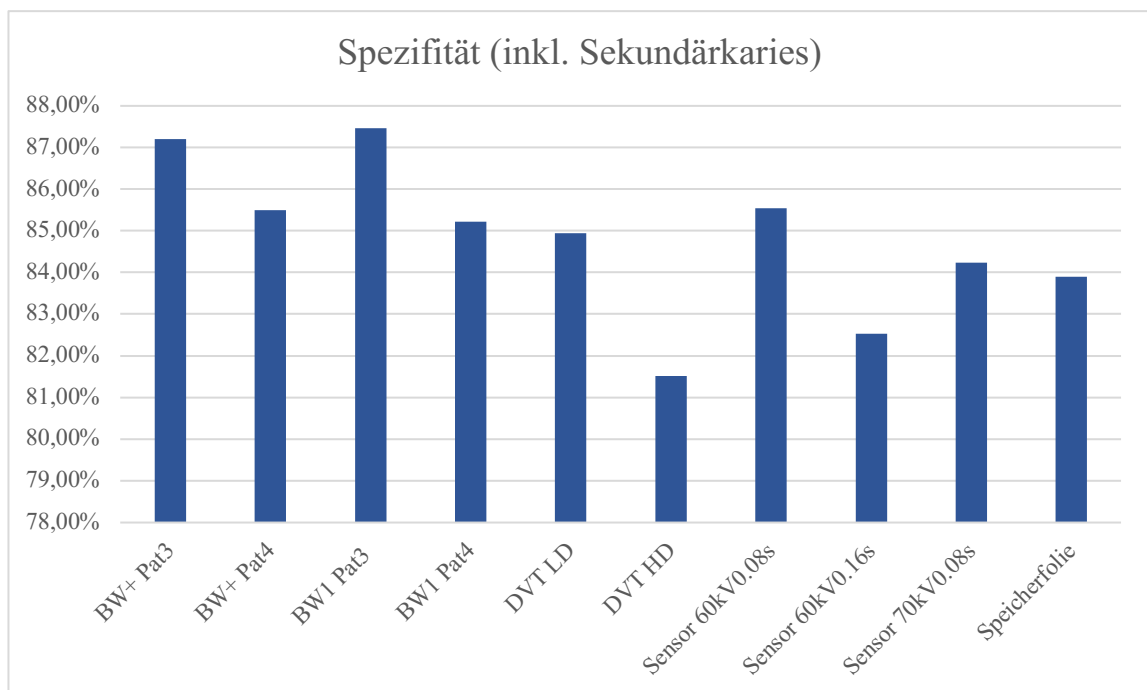


Abb. 13: Spezifität unter Berücksichtigung von Sekundärkaries

Unter Berücksichtigung von Sekundärkaries sank die Spezifität bei allen Aufnahmen. Am häufigsten wurden falsch positive Ergebnisse bei der hochauflösenden digitalen Volumentomographie diagnostiziert. Hier wurde in 18,5% der Lokalisationen eine Karies an einem gesunden Zahn befundet. Die höchste Spezifität zeigte sich bei BW+ und BW1 jeweils in der Patienteneinstellung 3.

3.2 Sensitivität

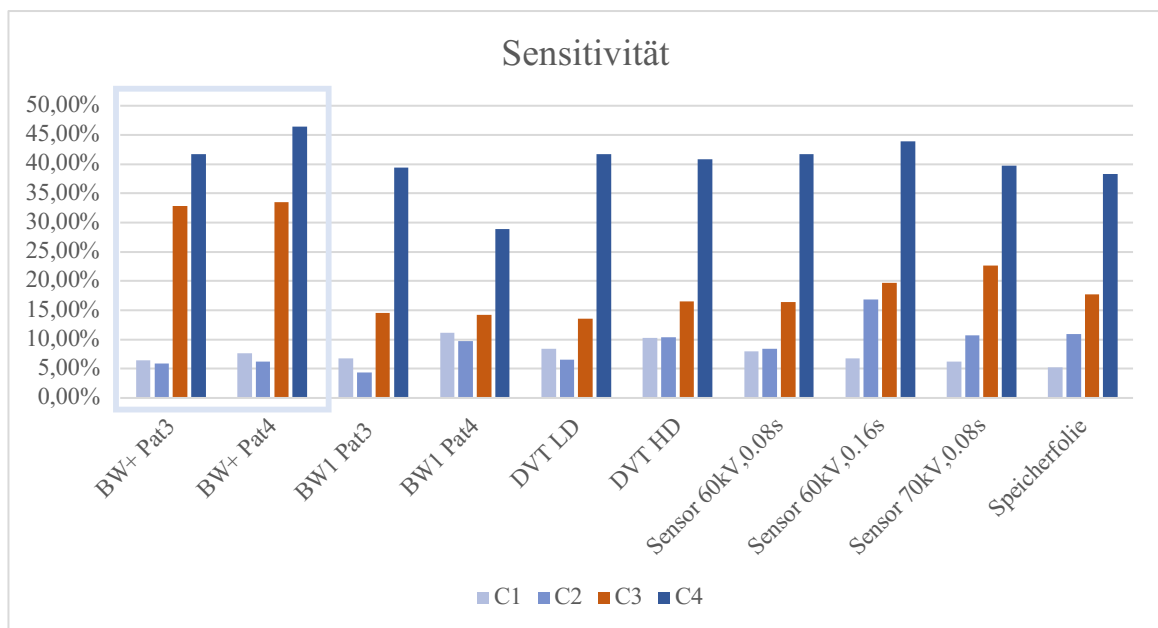


Abb. 14: Sensitivität der Aufnahmeprogramme in Bezug auf die Kariesgrade

Unabhängig von der Aufnahmemodalität stellt sich ein hoher Anteil an falsch negativen Befunden dar. Etwa 70% der in der Referenz vorliegenden Karies wurde von der Mehrzahl der Betrachter nicht diagnostiziert.

Bitewing+ zeigte bei C3-Karies eine deutlich höhere Sensitivität als alle anderen Aufnahmeprogramme. In 33,5% der möglichen Positionen, in denen in der Referenz eine C3-Karies vorlag, wurde eine Karies in BW+ Patient 4 festgestellt.

Die höchste Sensitivität wurde für C4-Karies erreicht und lag bei allen Geräten und Einstellungen > 38 %, abgesehen von BW1 Patient 4, welches ausschließlich eine Sensitivität von 28,89% erreichte.

Schmelzkaries wurde, unabhängig von der Einschätzung der Kariesausdehnung, am häufigsten mit DVT und digitalem Sensor als Karies erkannt.

Läsionsart: C1							
	keine Karies (C0)	C1	C2	C3	C4	<u>Sensitivität</u>	Chisq (p < 0,001)
BW+ Pat 3	93,60%	0,00%	0,40%	3,60%	2,40%	6,40%	
BW+ Pat 4	92,40%	0,40%	1,60%	4,40%	1,20%	7,60%	
BW1 Pat 3	93,20%	0,00%	0,80%	3,20%	2,80%	6,80%	
BW1 Pat 4	88,80%	0,00%	2,00%	6,00%	3,20%	11,20%	
DVT LD	91,60%	0,40%	0,40%	4,40%	3,20%	8,40%	
DVT HD	89,76%	0,39%	1,97%	4,33%	3,54%	10,24%	
Sensor 60 kV, 0.08 s	92,00%	0,40%	2,40%	2,80%	2,40%	8,00%	
Sensor 60 kV, 0.16 s	93,20%	0,00%	0,80%	2,80%	3,20%	6,80%	
Sensor 70 kV, 0.08 s	93,73%	0,39%	1,57%	2,35%	1,96%	6,27%	
Speicherfolie	94,80%	0,00%	0,40%	2,00%	2,80%	5,20%	
Läsionsart: C2							
	keine Karies (C0)	C1	C2	C3	C4	<u>Sensitivität</u>	Chisq (p < 0,001)
BW+ Pat 3	94,06%	0,63%	0,31%	2,81%	2,19%	5,94%	
BW+ Pat 4	93,75%	0,00%	1,25%	1,88%	3,13%	6,25%	
BW1 Pat 3	95,63%	0,00%	0,63%	1,56%	2,19%	4,38%	
BW1 Pat 4	90,31%	0,00%	1,88%	5,31%	2,50%	9,69%	
DVT LD	93,44%	0,31%	1,25%	2,81%	2,19%	6,56%	
DVT HD	89,60%	0,31%	2,75%	3,36%	3,98%	10,40%	
Sensor 60 kV, 0,08 s	91,56%	0,00%	3,13%	2,19%	3,13%	8,44%	
Sensor 60 kV, 0.16 s	83,13%	1,88%	5,94%	5,31%	3,75%	16,88%	
Sensor 70 kV, 0.08 s	89,26%	0,61%	2,76%	4,60%	2,76%	10,74%	
Speicherfolie	89,06%	0,63%	3,13%	3,75%	3,44%	10,94%	

Läsionsart: C3							
	keine Karies (C0)	C1	C2	C3	C4	<u>Sensitivität</u>	Chisq (p < 0,001)
BW+ Pat 3	67,10%	0,65%	7,10%	10,00%	15,16%	32,90%	
BW+ Pat 4	66,45%	0,00%	6,77%	8,71%	18,06%	33,55%	
BW1 Pat 3	85,48%	0,32%	0,97%	6,77%	6,45%	14,52%	
BW1 Pat 4	85,81%	0,00%	0,65%	5,81%	7,74%	14,19%	
DVT LD	86,45%	0,00%	1,94%	7,74%	3,87%	13,55%	
DVT HD	83,44%	0,00%	2,87%	7,64%	6,05%	16,56%	
Sensor 60 kV, 0.08 s	83,55%	0,32%	5,16%	6,13%	4,84%	16,45%	
Sensor 60 kV, 0.16 s	80,32%	0,32%	2,90%	9,35%	7,10%	19,68%	
Sensor 70 kV, 0.08 s	77,39%	0,64%	5,73%	8,92%	7,32%	22,61%	
Speicherfolie	82,26%	0,65%	1,94%	9,35%	5,81%	17,74%	
Läsionsart: C4							
	keine Karies (C0)	C1	C2	C3	C4	<u>Sensitivität</u>	Chisq (p=0.06)
BW+ Pat 3	58,33%	0,00%	0,56%	7,22%	33,89%	41,67%	
BW+ Pat 4	53,33%	0,00%	0,56%	6,11%	40,00%	46,67%	
BW1 Pat 3	60,56%	0,00%	1,11%	8,33%	30,00%	39,44%	
BW1 Pat 4	71,11%	0,00%	0,56%	5,00%	23,33%	28,89%	
DVT LD	58,33%	0,00%	0,00%	8,89%	32,78%	41,67%	
DVT HD	59,12%	0,00%	0,55%	8,84%	31,49%	40,88%	
Sensor 60 kV, 0.08 s	58,33%	0,00%	1,11%	7,22%	33,33%	41,67%	
Sensor 60 kV, 0.16 s	56,11%	1,11%	2,22%	7,22%	33,33%	43,89%	
Sensor 70 kV, 0.08 s	60,22%	0,00%	1,10%	7,18%	31,49%	39,78%	
Speicherfolie	61,67%	1,11%	1,11%	5,56%	30,56%	38,33%	

Tabelle 4: Darstellung der Sensitivität

Obige Tabelle stellt die Sensitivität der Aufnahmemodalitäten zugehörig zum Kariesgrad dar. Die höchsten Sensitivitätswerte für eine C1-Karies erreichte BW1 Pat 4 mit 11,20%, sowie das DVT HD mit 10,24%. C2-Karies konnte am häufigsten (16,88%) mit der digitalen Sensor Einstellung 60 kV 0.16 s diagnostiziert werden, nachfolgend von der Speicherfolie (10,94%), digitaler Sensor 70 kV 0.08 s (10,74%) und DVT HD (10,4%).

10,92% der C1-Läsionen wurden von den Teilnehmern erkannt, 43,43% von mindestens einem Teilnehmer. Für C2-Läsionen lagen diese Werte bei 13,51% der Läsionen, die erkannt wurden und 33,21% wurden von mindestens einem Teilnehmer erkannt. Sowohl bei C1 als auch C2 erreichte der Chisq-Test das Signifikanzniveau ($p < 0.001$). Es zeigte sich, dass Schmelzkaries unabhängig von der Aufnahmetechnik selten detektiert wurde.

Die höchste Sensitivität für eine C3-Karies erreichte BW+ mit Einstellung Patient 4 (33,55%) und Patient 3 (32,90%). Nachfolgend konnte eine C3-Karies mit der digitalen Sensor Einstellung 70 kV 0.08 s (22,61%) und 60 kV 0.16 s (19,68%) am häufigsten diagnostiziert werden. 26,83% dieser Läsionsart wurde von allen Betrachtern erkannt, 56,59% wurden von mindestens einem Betrachter diagnostiziert. Es konnte ein signifikanter Unterschied zwischen den einzelnen Aufnahmemodalitäten festgestellt werden ($p < 0.001$). Die höchsten Werte erreichte hierbei BW+ Patient 3 (23,39%), BW+ Patient 4 (20,70%) und BW1 Patient 3 (8,3%).

Für C4-Karies wurde in dieser Studie die höchste Sensitivität erreicht. Die richtige Diagnose einer Karies dieser Läsionsart lag bei BW+ Patient 4 mit 46,47%, DVT 41%, intraorale Aufnahmen erreichten eine Sensitivität von durchschnittlich 40,9%. Das Signifikanzniveau wurde nicht erreicht ($p=0.06$). 76,11% der Läsionen wurden von mindestens einem Betrachter detektiert, in BW+ Patient 4 war dies in 88,89% der C4-Kariesläsionen der Fall. Insgesamt wurden 45,39% der C4-Karies auf Betrachterlevel erkannt.

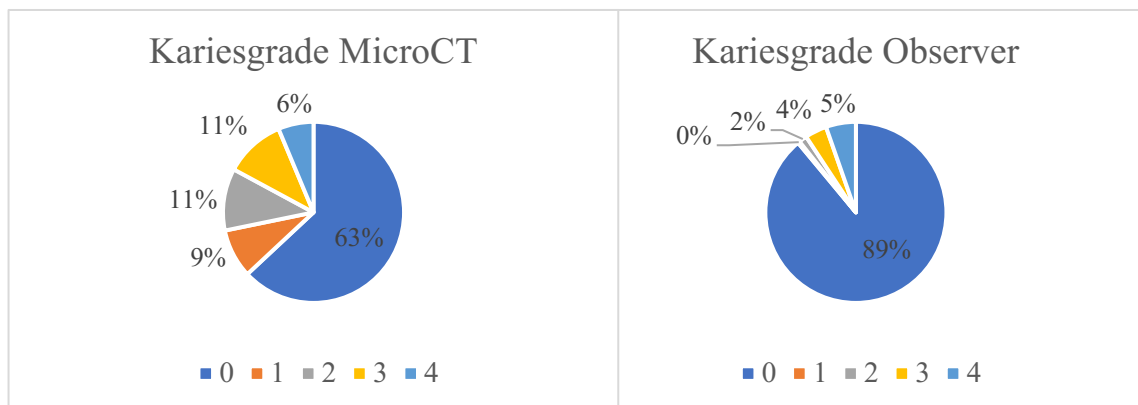


Abb. 15: Anteile der Kariesgrade (C0-C4) im Mikro-CT und bei den Betrachtern

Die Betrachtung aller Kariesgrade zeigt, dass im Mikro-CT in 63% aller Lokalisationen keine Demineralisierung (Kariesgrad 0) vorlag, während die Betrachter in 89% keine Karies feststellen konnten. Schmelzkaries (C1-C2) zeigte einen Anteil von 20% im Mikro-CT. Diese Kariesgrade wurden in nur 2% der möglichen Positionen von den Betrachtern diagnostiziert.

Zusammenfassend waren im Mikro-CT 63% der Lokalisationen kariesfrei (C0). Eine C1-Karies trat in 9%, C2 in 11%, C3 ebenfalls in 11% und C4 in 6% der Flächen auf. Von den Teilnehmern wurde in 89% der Lokalisationen die Fläche als gesund (C0) detektiert, 0% als C1, 2% als C2, 4% als C3 und 5% als C4.

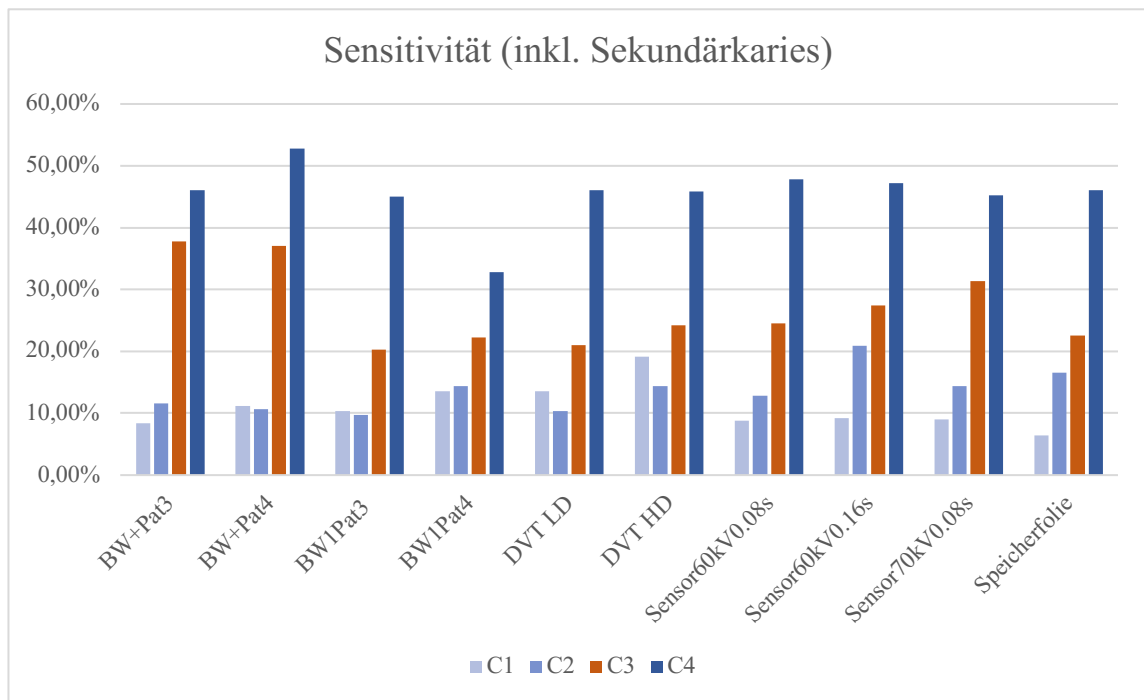


Abb. 16: Sensitivität unter Berücksichtigung von Sekundärkaries

Unter Berücksichtigung einer Sekundärkaries stieg die Sensitivität für alle Aufnahmetechniken an. BW+ erzielte unter der Einstellung Patient 4 eine Sensitivität von 37% für eine C3-Karies und von 52% für eine C4-Karies. Am seltensten wurde eine C3-Karies beim DVT im *Low Dose*-Modus sowie bei der Speicherfolie und dem extraoralen Bissflügelprogramm BW1 diagnostiziert.

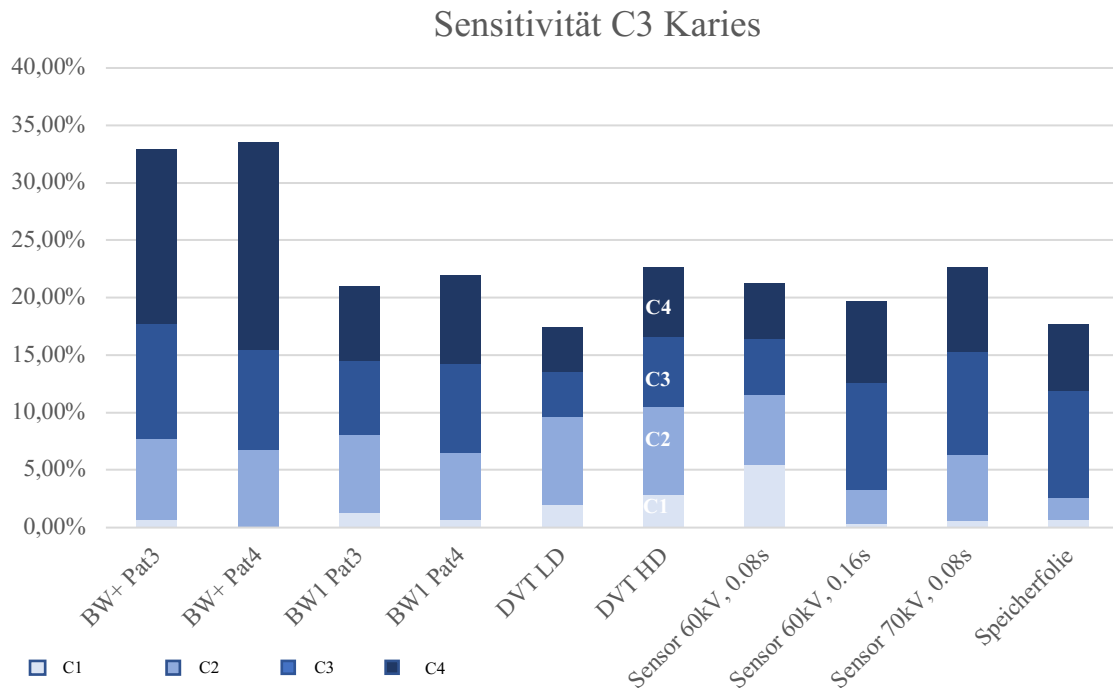


Abb. 17: Prozentualer Anteil, bei dem eine Karies festgestellt wurde – auch wenn die Kariesausdehnung in einem anderen Grad gegenüber der Referenz beurteilt wurde.

Obige Abbildung stellt die Sensitivität der einzelnen Geräte und Einstellungen bei Vorliegen einer C3-Karies in der Referenz dar. Die Aufteilung innerhalb der Modalitäten zeigt den Anteil der diagnostizierten Kariesgrade.

Zeigte sich im Mikro-CT eine C3-Karies, so wurde diese mit BW+ häufiger diagnostiziert als in anderen Aufnahmeprogrammen, auch wenn die Kariesausdehnung in einem anderen Grad gegenüber der Referenz beurteilt wurde. So schätzten die Beobachter eine C3-Karies zu 15,2% als C4-Karies ein und in 10% stimmten sie mit der Referenz überein. In 67% der möglichen Positionen wurde die Karies als falsch negativ befundet. Lag jedoch eine Kariesdiagnose vor, so wurde diese mit BW+ in 78% als behandlungsbedürftig eingestuft.

3.3 Unsicherheiten

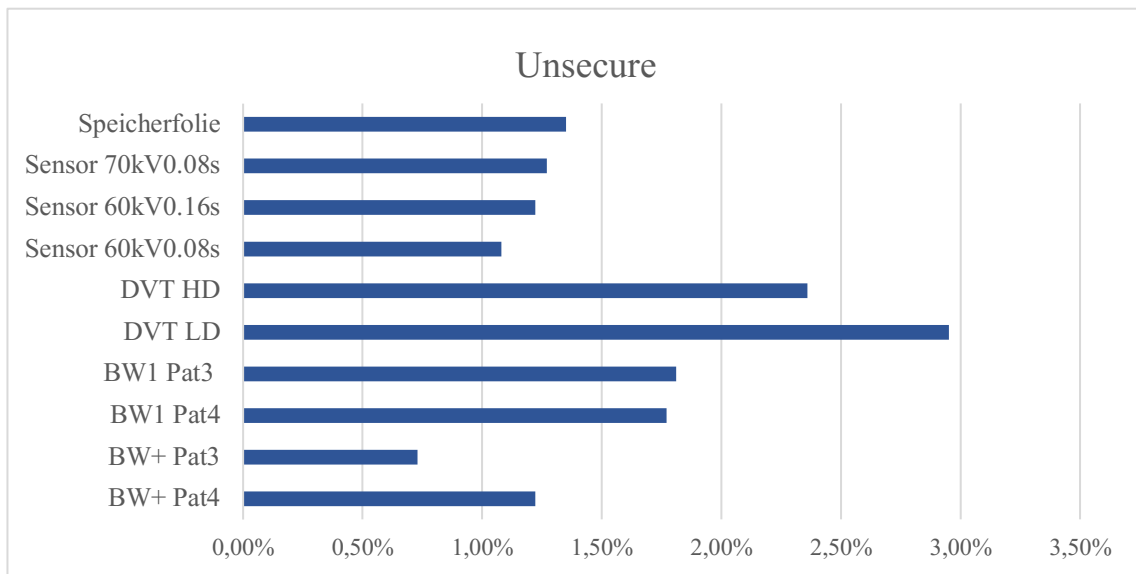


Abb. 18: Unsicherheiten bei der Diagnostik

Unsicherheiten traten im Speziellen bei der Kariesdiagnostik in DVT-Aufnahmen auf. In 2,95% der diagnostizierten Kariesgrade waren sich die Betrachter im *Low Dose*-Modus ihrer Einschätzung nicht sicher. Bei den intraoralen Aufnahmen lag die Unsicherheit zwischen 1,08% und 1,35%. Die Sicherheit in der Befundung war bei BW+ größer als bei BW1 (BW+ Pat 3: 0,73%, BW+ Pat 4: 1,22%, BW1 Pat 3: 1,81%, BW1 Pat 4: 1,77%).

3.4 Betrachterdaten

Observer1	Observer2	Observer3	Observer4	Observer5	Observer6	Observer7	Observer8	Observer9	Observer10
2,5	3,5	13	33	4	5	36	5	1,5	11

Tabelle 5: Anzahl an Berufsjahren

Der Mittelwert der Berufsjahre betrug 11,5 Jahre. 40% der Betrachter befanden sich in einer Facharztausbildung. 60% waren Facharzt für Oralchirurgie. Neun Betrachter waren im Besitz der DVT Fachkunde, während eine Person diese noch nicht vollständig abgeschlossen hatte. Die aktuelle Diagnostik der teilnehmenden Zahnärzte erfolgt mit OPT und digitalem Sensor. Die eigene Einschätzung der Erfahrung in der Kariesdiagnostik wurde durchschnittlich als hoch eingeschätzt (22,2% sehr hoch, 55,6% hoch, 22,2% moderat). Kenntnisse in der Kariesdiagnostik wurden insgesamt als sehr hoch bis moderat eingestuft (11,1% sehr hoch, 44,45% hoch, 44,45% moderat). Keiner

der Teilnehmenden gab an, sehr geringe oder geringe Erfahrungen und Kenntnisse im Bereich der Kariesdiagnostik zu haben. Die Einstufung erfolgte anhand einer 5 Punkte Likert-Skala.

Vor Studienteilnahme schätzten die Betrachter dreidimensionale Modi in der Kariesdiagnostik insbesondere bei Engständen und bei geringer Qualifizierung des Personals als sinnvoll ein. Hierbei empfanden dies 33,3% sehr sinnvoll, 44,4% sinnvoll und 22,2% waren unentschlossen.

3.5 Interrater-Reliabilität

Aufnahmemodalität	Fleiss' Kappa
BW+ Pat 4	0,353
BW+ Pat 3	0,316
BW1 Pat 4	0,305
BW1 Pat 3	0,311
DVT LD	0,265
DVT HD	0,272
Sensor 70 kV 0.08 s	0,283
Sensor 60 kV 0.16 s	0,285
Sensor 60 kV 0.08 s	0,309
Speicherfolie	0,357

Tabelle 6: Interrater-Reliabilität (Fleiss kappa)

Die Werte für die Interrater-Reliabilität basieren auf den Werten der ersten Ansicht an Tag 1. Fleiss' Kappa lag bei allen Aufnahmemodalitäten $< 0,36$. Die höchste Übereinstimmung zeigte sich bei Speicherfolienaufnahmen mit 0,357 sowie BW+ Pat 4 0,353 und BW+ Pat3 0,316 (siehe Tabelle 6).

3.6 Intrarater-Reliabilität

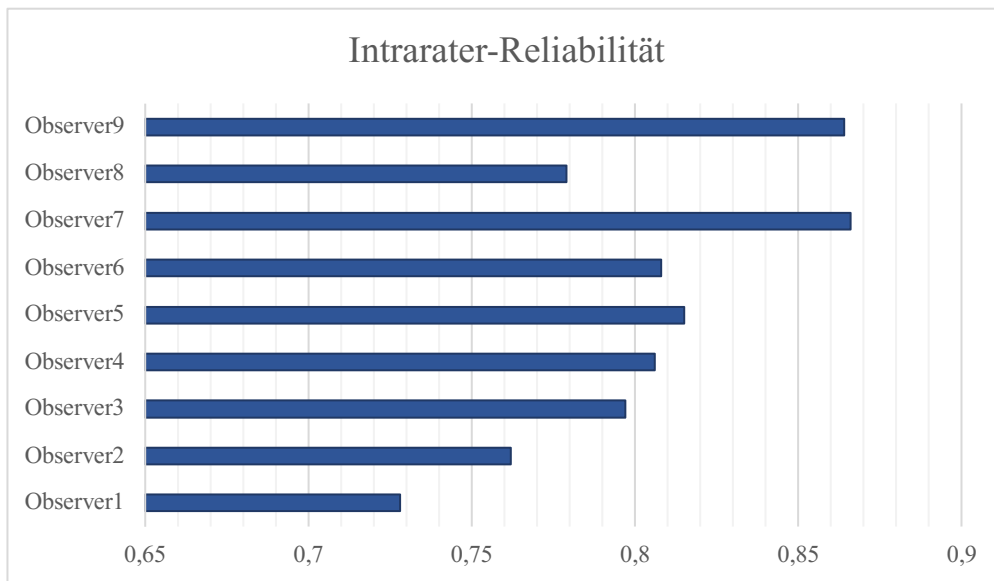


Abb. 19: Intrarater-Reliabilität

Die Kappa-Werte für die Intrarater-Reliabilität lagen bei 0.80 ± 0.04 (Minimum: 0.728 Maximum: 0.866). Die höchste Intrarater-Reliabilität erlangte Observer 7, der mit 36 Jahren die meiste Berufserfahrung aufwies. Die zweithöchste Übereinstimmung zeigte Observer 9 mit 1,5 Berufsjahren. Observer 4 mit der zweitlängsten Berufserfahrung von 33 Jahren zeigte eine Intrarater-Reliabilität von 0,806. Aufgrund eines Krankheitsausfalls nahm Observer 10 nicht mehr an Tag 2 teil, weshalb die Berechnung der Reliabilität anhand von 9 Betrachtern erfolgte.

3.7 Ergebnisse des Abschlussfragebogens

80% der Betrachtenden gaben nach Abschluss der Studie an, intraorale Bissflügelaufnahmen mit digitalem Sensor gegenüber dreidimensionalen Aufnahmen zu bevorzugen. Gründe hierfür waren die größte selbstempfundene Sicherheit bei der Befundung sowie die Gewohnheit. Als weitere Vorteile von intraoralen Bissflügelaufnahmen wurden die scharfe Darstellung und somit gute Auflösung, Zeitersparnis und die leichte Einschätzbarkeit der Kariesausdehnung genannt. Als Nachteil von intraoralen Aufnahmen wurde aufgeführt, dass eventuell mehrere Aufnahmen nötig seien, um alle Zähne abzubilden. Die Speicherfolie wurde von den Studienteilnehmern annähernd gleichwertig zum digitalen Sensor eingeschätzt.

Bei BW+ wurden am häufigsten die schwere Beurteilung bei Metallrestorationen sowie die deutlichere Unsicherheit bei der Befundung angemerkt. Die Schärfe und das Rauschverhalten wurden als schlechter im Vergleich zu intraoralen Bissflügeln eingeschätzt, sodass kleine kariöse Läsionen schnell übersehen werden können. Bei Veränderung der Schichten und Ebenen sei ein Verlust der Schärfe vorgekommen, sodass keine konstant gute Qualität gegeben sei. Als wichtigen Aspekt nannten die Zahnärzte den erhöhten Zeitfaktor, der durch die „Suche nach dem besten Bild“ entstehe, wenn Winkel und Ebenen zunächst verändert werden müssen. Unsicherheiten in der Diagnostik bei Benutzung von BW+ seien laut den Betrachtern auf die mangelnde Erfahrung zurückzuführen.

Im Vergleich zum DVT schätzten die Betrachter die Bildqualität besser und artefaktreduzierter ein. Vorteilhaft zum intraoralen Röntgen sei, dass ein größerer Bereich dargestellt werde und BW+ sich somit als guter Zusatz zu konventionellen Bissflügeln eigne.

Das Fazit, das die Betrachter nach Abschluss der Studie zogen, war, dass BW+ bei höherer Auflösung und konstanter Bildqualität das beste Tool zur Kariesdiagnostik sei und es sich insbesondere als Zusatz zur gleichzeitigen Kariesdiagnostik im OPT eigne. Insbesondere, da eine Überlagerung im Bereich der Prämolaren durch die Winkel- und Ebenenveränderung vermieden würde. Vorteile des Programms wurden im Speziellen bei Dreh- und Kippständen, Engständen und engen Approximalkontakten gesehen. Außerdem sei der subjektive Eindruck der Betrachter weniger falsch positive Ergebnisse zu erlangen, vorausgesetzt Artefakte und Auslöschungsphänomene würden reduziert werden. Sensitivität und Spezifität von BW+ wurden gleichwertig zu intraoralen Aufnahmen eingeschätzt.

4 Diskussion

Karies ist eine Erkrankung, die lebenslang auftritt und in jeder Altersklasse von Bedeutung ist. Die Verringerung der Karieslast in Deutschland lässt sich auf Prävention und nicht zuletzt auf die verbesserte Diagnostik zurückführen. Hierbei nimmt die röntgenologische Kariesdiagnostik eine Schlüsselrolle ein [70]. Als Goldstandard haben sich Bissflügelaufnahmen etabliert. Die Entscheidung, ob eine restaurative Therapie erfolgen sollte, ist von der Kariesausdehnung abhängig. Meist ist die Karies weiter fortgeschritten als auf dem Röntgenbild erkennbar [30]. Die frühzeitige und richtige Diagnose ist Voraussetzung für die korrekte Therapieentscheidung. Die rechtzeitige Behandlung der Karies verhindert eine endodontische Behandlung bei Fortschreiten der Karies bis hin zur Pulpa oder sogar die Zahnextraktion. Approximale Kariesläsionen entwickeln sich häufig im Bereich der Kontaktpunkte zweier benachbarter Zähne und lassen sich häufig bei rein klinischer Untersuchung nicht feststellen [49].

Die Qualität der Röntgenaufnahmen und damit auch deren diagnostischer Nutzen wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Die individuelle Zahnstellung des Patienten kann insbesondere bei Engständen zu Überlagerungen führen. Auch die Fähigkeiten des Personals, das die Aufnahme anfertigt, kann durch Einstellung des Aufnahmewinkels und Wählen der Aufnahmeparameter die Bildgebung beeinflussen. Die Mehrfachanfertigung bei fehlgeschlagenen Aufnahmen resultiert dabei in einer erhöhten Strahlungsdosis für den Patienten [71].

4.1 Diskussion der Ergebnisse

4.1.1 Kariesdiagnostik in zweidimensionalen Aufnahmen

Der digitale Sensor und die Speicherfolie stellen die gebräuchlichsten Röntgentechniken zur Kariesdiagnostik dar. Mehrere Studien haben ihre Gleichwertigkeit in der Befundung auch zum analogen Film bestätigt [30, 72, 73]. Die Vorteile digitaler Aufnahmen liegen insbesondere in der Strahlungsreduktion, der Zeitersparnis und den Möglichkeiten der digitalen Bildbearbeitung und Archivierung.

Panoramaaufnahmen zeigen sich im Hinblick auf die Kariesdiagnostik den Bissflügelaufnahmen unterlegen [50, 74]. In einer Studie zeigten Douglass et al., dass Panoramaaufnahmen eine Sensitivität von nur 22% erlangten, während sie bei

Bissflügelaufnahmen um 60% lag. Zur Parodontaldiagnostik eignen sich die Panoramaaufnahme und der intraorale Zahnfilm jedoch gleichermaßen [50].

Nur wenige Studien untersuchten bisher den diagnostischen Nutzen extraoraler Bissflügelaufnahmen. In einer Untersuchung von Kamburoglu et al. zeigte sich, dass diese den intraoralen Bissflügelaufnahmen unterlegen sind, da Überlagerungen in der Prämolarenregion, die insbesondere in Panoramaaufnahmen auftreten, ebenfalls bei extraoralen Bissflügeln vorkommen und somit die Kariesdiagnostik beeinträchtigen [49]. So sank die Sensitivität zur Kariesdiagnostik in Panoramaaufnahmen in einer Studie von Douglas et al. von 30% im Molarenbereich auf 19% bei den Prämolaren [50]. In extraoralen Bissflügeln lassen sich die Approximalflächen jedoch besser darstellen als in Panoramaaufnahmen, sodass sie vorteilhafter für die Detektion von Karies sind [75]. Hinsichtlich der Dosis sind beide Aufnahmen miteinander vergleichbar [76]. Nachteilig in extraoralen Aufnahmen können sich Überlagerungen von Strukturen der gegenüberliegenden Kieferseite auswirken [77]. Gegenüber intraoralen Bissflügelaufnahmen zeigten sich diese außerdem in der Sensitivität leicht unterlegen [76, 78]. Dies bestätigte sich in unserer Studie, bei der sich insbesondere die extraorale Aufnahme mit 72 kV und 14 mA (Patienteneinstellung 4) bezüglich der Diagnostik behandlungsbedürftiger Karies (C3-C4) unterlegen zeigte. Extraorale Bissflügelaufnahmen mit dem Programm BW1 erreichten nach DVT *Low Dose* die niedrigsten Sensitivitätswerte im Bereich einer C3-Karies unabhängig, ob Sekundärkaries berücksichtigt wurde. Rückführen ließen sich diese Ergebnisse auf die Überlagerungen insbesondere im Prämolarenbereich, die die Diagnostik beeinträchtigen. In einer anderen Studie zeigten sich keine statistisch signifikanten Unterschiede hinsichtlich der diagnostischen Genauigkeit von extraoralen und intraoralen Bissflügelaufnahmen, sowohl bei der Speicherfolie als auch bei dem digitalen Sensor. Der digitale Sensor hatte jedoch die größten Übereinstimmungen verglichen zu der histopathologischen Referenzuntersuchung [79]. In unseren Ergebnissen zeigte sich die Speicherfolie bezüglich der Sensitivität dem digitalen Sensor leicht unterlegen. In jedem Ausprägungsgrad der Karies unterlag die Sensitivität der Speicherfolie einer Einstellung des digitalen Sensors. Grund hierfür könnte die höhere Auflösung des Sensors im Gegensatz zur Speicherfolie sein bei 22 LP/mm gegenüber 33 LP/mm. Im Bereich der intraoralen Aufnahmen erreichte die höchste Spezifität die digitale Sensoreinstellung 60kV mit einer 0.08s Belichtungszeit, während die höchste Sensitivität einer C3-Karies

mit der Einstellung 70 kV und 0.08 s Belichtungszeit erreicht wurde. Einerseits könnte eine Begründung sein, dass die erhöhte Bildschwärzung bei höheren Spannungswerten und Belichtungszeiten zu vermehrt falsch positiven Ergebnissen führte, andererseits aber auch zu einer verbesserten Bildgebung und gutem Kontrast-Rausch-Verhältnissen bei diesen Einstellungswerten. Auch innerhalb der extraoralen Bissflügelaufnahmen (Programm BW1 und BW+) spiegelt sich dies wider. Diese erreichten die höchste Spezifität aller Aufnahmearten sowohl ohne wie auch mit Berücksichtigung von Sekundärkaries. Die Patienteneinstellung 3 zeigte sich dabei gegenüber Einstellung 4 leicht überlegen. Auf Basis dieser Ergebnisse lässt sich feststellen, dass höhere Spannungen sowie Belichtungszeiten zu einer Verringerung der Spezifität führen. Dies wiederum lässt darauf schließen, dass zur Kariesdiagnostik die Auswahl höherer Spannungen nicht gerechtfertigt werden kann. Bisherige Studien stützen dieses Ergebnis, da die Verwendung von 70 kV in einer um 40-50% höheren Patientendosis resultierte als bei 60 kV [80] und keine signifikante Verbesserung der Sensitivität bei höheren Spannungen erreicht werden konnte [81, 82].

Zusammenfassend stellen extraorale Bissflügelaufnahmen eine gute Alternative dar, wenn intraorale Aufnahmen nicht möglich sind. So kann dies der Fall bei Patienten mit eingeschränkter Mundöffnung oder starkem Würgereflex sein. Auch bei Kindern und körperlich oder geistig eingeschränkten Personen führt die intraorale Platzierung des Sensors oder der Folie häufig zu Abwehrhaltungen. In der Diagnostik führen sie zu weniger falsch positiven Ergebnissen als bei der Speicherfolie oder dem DVT, sind jedoch in ihrer Sensitivität dem Goldstandard intraoraler Bissflügel unterlegen.

4.1.2 Kariesdiagnostik in der DVT

Ein Großteil der Faktoren, die zu Fehlern in der Diagnostik führen, beruht auf der Schwierigkeit dreidimensionale anatomische Strukturen in einem zweidimensionalen Bild darzustellen. Durch die Zweidimensionalität einer Aufnahme wird der Informationsgehalt ausschließlich auf die im Strahlengang liegenden Strukturen beschränkt. Knochendefekte, die vestibulär oder oral von Zähnen liegen, können beispielsweise nur eingeschränkt erfasst werden, weshalb die in Wirklichkeit dreidimensionale Anatomie des Menschen nur unzureichend dargestellt werden kann. Vorteile bietet hier die 3D-Bildgebung. Sie führt zu einer realitätsnahen Darstellung der Anatomie. Die Lokalisierung und räumliche Zuordnung von Strukturen werden

erleichtert. Gemäß S2k-Leitlinie ist eine DVT-Aufnahme zur Kariesdiagnostik aufgrund der aktuellen Datenlage allerdings nicht indiziert [69]. Zu berücksichtigen ist hierbei jedoch, dass dosisreduzierte *Ultra-Low-Dose*-Modi in diese Leitlinie noch nicht einbezogen wurden. Fraglich ist jedoch, ob sich diese Modi zur Kariesdetektion eignen.

In unserer Studie zeigte sich der *Low Dose*-Modus in der Diagnostik einer C3-Karies gegenüber allen anderen Aufnahmearten unterlegen. Eine C3-Karies wurde nur in 13,5% der Läsionen festgestellt, C1 in 8,4% und C2 in 6,6%. Grund hierfür könnte das erhöhte Rauschverhalten aufgrund der minimierten Strahlungsdosis sein, das kleinere Läsionen schlechter diagnostizieren lässt. Unterstützt wird diese Begründung dadurch, dass im *High Definition*-Modus C1 und C2-Karies in 10,4% und C3-Karies in 16,6% diagnostiziert werden konnte. Somit konnte in höherer Auflösungsqualität auch Initialkaries besser erkannt werden. DVT in HD zeigte die zweithöchste Sensitivität von allen Aufnahmetechniken bei kleineren Schmelzläsionen (C1). Dies stützt sich durch eine These von Akdeniz et al., dass insbesondere schmale Läsionen im DVT gut diagnostizierbar seien [83]. In dieser Studie wird dargestellt, dass eine DVT-Aufnahme die diagnostische Genauigkeit von intraoralen Bissflügeln, unabhängig ob digital oder analog, erreicht. Außerdem zeigte sich, dass die Ausdehnung von trichterförmig schmalen Läsionen, die ins Dentin ziehen, in DVT-Aufnahmen besser eingeschätzt werden kann. Währenddessen sind die nur wenig ausgeprägten Dichteunterschiede von dieser Läsionsart in zweidimensionalen Aufnahmen oftmals schlechter darstellbar und damit auch schwieriger diagnostizierbar. Aufgrund dieses Vorteiles der dreidimensionalen Aufnahme zeigten Akdeniz et al., dass diese sich insbesondere zum Monitoring von schmalen Läsionen eignen. Limitierend in dieser Studie ist jedoch, dass die Zähne keine Restaurationen aufwiesen und folglich die Artefaktbildung sehr gering war [83]. Die oben genannten Ergebnisse bestätigten auch Haiter-Neto et al. in ihrer Studie. Die dreidimensionale digitale Volumentomographie erreichte hier, abhängig vom Gerätetypus, die gleiche Sensitivität wie intraorale Aufnahmen [72]. Gegenüber *Bitewing*+, dem digitalen Sensor und der Speicherfolie zeigte sich die digitale Volumentomographie in unserer Studie jedoch in der Kariesdiagnostik behandlungsbedürftiger Karies (C3-C4) unterlegen. Aufgrund der Vielzahl an Geräten und Herstellern sowie der Heterogenität der Einstellungsparameter entsteht die Schwierigkeit einer Standardisierung der Aussagen zwischen den einzelnen Studien. Während in unserer Studie der *Low Dose*-Modus eine geringere Sensitivität erlangte als

HD-Aufnahmen, zeigten Cheng et al. wiederum in ihrer Arbeit, dass eine verringerte Auflösung, abhängig von der Kariesausdehnung, keine Auswirkung auf die Kariesdiagnostik nimmt [84].

Unter Berücksichtigung von Sekundärkaries stieg die Sensitivität im *Low Dose*-Modus von 13,5% auf 21% für C3-Karies und von 15% auf 23,9% für C1 bis C2-Karies an. Kongruent stieg sie für das *High Definition*-Protokoll einer C3-Karies von 16,6% auf 24% sowie von 20,6% auf 33,6% für C1 bis C2-Karies. Diese Ergebnisse lassen darauf schließen, dass durch metallische Restaurationen verursachte Artefakte die Diagnose einer Karies nicht nachteilig beeinträchtigt haben.

Die DVT erlangte bei unserer Studie eine Spezifität von 91%. Insbesondere der HD-Modus lag mit 90,5% unterhalb der weiteren Aufnahmetechniken. Dieses Ergebnis bestätigt sich ebenso in oben genannter Studie von Haiter-Neto et al. [72]. Daraus ist zu folgern, dass vermehrt falsch positive Ergebnisse in der Kariesdiagnostik mittels digitaler Volumentomographie vorkommen. Unter Einbeziehung der Sekundärkaries sank die Spezifität sowohl in LD als auch in HD um weitere 10%. Dies könnte begründet sein durch Artefakte an metallischen Restaurationen, die sich als transluzente Bereiche darstellen und somit fälschlicher Weise als Karies diagnostiziert werden. Die Betrachter merkten im Abschlussfragebogen an, dass Metallartefakte die Untersuchung erschwert hätten. Unterstützt würde diese Bewertung zudem dadurch, dass die größten Unsicherheiten bei der Befundung mit der DVT insbesondere im *Low Dose*-Modus auftraten. Nach Abschluss der Studie stuften die Betrachter ausschließlich HD-Aufnahmen als zur Kariesdiagnostik geeignet ein.

Die erhöhte Strahlungs dosis für Patienten ist maßgeblich für die strengen Indikationseinschränkungen der digitalen Volumentomographie. Inzwischen gibt es eine Vielzahl von Parametern, die eine Dosisreduktion ermöglichen: Reduzierung der Stromstärke durch verringerte mA-Werte, Filterung der Röntgenstrahlung, Reduktion der Anzahl der Projektionen und Reduzierung der Scan-, bzw. Belichtungszeit und die Verwendung von Rekonstruktionsalgorithmen.

Die aufgenommenen Scans wurden mit einer Stromstärke von 6 mA, Strahlzeit 14,4 s in HD sowie 10 mA und einer Strahlzeit von 2,2 s in LD aufgenommen. Bei Verwendung des *Low Dose*-Modus der Sirona Orthophos SL Einheit (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) wird standardmäßig ein 1mm Kupferfilter im Bereich des Strahlenausgangsfensters verwendet. Hierdurch wird eine Filterung der

Röntgenstrahlung erreicht, bei der sich das Spektrum zu höher energetischen Anteilen verschiebt. Dies bewirkt, dass niederenergetische Strahlung, die nicht bildgebend ist, vorab herausgefiltert wird und die Hautoberflächendosis sinkt [68]. Das Dosisflächenprodukt liegt nach Herstellerangaben für den HD Modus bei einem FOV von 5x5 cm bei 415 mGycm² und 30 mGycm² für *Low Dose* [56]. Die Effektivdosis der gewählten Scans (FOV 5x5, prämolare, maxillare/mandibuläre) beträgt im *Low Dose*-Modus 4 µSv und in HD für die mandibuläre Region 71 µSv und 69 µSv für maxillare. Im dosisreduzierten Modus kann somit eine geringere effektive Dosis, als bei Panoramaaufnahmen erreicht werden. Bei diesen gibt die *International Commission of Radiological Protection* (ICRP) im Jahr 2007 eine Spanne von 2,7-24,5 µSv an [85]. Die Voxelgrößen des Orthophos SL 3D betragen 80µm in HD, 160 µm in SD und 220 µm in LD. Andere Autoren stellten fest, dass die Voxelgröße sowie Auswahl des FOV und Art des Detektors keinen Einfluss auf die Kariesdiagnostik nehmen [86, 87].

Aufgrund des Strahlungsrisikos basiert der Großteil der vorliegenden Studien, ebenso wie unsere, auf *in-vitro* Studien. Meist wurden hierbei extrahierte Zähne verwendet und im Strahlengang platziert. Diese wiesen wiederum einen unterschiedlichen Grad der Karies auf und wurden in unterschiedlichen Medien platziert, um z.B. Weichgewebe zu simulieren. Teilweise limitierend stellt sich dar, dass Zähne verwendet wurden, die keine Restaurationen aufwiesen und folglich die Artefaktbildung sehr gering war [83, 86]. Die Verwendung unterschiedlicher Geräte und bei diesen wiederum der Gebrauch verschiedener Einstellungsparameter führt zusätzlich zu einer mangelnden Standardisierung zwischen den einzelnen Studien [72, 88].

Es lässt sich zusammenfassen, dass laut aktueller Datenlage die Anfertigung eines DVT die gleiche Sensitivität wie eine zweidimensionale Aufnahme in Hinblick auf die Kariesdiagnostik erreichen kann [72, 83, 89]. Problematisch stellen sich allerdings metallische Restaurationen dar, die aufgrund von Artefaktbildung die Detektion einer Approximalkaries verhindern oder zu vermehrt falsch positiven Ergebnissen führen.

Bei Anfertigung einer DVT-Aufnahme sollte das Aufnahmeprotokoll je nach Indikation gewählt werden. Nach dem ALADA-Prinzip hat die Strahlung so gering wie möglich zu sein, um ein diagnostisch ausreichendes Ergebnis zu erreichen [42]. Aufgrund der erhöhten Strahlungs dosis sollten DVT-Aufnahmen zur Kariesdiagnostik nur für ausgewählte Fälle durchgeführt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt empfiehlt es sich, sie als Zusatzdiagnostik in Aufnahmen zu verwenden, die aufgrund anderer Indikation, z.B. bei

chirurgischer Planung angefertigt werden. In Hinblick auf die Zukunft und weitere Entwicklung bieten *Low Dose* und *Ultra-Low-Dose* Programme Perspektiven mit einer geringeren Strahlenbelastung auch für andere Indikationen dreidimensionale Aufnahmen durchzuführen. Die Effektivdosen dieser Aufnahmemodi liegen inzwischen unter denen einer Panoramaaufnahme.

4.1.3 Kariesdiagnostik in *Bitewing+*

Das Prinzip der Tomosynthese beruht darauf, dass aus einer limitierten Anzahl von Röntgenprojektionen ein 3D-Effekt errechnet wird. Durch Algorithmen entsteht eine Tiefenrekonstruktion, die mehr Bildinformationen liefern soll. Während des Umlaufes werden Röntgenaufnahmen aus unterschiedlichen Projektionswinkeln aufgenommen. Durch die individuelle Patienten-anatomie und die unterschiedliche Achsenstellung der Zähne lassen sich nicht alle Strukturen durch vorgegebene Standardeinstellungen der Schicht bei herkömmlichen extraoralen Aufnahmen scharf darstellen. Hier bietet dieses Multilayer-Verfahren Vorteile, indem die Rekonstruktion des idealen Bildes durch den Betrachter freier gewählt werden kann [37]. Das Risiko einer Neuanfertigung der Aufnahme aufgrund von Fehlplatzierungen des Patienten wird minimiert. Die Strahlungsexposition des Patienten aufgrund von Mehraufnahmen sinkt wie auch Zeitfaktor und Kosten [77]. Im Bereich der Panoramaaufnahme und des extraoralen Bissflügelprogramms BW1 wird diese Technologie bei der Panoramaeinheit Orthophos SL (Dentsply Sirona, Bensheim, Deutschland) schon verwendet, um Schichten in bucco-oraler Richtung darzustellen. Durch die *Sharp-Layer*-Technologie wird die Schichtebene dargestellt, die optimale Auflösungs- und Kontrastverhältnisse liefert. Informationen außerhalb der einzelnen Schichtebenen werden unscharf dargestellt. Durch eine Veränderung der Ebenen können Strukturen, die außerhalb der zentralen Schichtebene liegen, optimiert dargestellt werden.

Nach aktueller Datenlage gibt es nur sehr wenige Studien, die die Möglichkeiten von Multilayer-Aufnahmen im dentalen Bereich untersuchen. Die Ursprungsidee ist hierbei, die Überlagerung der Zähne durch Darstellung verschiedener Schichtebenen zu verhindern und die Positionierung des Patienten innerhalb der Schicht zu vereinfachen. Durch eine erhöhte Anzahl an Projektionen lassen sich zudem verschiedene Schichten darstellen. Ziel ist hierbei, mehr diagnostisch brauchbare Informationen zu erlangen. Mjör et al. zeigten in einer Untersuchung, dass bei dieser Technik Sekundärkaries sowie auch die tatsächliche Ausdehnung der Karies besser detektiert und eingeschätzt werden

kann [90]. Weiterhin zeigt eine aktuelle Studie, bei der die Darstellung verschiedener Multilayer-Aufnahmen in bucco-oraler Richtung untersucht wurde, dass Karies gegenüber Panoramaaufnahmen optimiert dargestellt wird. Im Vergleich zu herkömmlichen OPT-Aufnahmen konnte eine höhere Sensitivität und Spezifität in Schichtaufnahmen erreicht werden [91]. Weitere Autoren fanden Vorteile in der Diagnostik von artifiziell verursachten Wurzelresorptionen im Vergleich zur Panoramaaufnahme [92]. Aktuelle Literatur über die zusätzlichen Vorteile in der Kariesdiagnostik, wenn der Betrachtungswinkel sowie die einzelnen Schichtebenen verändert werden, lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht finden, weshalb die vorliegende Studie einen ersten Ansatz in diese Richtung liefert. Die Verwendung des herkömmlichen Bissflügel-Programms BW1 der bei dieser Studie verwendeten Panoramaeinheit ermöglicht dem Betrachter die Ansicht verschiedener Schichtebenen in bucco-oraler Richtung. *Bitewing+* bietet hingegen zusätzlich die Möglichkeit der Änderung des Betrachtungswinkels. Überlagernde Approximalflächen können separiert werden, indem die Kontaktpunkte virtuell auseinandergezogen werden, wodurch ein limitierter 3D-Effekt entsteht.

Bitewing+ erlangte die höchste Spezifität aller Aufnahmemodalitäten. Die Einstellung 3 zeigte sich gegenüber der höheren kV Zahl bei Einstellung 4 leicht überlegen. Ein Grund für die hohe Spezifität von BW+ könnte die Separierung der Kontaktpunkte darstellen. Überlagern sich die Approximalflächen zweier benachbarter Zähne, bei der einer eine Kariesläsion aufweist, kann es durch die Überlappung so erscheinen, als wäre auch an dem gesunden Nachbarzahn eine Karies festzustellen. Durch die Separierung können die Zahnflächen klar voneinander abgegrenzt werden und falsch positive Ergebnisse vermieden werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass *Bitewing+* eine signifikante Verbesserung in der Diagnostik der C3-Karies erreichen konnte. Dies ist insbesondere in der klinischen Therapieentscheidung von Bedeutung, da durch das Erreichen der Läsion in das Dentin eine invasive Therapie folgen sollte.

Trotz dieser Vorteile bevorzugten die Teilnehmer nach Abschluss dieser Studie weiterhin intraorale Bissflügelaufnahmen zur Kariesdiagnostik. Hintergrund hierfür könnte die größte Sicherheit bei der Befundung sowie der geübte Umgang in der Diagnostik dieser sein. Welche Art von Diagnostik bevorzugt verwendet wird, hängt mitunter davon ab, welche Bildgebung die Betrachter normalerweise verwenden. Nur 33% der Betrachter

würden BW+ in ihrer Praxis anwenden. Die restlichen Teilnehmer nannten als ablehnenden Grund den zusätzlichen Zeitfaktor für die Anwendung des Programms. Weitere Übung und Nutzung des Programmes könnte jedoch den Zeitbedarf zur Diagnostik reduzieren. Besonders vorteilhaft schätzten die Betrachter den Gebrauch von *Bitewing+* bei Engständen, engen Approximalkontakten sowie Dreh- und Kippständen ein. Zusätzlich erwähnt wurde, dass die Verwendung bei ungeschultem Personal sowie bei flächig gestalteten Approximalflächen im Bereich von Restaurationen vorteilhaft sei und auch als Zusatzdiagnostik bei Unsicherheit in Frage käme. Da die Teilnehmer ihre eigenen Fähigkeiten in der Kariesdiagnostik subjektiv als hoch einschätzten, könnte dies einen Grund darstellen, warum BW+ für diese nur einen geringfügig höheren Mehrwert darstellte. Trotzdem hielten die Betrachter die Kombination von Schicht- und Winkelbildern am sinnvollsten. In der subjektiven Betrachtung zeigte sich der diagnostische Nutzen von BW+ höher im Gegensatz zur DVT, aber niedriger als zu herkömmlichen 2D-Aufnahmen.

Vorteile im BW+ Programm sahen die Betrachtenden in der besseren Bildqualität mit weniger Artefakten im Vergleich zum DVT sowie im größeren Bereich, der dargestellt wird. Die Prämolaren wurden mit weniger Überlagerungen als im OPT dargestellt. Nachteilhaft seien allerdings die schwierige Beurteilung bei Metallrestaurationen und die geringere Schärfe als bei herkömmlichen Bissflügeln. Beim Durchscrollen durch die einzelnen Schichten wurde ein Verlust der Schärfe vermerkt, sodass nicht alle Schichten in gleichbleibender Qualität dargestellt werden. Insgesamt schätzen die Betrachter den BW+-Modus als gute Zusatzdiagnostik ein, welcher zusammen mit einem OPT sogar die meisten Informationen liefere. Es wurde sogar als bestes Tool zur Kariesdiagnostik eingeschätzt, wenn es eine höhere Auflösung und konstante Bildqualität liefere.

4.1.4 Inter- und Intrarater-Reliabilität

Die Interrater-Reliabilität zeigte eine ausreichende Übereinstimmung (Fleiss Kappa < 0,36) zwischen den Betrachtern. *Bitewing+* erlangte nach der Speicherfolie in beiden Einstellungen die höchste Übereinstimmung. Die Ergebnisse der Intrarater-Reliabilität lassen darauf schließen, dass die Berufserfahrung keinen Einfluss auf die Diagnostik nimmt, da die höchste Genauigkeit die Betrachter mit 1,5 und 36 Berufsjahren erzielten. Dies steht konträr zu den Schlussfolgerungen von Jeon et al., dass die persönlichen Kenntnisse der Betrachter ausschlaggebend sind [91]. Zu beachten ist allerdings, dass nur bei 9 Betrachtern die Reliabilität berechnet wurde und dass der Effekt

möglicherweise erst bei einer größeren Kohorte evident werden könnte. Übung und Können, auch im Umgang mit der Betrachtungssoftware, können sich jedoch in den Ergebnissen niederschlagen. Eine hohe Reliabilität stellt einen wichtigen Punkt im Bereich des Kariesmonitoring dar. Über einen längeren Zeitraum sollten Kariesläsionen gleichermaßen einschätzbar sein, um die Kariesprogression beurteilen zu können.

4.2 Diskussion der Methodik

4.2.1 Durchführung anhand von Humanpräparaten und extrahierten Zähnen

Die Studie erfolgte aufgrund des Strahlenschutzes an Humanpräparaten. Diese ermöglichten die realistische Darstellung annähernd wie bei einem realen Patienten. Im Gegensatz zu Studien, die *in-vitro* erfolgten und lediglich das Modell extrahierter Zähne oder eines Schädels beinhalteten, wurde die Abschwächung der Röntgenstrahlung durch das Weichgewebe mit Wange und Schleimhäuten realitätsnah dargestellt. Das Fehlen der Schleimhäute reduziert die Strahlungsaufhärtung und Streustrahlung und könnte folglich zu einer Veränderung der Ergebnisse führen. Die verwendeten Präparate waren nicht fixiert, sondern wurden tiefgekühlt gelagert, da eine Mundöffnung der Präparate nur in unfixierten Zustand möglich war. Nachteilhaft hat diese Studie jedoch beeinflusst, dass nur sehr wenige der zur Verfügung stehenden Präparate eine natürliche Bezahnung aufwiesen. Dies liegt daran, dass Körperspenden erst ab einem Lebensalter von ca. 60 Jahren möglich sind. Durch das gehobene Lebensalter weisen die Spender eine geringere Restbezahnung oder auch herausnehmbaren Zahnersatz auf.

Die Durchführung mit extrahierten Zähnen ist auch in anderen Studien gebräuchlich [72, 76, 91, 92]. Es wurden nur extrahierte Molaren und Prämolaren verwendet, da die Bissflügelaufnahmen ausschließlich den Seitenzahnbereich darstellen. Durch die Zahntransplantation war es möglich, die Anzahl der Zähne in den Aufnahmen zu erhöhen. Eine realitätsnahe Darstellung wurde durch die Verwendung einer Kombination von klinisch intakt erscheinenden sowie auch kariösen Zähnen angestrebt. In einigen Untersuchungen wurde versucht eine Karies artifiziell zu simulieren [79]. Außerdem wurde in weiteren auf die Verwendung von Zähnen mit metallischen Restaurationen im Sinne von Amalgamfüllungen oder Kronen verzichtet, um eine Artefaktbildung zu vermeiden [83, 86]. In unserer Studie wurde bei der Auswahl der extrahierten Zähne von umfangreich prothetisch versorgten Zähnen abgesehen. Ein Humanpräparat wies jedoch in der natürlichen Bezahnung eine metallische Kronen-Brücken-Versorgung in mehreren

Quadranten auf, zudem waren bei einem weiteren Präparat Zähne konservierend mit Amalgamfüllungen versorgt. Im Gesamtbild der deutschen Bevölkerung sind festsitzende Versorgungen präsent und werden in den kommenden Jahren auch häufiger vorkommen, da immer mehr Menschen ihre eigenen Zähne bis ins hohe Alter behalten und so häufiger festsitzender Zahnersatz möglich wird [2]. Die meisten Patienten im klinischen Alltag weisen ein umfangreich restauriertes Gebiss auf, weshalb die Auswahl der extrahierten Zähne ein realistisches Bild darstellte. Da diese Metallrestorationen im Sinne von Kronen, Brücken oder auch Implantaten einschließlich ihres prothetischen Aufbaus insbesondere im Bereich der dreidimensionalen Bildgebungsverfahren zu einer Artefaktbildung führen, beeinflusst dies die Diagnostik und muss in der Einschätzung der Ergebnisse mitberücksichtigt werden.

4.2.2 Limitationen der Studie

Die extrahierten Zähne wurden möglichst exakt im Bereich des Kieferkamms positioniert, allerdings war eine natürliche Aufstellung anhand eines Zahnbogens nicht immer möglich. Dies führte im Bereich der Bissflügelaufnahmen mit der Panoramaeinheit dazu, dass die Zähne teilweise nicht in der Schichtebene standen. Mit dem Bissflügelprogramm BW1 wurden die positionierten Zähne nicht vollständig dargestellt und mussten mit dem Aufnahmemodus BW2 (Aufnahme im Frontzahnbereich) ergänzt werden. Da der Zahnbogen nur annähernd simuliert werden konnte, konnte es bei Bissflügelaufnahmen vermehrt zu Überlagerungen kommen. Bei intraoralen Bissflügelaufnahmen mithilfe des digitalen Sensors trat der Fehler auf, dass der Sensor nur in einem begrenzten intraoralen Temperaturbereich auslöste, welcher aufgrund der ehemals tiefgekühlten Präparate schwierig abzuspassen war, weshalb der Sensor häufig nicht auslöste oder fehlerhafte Aufnahmen entstanden. Die intraorale Röntgenaufnahme erfordert einen aktiven Zubiss des Patienten auf den Filmhalter. Da die Humanpräparate keinen festen Zubiss wie bei einem realen Patienten erlaubten, wurden die intraoralen Aufnahmen meist mit leicht geöffnetem Mund ausgeführt, was dazu führte, dass die Sensoren schwierig zu positionieren waren und die Zahnreihen von Ober- und Unterkiefer nicht immer vollständig auf einer Aufnahme darzustellen waren. Bei einigen Transplantaten konnte die Zahnaufstellung nicht auf Okklusionsniveau erfolgen. Dies führte zu Vorkontakten insbesondere im Bereich der zweiten Molaren und verursachte so einen artifiziell erstellten offenen Biss.

Insgesamt lässt sich sagen, dass in der Klinik weitere Faktoren hinzukommen, die die Bildgebung beeinflussen, unter anderem können Bewegungen des Patienten während der Aufnahme zur Ausbildung von Artefakten führen. Zudem erfolgte durch die Teilnehmer keine klinische Inspektion der Zähne, sondern ausschließlich die Betrachtung der Röntgenaufnahmen. Im Praxisalltag kann das Ausmaß der Destruktion sowie die Lokalisation der Karies schon während der Inspektion der Mundhöhle eingeschätzt werden.

4.2.3 Analyse der Daten

In vorliegender Studie wird zwischen behandlungsbedürftiger Karies (C3-C4) und Initialläsionen (C1-C2) unterschieden. C3 stellt eine klinisch entscheidende Schwelle dar, da ab diesem Wert eine konservierende Therapie stattfinden sollte. Erreicht die Läsion das Dentin, schreitet sie schneller fort, als wenn sie auf den Zahnschmelz begrenzt ist [8]. Somit betrachteten wir weniger die exakten Karieswerte, sondern das Vorhandensein oder Fehlen von behandlungsbedürftiger Karies, da dies in der Therapiefindung im Praxisalltag entscheidender ist.

Als Referenzstandard verwendeten wir in dieser Studie das Mikro-CT. Im Vergleich zur histologischen Untersuchung bietet es den Vorteil, dass keine Schnitte angefertigt werden müssen und die Proben vollständig erhalten werden können. Die Darstellung beruht auf den Demineralisierungen bei Vorhandensein einer Karies und damit verbundenen Dichteveränderungen. Mehrere Studien belegen, dass das Mikro-CT Kariesläsionen adäquat darstellt und als gleichwertig zum histologischen Goldstandard angesehen werden kann [93-96].

4.3 Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie belegt, dass *Bitewing+* zur Kariesdiagnostik prinzipiell geeignet ist und das Potential besitzt, die Gleichwertigkeit zum aktuellen Goldstandard der intraoralen Bissflügelaufnahme in Zukunft zu erreichen. Insgesamt zeigte sich jedoch eine hohe Anzahl an falsch negativen Ergebnissen: Annähernd 70% der Kariesläsionen wurden von den Teilnehmern nicht diagnostiziert. Insbesondere die Schmelzkaries (C1-C2) wurde selten detektiert. Die Diagnostik fortgeschrittener Dentinkaries (C4) erfolgte innerhalb aller Aufnahmetechniken mit der größten Übereinstimmung zur Mikro-CT Referenz.

Innerhalb der Limitationen dieser Studie zeigte BW+ eine höhere Spezifität sowie Sensitivität für Dentinkaries gegenüber anderer Aufnahmemodalitäten. Trotz dieser diagnostischen Vorteile sollte das Nutzen-Risiko-Verhältnis individuell für jeden Patienten nach Alter und Kariesrisiko abgewogen werden, da der 3D-Effekt in einer erhöhten Strahlenbelastung resultiert. Daten zur Effektivdosis des *Bitewing+* Programms sind von Herstellerseite noch nicht veröffentlicht.

In dieser Arbeit wird der Nutzen von *Bitewing+* das erste Mal untersucht. Weitere klinische Studien, aufbauend auf unseren Ergebnissen, sollten in Zukunft erfolgen. Hierbei wäre die Überprüfung spezifischer Indikationen, wie z.B. Eng- oder Drehstände, anzuregen, um eine Eignung des Programmes für diese herauszustellen. Weiterhin ist zu untersuchen, inwiefern die Kombination aus klinischer Untersuchung und radiologischen Aufnahmen die Sensitivität und Spezifität beeinflussen. Dies ist von großer Wichtigkeit, der in der klinischen Realität nicht nur Röntgenaufnahmen untersucht werden.

4.3.1 Ausblick

Zukünftig könnte die Eignung von *Bitewing+* für die parodontale Diagnostik untersucht werden. Mit dem zusätzlichen Erhalt der Abbildung des periapikalen Gewebes gegenüber intraoralen Bissflügeln besteht das Potential, mehr Informationen mit einer Aufnahme über dentoalveoläre Strukturen zu erhalten. In vorliegender Studie wurden keine Aussagen zur Parodontaldiagnostik in BW+ getroffen, sodass hierzu noch keine Empfehlungen gegeben werden können. Einen weiteren offenen Punkt stellt die Überprüfung von *Bitewing+* im Berufsalltag dar. Aus Behandlersicht sollten der diagnostische Nutzen sowie der Zeitfaktor evaluiert werden. Ebenfalls wäre der Mehrwert für Patienten zur Vermeidung von Mehraufnahmen zu überprüfen.

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

1. Kassebaum, N., et al., *Global burden of untreated caries: a systematic review and metaregression*. Journal of dental research, 2015. **94**(5): p. 650-658.
2. Jordan, A.R. and W. Micheelis. *Fünfte Deutsche Mundgesundheitsstudie (DMS V)*. : 2016 [cited 20.06.2021; Available from: https://www.idz.institute/fileadmin/Content/Publikationen-PDF/Bd_35-Fuenfte_Deutsche_Mundgesundheitsstudie_DMS_V.pdf.
3. Marinho, V.C., et al., *Combinations of topical fluoride (toothpastes, mouthrinses, gels, varnishes) versus single topical fluoride for preventing dental caries in children and adolescents*. Cochrane Database of Systematic Reviews, 2004(1).
4. Fejerskov, O., A. Thylstrup, and M.J. Larsen, *Rational use of fluorides in caries prevention: a concept based on possible cariostatic mechanisms*. Acta Odontologica Scandinavica, 1981. **39**(4): p. 241-249.
5. Geurtsen, W., et al. *Kariesprophylaxe bei bleibenden Zähnen—grundlegende Empfehlungen (S2k)*. 2017 [cited 20.01.2021; Available from: https://www.awmf.org/uploads/tx_szleitlinien/083-0211_S2k_Kariesprophylaxe_2017-03.pdf.
6. Krause, L., et al., *Oral health behaviour of children and adolescents in Germany. Results of the cross-sectional KiGGS Wave 2 study and trends*. Journal of Health Monitoring, 2018.
7. Mejäre, I., et al., *Caries Development from 11 to 22 Years of Age: A Prospective Radiographic Study Prevalence and Distribution*. Caries research, 1998. **32**(1): p. 10-16.
8. Mejäre, I., C. Källestål, and H. Stenlund, *Incidence and progression of approximal caries from 11 to 22 years of age in Sweden: a prospective radiographic study*. Caries research, 1999. **33**(2): p. 93-100.
9. Berkowitz, R.J., *Causes, treatment and prevention of early childhood caries: a microbiologic perspective*. Journal-Canadian Dental Association, 2003. **69**(5): p. 304-307.
10. Berg, B., *Schlussfolgerungen der Deutschen Arbeitsgemeinschaft für Jugendzahnpflege ev aus den Epidemiologischen Begleituntersuchungen zur Gruppenprophylaxe 2016*. Das Gesundheitswesen, 2018. **80**(04): p. V27.
11. Van Steenkiste, M., et al., *Prävalenz von Karies, Fissurenversiegelungen und Füllungsmaterial bei deutschen Kindern und Kindern von Migranten*. Das Gesundheitswesen, 2004. **66**(11): p. 754-758.
12. Ziller, S., D. Oesterreich, and R.A. Jordan. *Mundgesundheitsziele für Deutschland bis zum Jahr 2030*. 1 2021 [cited 15.91.2022; Available from: https://www.idz.institute/fileadmin/Content/Publikationen-PDF/ZahnmedForschVersorg-1_2021_4_1.pdf.
13. Alm, A., et al., *Prevalence of approximal caries in posterior teeth in 15-year-old Swedish teenagers in relation to their caries experience at 3 years of age*. Caries research, 2007. **41**(5): p. 392-398.
14. Mejäre, I., et al., *Influence of approximal caries in primary molars on caries rate for the mesial surface of the first permanent molar in Swedish children from 6 to 12 years of age*. Caries research, 2001. **35**(3): p. 178-185.
15. Petersen, P.E., *The World Oral Health Report 2003: continuous improvement of oral health in the 21st century—the approach of the WHO Global Oral Health Programme*. Community Dentistry and oral epidemiology, 2003. **31**: p. 3-24.

16. Penning, C., et al., *Validity of probing for fissure caries diagnosis*. Caries Research, 1992. **26**(6): p. 445-449.
17. Kühnisch, J., et al., *Effects of dental probing on occlusal surfaces—a scanning electron microscopy evaluation*. Caries research, 2007. **41**(1): p. 43-48.
18. Kidd, E. and N. Pitts, *A reappraisal of the value of the bitewing radiograph in the diagnosis of posterior approximal caries*. British dental journal, 1990. **169**(7): p. 195.
19. Bloemendal, E., H.C. de Vet, and L.M. Bouter, *The value of bitewing radiographs in epidemiological caries research: a systematic review of the literature*. Journal of dentistry, 2004. **32**(4): p. 255-264.
20. Pitts, N.B., *Monitoring of caries progression in permanent and primary posterior approximal enamel by bitewing radiography a review*. Community dentistry and oral epidemiology, 1983. **11**(4): p. 228-235.
21. Goodwin, T., et al., *Guidelines on the timing and frequency of bitewing radiography: a systematic review*. British dental journal, 2017. **222**(7): p. 519.
22. Poorterman, J.H., I.H. Aartman, and H. Kalsbeek, *Underestimation of the prevalence of approximal caries and inadequate restorations in a clinical epidemiological study*. Community dentistry and oral epidemiology, 1999. **27**(5): p. 331-337.
23. Ricketts, D., et al., *Hidden caries: what is it? Does it exist? Does it matter?* International dental journal, 1997. **47**(5): p. 259-265.
24. Weerheijm, K.L., et al., *Clinically undetected occlusal dentine caries: a radiographic comparison*. Caries research, 1992. **26**(4): p. 305-309.
25. Mejäre, I., *Bitewing radiography as an aid in caries diagnosis and treatment decision in children and adolescents*. Oralprophylaxe., 2003. **25**(2): p. 66-71.
26. Espelid, I., I. Mejäre, and K. Weerheijm, *EAPD guidelines for use of radiographs in children*. European Journal of Paediatric Dentistry, 2003. **4**: p. 40-48.
27. Poorterman, J., et al., *Value of Bite-Wing Radiographs in a Clinical Epidemiological Study and Their Effect on the DMFS Index*. Caries research, 2000. **34**(2): p. 159-163.
28. Pasler, F.A., *Zahnärztliche Radiologie*. Vol. 5. Auflage. 2008, Stuttgart: Thieme.
29. Lechner, N. *Digitale Lumineszenzradiographie—Grundlagen und Funktion*. in *RöFo-Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und der bildgebenden Verfahren*. 2011.
30. Wenzel, A., *Bitewing and digital bitewing radiography for detection of caries lesions*. Journal of dental research, 2004. **83**(1): p. 72-75.
31. Fuhrmann, A., *Current practice in conventional and digital intraoral radiography: problems and solutions*. International journal of computerized dentistry, 2006. **9**(1): p. 61-68.
32. Jørgensen, P. and A. Wenzel, *Patient discomfort in bitewing examination with film and four digital receptors*. Dentomaxillofacial Radiology, 2012. **41**(4): p. 323-327.
33. Pitts, N., *Modern concepts of caries measurement*. Journal of dental research, 2004. **83**(1): p. 43-47.
34. Hintze, H., A. Wenzel, and B. Danielsen, *Behaviour of approximal carious lesions assessed by clinical examination after tooth separation and radiography: A 2.5-year longitudinal study in young adults*. Caries research, 1999. **33**(6): p. 415-422.

35. Pitts, N.B. and P. Rimmer, *An in vivo comparison of radiographic and directly assessed clinical caries status of posterior approximal surfaces in primary and permanent teeth*. Caries research, 1992. **26**(2): p. 146-152.
36. Akkaya, N., et al., *Comparing the accuracy of panoramic and intraoral radiography in the diagnosis of proximal caries*. Dentomaxillofacial Radiology, 2006. **35**(3): p. 170-174.
37. Ogawa, K., et al., *Development of a new dental panoramic radiographic system based on a tomosynthesis method*. Dentomaxillofacial Radiology, 2010. **39**(1): p. 47-53.
38. Des Plantes, B.Z., *Eine neue Methode zur Differenzierung in der Roentgenographie (Planigraphie)*. Acta Radiologica, 1932(2): p. 182-192.
39. Grant, D.G., *Tomosynthesis: a three-dimensional radiographic imaging technique*. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1972(1): p. 20-28.
40. Dobbins III, J.T. and D.J. Godfrey, *Digital x-ray tomosynthesis: current state of the art and clinical potential*. Physics in medicine & biology, 2003. **48**(19): p. R65-106.
41. Langlais, R., et al., *The cadmium telluride photon counting sensor in panoramic radiology: gray value separation and its potential application for bone density evaluation*. Oral surgery, oral medicine, oral pathology and oral radiology, 2015. **120**(5): p. 636-643.
42. Jaju, P.P. and S.P. Jaju, *Cone-beam computed tomography: time to move from ALARA to ALADA*. Imaging science in dentistry, 2015. **45**(4): p. 263-265.
43. Mozzo, P., et al., *A new volumetric CT machine for dental imaging based on the cone-beam technique: preliminary results*. European radiology, 1998. **8**(9): p. 1558-1564.
44. Hatcher, D.C., *Operational principles for cone-beam computed tomography*. The Journal of the american dental association, 2010. **141**: p. 3S-6S.
45. Pauwels, R., et al., *Technical aspects of dental CBCT: state of the art*. Dentomaxillofacial Radiology, 2015. **44**(1): p. 20140224.
46. Pauwels, R., et al., *Variability of dental cone beam CT grey values for density estimations*. The British journal of radiology, 2013. **86**(1021): p. 20120135.
47. Pauwels, R., et al., *CBCT-based bone quality assessment: are Hounsfield units applicable?* Dentomaxillofacial Radiology, 2015. **44**(1): p. 20140238.
48. Schulze, R., et al., *Artefacts in CBCT: a review*. Dentomaxillofacial Radiology, 2011. **40**(5): p. 265-273.
49. Kamburoğlu, K., et al., *Proximal caries detection accuracy using intraoral bitewing radiography, extraoral bitewing radiography and panoramic radiography*. Dentomaxillofacial Radiology, 2012. **41**(6): p. 450-459.
50. Douglass, C.W., et al., *Clinical efficacy of dental radiography in the detection of dental caries and periodontal diseases*. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, 1986. **62**(3): p. 330-339.
51. Berry Jr, H.M., *Cervical burnout and Mach band: two shadows of doubt in radiologic interpretation of carious lesions*. Journal of the American Dental Association (1939), 1983. **106**(5): p. 622-625.
52. Mach, E., *Über die Wirkung der räumlichen Vertheilung des Lichtreizes auf die Netzhaut: vorgelegt in der Sitzung am 3. October 1865*. 1865: K. k. Hof-und Staatsdruckerei.
53. Welander, U., et al., *Basic technical properties of a system for direct acquisition of digital intraoral radiographs*. Oral surgery, oral medicine, oral pathology, 1993. **75**(4): p. 506-516.

54. Pauwels, R., et al., *Comparison of spatial and contrast resolution for cone-beam computed tomography scanners*. Oral surgery, oral medicine, oral pathology and oral radiology, 2012. **114**(1): p. 127-135.
55. Hassan, B., et al., *Comparison of five cone beam computed tomography systems for the detection of vertical root fractures*. Journal of endodontics, 2010. **36**(1): p. 126-129.
56. Sirona Dental Systems GmbH. *Orthophos SL 2D / Orthophos SL 2D Ceph, Orthophos SL 3D / Orthophos SL 3D Ceph* 2020 [cited 16.11.2021; Available from: <https://www.dentsplysirona.com/en/service-contact/download-center/active-ifu-asset-detail-page.html/content/dam/master/product-procedure-brand-categories/imaging/product-categories/extraoral-imaging/3d-imaging-/ifu/IMG-IFU-Orthophos-SL-2D-SL-3D-SL-2D-Ceph-SL-3D-Ceph-DE-6468453-2020-03-09.pdf>].
57. Codari, M., et al., *Quantitative evaluation of metal artifacts using different CBCT devices, high-density materials and field of views*. Clinical oral implants research, 2017. **28**(12): p. 1509-1514.
58. Kamburoğlu, K., et al., *Assessment of buccal marginal alveolar peri-implant and periodontal defects using a cone beam CT system with and without the application of metal artefact reduction mode*. Dentomaxillofacial Radiology, 2013. **42**(8): p. 20130176.
59. Asma'a, A., et al., *Validity of linear measurements of the jaws using ultralow-dose MDCT and the iterative techniques of ASIR and MBIR*. International journal of computer assisted radiology and surgery, 2016. **11**(10): p. 1791-1801.
60. Widmann, G. and A. Asma'a, *Ultralow Dose MSCT Imaging in Dental Implantology*. The open dentistry journal, 2018. **12**: p. 87.
61. Nekolla, E., et al., *Häufigkeit und Dosis diagnostischer und interventioneller Röntgenanwendungen*. Der Radiologe, 2017. **57**(7): p. 555-562.
62. Bundesministerium für Umwelt, N.u.R. *Richtlinie Fachkunde und Kenntnisse im Strahlenschutz bei dem Betrieb von Röntgeneinrichtungen in der Medizin oder Zahnmedizin*. 2005 [cited 01.09.2022; Available from: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/fachkunde_roev-medizin_komp_bf.pdf].
63. Palomo, J.M., P.S. Rao, and M.G. Hans, *Influence of CBCT exposure conditions on radiation dose*. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 2008. **105**(6): p. 773-782.
64. Ludlow, J., et al., *Effective dose of dental CBCT—a meta analysis of published data and additional data for nine CBCT units*. Dentomaxillofacial Radiology, 2015. **44**(1): p. 20140197.
65. Marcu, M., et al., *Estimation of the radiation dose for pediatric CBCT indications: a prospective study on ProMax3D*. International journal of paediatric dentistry, 2018. **28**(3): p. 300-309.
66. Hidalgo, A., et al., *Effectiveness of thyroid gland shielding in dental CBCT using a paediatric anthropomorphic phantom*. Dentomaxillofacial Radiology, 2015. **44**(3): p. 20140285.
67. Smith-Bindman, R., et al., *Radiation dose associated with common computed tomography examinations and the associated lifetime attributable risk of cancer*. Archives of internal medicine, 2009. **169**(22): p. 2078-2086.
68. Ludlow, J., *A manufacturer's role in reducing the dose of cone beam computed tomography examinations: effect of beam filtration*. Dentomaxillofacial Radiology, 2011. **40**(2): p. 115-122.
69. Fachgesellschaften, A.d.W.M. *s2k-Leitlinie Dentale digitale Volumentomographie Version Nr. 3.0*. AWMF-Register-Nummer: 083–005 Dezember 2022 [cited 05.03.2024; Available from:

70. Frencken, J.E., et al., *Global epidemiology of dental caries and severe periodontitis—a comprehensive review*. Journal of Clinical Periodontology, 2017. **44**: p. S94-S105.
71. Casamassimo, P.S., *Radiographic considerations for special patients-modifications, adjuncts, and alternatives*. Ped Dent, 1981. **3**(2): p. 448-54.
72. Haiter-Neto, F., A. Wenzel, and E. Gotfredsen, *Diagnostic accuracy of cone beam computed tomography scans compared with intraoral image modalities for detection of caries lesions*. Dentomaxillofacial Radiology, 2008. **37**(1): p. 18-22.
73. Wenzel, A., F. Haiter-Neto, and E. Gotfredsen, *Influence of spatial resolution and bit depth on detection of small caries lesions with digital receptors*. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 2007. **103**(3): p. 418-422.
74. Flint, D.J., et al., *A diagnostic comparison of panoramic and intraoral radiographs*. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 1998. **85**(6): p. 731-735.
75. Terry, G.L., et al., *A clinical comparison of extraoral panoramic and intraoral radiographic modalities for detecting proximal caries and visualizing open posterior interproximal contacts*. Dentomaxillofacial Radiology, 2016. **45**(4): p. 20150159.
76. Mago, J., et al., *Dosimetry and diagnostic accuracy of intraoral and extraoral bitewings in detecting approximal caries* Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology, 2019. **128**(4): p. e153-e154.
77. Ziegler, C.M., et al., *Digital tomosynthesis—experiences with a new imaging device for the dental field*. Clinical oral investigations, 2003. **7**(1): p. 41-45.
78. Abdinian, M., et al., *Accuracy of digital bitewing radiography versus different views of digital panoramic radiography for detection of proximal caries*. Journal of Dentistry (Tehran, Iran), 2015. **12**(4): p. 290.
79. Abu El-Ela, W.H., M.M. Farid, and M.S.E.-D. Mostafa, *Intraoral versus extraoral bitewing radiography in detection of enamel proximal caries: an ex vivo study*. Dentomaxillofacial Radiology, 2016. **45**(4): p. 20150326.
80. Hellén-Halme, K. and M. Nilsson, *The effects on absorbed dose distribution in intraoral X-ray imaging when using tube voltages of 60 and 70 kV for bitewing imaging*. Journal of oral & maxillofacial research, 2013. **4**(3): p. e2.
81. Hellén-Halme, K., *Effect of two X-ray tube voltages on detection of approximal caries in digital radiographs. An in vitro study*. Clinical oral investigations, 2011. **15**(2): p. 209-213.
82. Dehghani, M., et al., *Diagnostic value of conventional and digital radiography for detection of cavitated and non-cavitated proximal caries*. Journal of Dentistry (Tehran, Iran), 2017. **14**(1): p. 21.
83. Akdeniz, B.G., H.-G. Gröndahl, and B. Magnusson, *Accuracy of proximal caries depth measurements: comparison between limited cone beam computed tomography, storage phosphor and film radiography*. Caries research, 2006. **40**(3): p. 202-207.
84. Cheng, J.-G., et al., *Detection accuracy of proximal caries by phosphor plate and cone-beam computerized tomography images scanned with different resolutions*. Clinical oral investigations, 2012. **16**(4): p. 1015-1021.

85. Internationale Strahlenschutzkommission. *Die Empfehlungen der Internationalen Strahlenschutzkommission (ICRP) von 2007*. 2007 [cited 20.10.2021; Available from: https://www.icrp.org/docs/P103_German.pdf].
86. Kamburoğlu, K., et al., *Occlusal caries detection by using a cone-beam CT with different voxel resolutions and a digital intraoral sensor*. Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology, Oral Radiology, and Endodontology, 2010. **109**(5): p. e63-e69.
87. Qu, X., et al., *Detection accuracy of in vitro approximal caries by cone beam computed tomography images*. European journal of radiology, 2011. **79**(2): p. e24-e27.
88. Park, Y.-S., et al., *Current status of dental caries diagnosis using cone beam computed tomography*. Imaging science in dentistry, 2011. **41**(2): p. 43-51.
89. Tyndall, D.A. and S. Rathore, *Cone-beam CT diagnostic applications: caries, periodontal bone assessment, and endodontic applications*. Dental Clinics of North America, 2008. **52**(4): p. 825-841.
90. Mjör, I.A., R. Webber, and R. Horton, *Computerized tomosynthetic radiography in operative dentistry*. Quintessence International, 1997. **28**(2): p. 99-103.
91. Jeon, K.J., et al., *Application of panoramic radiography with a multilayer imaging program for detecting proximal caries: a preliminary clinical study*. Dentomaxillofacial Radiology, 2020. **49**: p. 20190467.
92. Rahmel, S. and R.K. Schulze, *Accuracy in detecting artificial root resorption in panoramic radiography versus tomosynthetic panoramic radiographs*. Journal of endodontics, 2019. **45**(5): p. 634-639. e2.
93. Boca, C., et al., *Comparison of micro-CT imaging and histology for approximal caries detection*. Scientific reports, 2017. **7**(1): p. 1-9.
94. Oliveira, L.B., et al., *Validity of micro-CT for in vitro caries detection: a systematic review and meta-analysis*. Dentomaxillofacial Radiology, 2020. **49**(7): p. 20190347.
95. Özkan, G., et al., *Validation of micro-computed tomography for occlusal caries detection: an in vitro study*. Brazilian oral research, 2015. **29**: p. 01-07.
96. Swain, M.V. and J. Xue, *State of the art of Micro-CT applications in dental research*. International journal of oral science, 2009. **1**(4): p. 177-188.

6 Anhang

Fragebogen (Ausgangssituation)

1. Wieviele Jahre Berufserfahrung haben Sie? _____ Jahre.
2. Haben Sie eine Fachzahnarztausbildung? ☐ Fachzahnarzt Oralchirurgie ☐ Fachzahnarzt Kieferorthopädie, ☐ noch nicht abgeschlossen
3. Haben Sie eine Fachkunde für DVT? ☐ ja ☐ nein ☐ noch nicht abgeschlossen: _____
4. Wie führen Sie aktuell die Kariesdiagnostik durch (Mehrfachnennungen möglich)?
☐ Speicherfolie
☐ Digitaler Sensor
☐ Analog (Film-basiert)
☐ OPTG
☐ Sonstiges: _____
5. Welche Art von Röntgenbild nutzen Sie bevorzugt zur Kariesdiagnostik? _____

Bitte beurteilen Sie:

- 6a. Ihre Erfahrung in der Kariesdiagnostik sehr hoch ☐—☐—☐—☐—☐ sehr gering
- 6b. Ihre Kenntnisse in der Kariesdiagnostik sehr gering ☐—☐—☐—☐—☐ sehr hoch

Bitte beurteilen Sie, wie sinnvoll Ihnen zusätzliche 3D-Scroll Modi für die Kariesdiagnostik erscheinen:

- 7a. Kariesdiagnostik (allgemein) sinnvoll ☐—☐—☐—☐—☐ wenig sinnvoll
- 7b. Bei Engständen: sehr gering ☐—☐—☐—☐—☐ sehr sinnvoll
- 7c. Bei geringer Qualifikation des Personals" sehr sinnvoll ☐—☐—☐—☐—☐ wenig sinnvoll

Fragebogen (nach Nutzung von BW Plus)

1. Können Sie sich vorstellen, BW Plus in der eigenen Praxis einzusetzen?

- ☐ ja
- ☐ eher ja
- ☐ eher nein
- ☐ nein

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

2. Ist BW Plus in Ihren Augen effektiver bei der Kariesdiagnostik als konventionelle 2D-Verfahren (extraorale BW1 Aufnahmen, IO)?

- ☐ ja
- ☐ eher ja
- ☐ eher nein
- ☐ nein

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

3. Sind Sie der Ansicht, dass durch BW Plus kariöse Läsionen detektiert werden, die mit konventionellen Techniken (extraorale BW1 Aufnahmen, IO, 3D) übersehen worden wären?

- ☐ eher ja
- ☐ eher nein

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

4. Sind Sie der Ansicht, dass durch BW Plus im Vergleich zu konventionellen 2D Röntgenaufnahmen weniger falsch positive kariöse Läsionen identifiziert werden (höhere Spezifität)?

- ☐ ja
- ☐ eher ja
- ☐ eher nein
- ☐ nein

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

5. Wie schätzen Sie die diagnostische Eignung von BW Plus gegenüber konventionellen 2D Röntgenbildern ein?

sehr hoch ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sehr niedrig

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

6. Welche Features von BW Plus waren bei der Kariesdiagnostik zielführend?

- ☐ Scrollen durch die Schichtbilder
- ☐ Scrollen durch die Winkelbilder
- ☐ Die Kombination aus Schicht- und Winkelbildern
- ☐ Keine der genannten

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

7. Wie hoch schätzen Sie die diagnostische Eignung von DVT Aufnahmen gegenüber konventionellen 2D Röntgenbildern zur Kariesdiagnostik ein?

sehr hoch ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sehr niedrig

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

8. Wie hoch schätzen Sie die diagnostische Eignung von DVT Aufnahmen gegenüber BW Plus zur Kariesdiagnostik ein?

sehr hoch ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ ☐ sehr niedrig

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

9. Gibt es bestimmte Indikationen, für welche BW Plus konventionellen Röntgenaufnahmen bei der Kariesdiagnostik überlegen ist?

- ☐ BW Plus ist grundsätzlich vorteilhaft
- ☐ bei Engständen
- ☐ bei engen Approximalkontakten
- ☐ bei ausgeprägten Dreh- und Kippständen
- ☐ Sonstiges: _____

10. Welche Technik (BW io/ extraoral, BW Plus, Speicherfolie, Sensor, DVT) bevorzugen Sie zur Kariesdiagnostik?

- ☐ BW Plus
- ☐ DVT
- ☐ BW intraoral per Sensor
- ☐ BW intraoral per Speicherfolie
- ☐ BW extraoral konventionell
- ☐ Sonstiges: _____

Wie begründen Sie Ihre Entscheidung?

11. Welche Anregungen, Bemerkungen und Kommentare haben Sie zu den unterschiedlichen Verfahren zur Kariesdiagnostik?

Danksagung

Diese Studie wurde in der Poliklinik für Kieferorthopädie des Universitätsklinikums Düsseldorf in Zusammenarbeit mit der Poliklinik für zahnärztliche Chirurgie und Aufnahme angefertigt. Ich möchte mich bei allen herzlich bedanken, die mir bei der Durchführung und Anfertigung dieser Dissertation behilflich waren.

Hiermit möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dieter Drescher bedanken, der mir die Möglichkeit gegeben hat, die Arbeit unter seiner Leitung durchzuführen.

Besonders danke ich Frau Prof. Dr. Kathrin Becker für ihre Betreuung. Ihr Engagement und ihre stetige Unterstützung, die ich erfahren durfte, waren mir eine wesentliche Hilfe bei der Erstellung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr. Jürgen Becker gilt mein Dank für seine Unterstützung und Ideengebung zur Zahntransplantation sowie der Ermöglichung der Studientage mit der gesamten chirurgischen Abteilung.

Ich danke Dr. Christian Claus, dass er mit mir zusammen die Zahntransplantationen durchführte. Frau Dr. Beryl Schwarz-Herzke danke ich, dass sie die Bereitstellung der humanen Kopfpräparate ermöglichte.

Mein besonders herzlicher Dank gilt außerdem meiner Familie und meinem Freund, die mich stets unterstützt haben und auf deren Rückhalt ich mich jederzeit verlassen konnte. Danke für eure Motivation, die mir hilft, meine Ziele zu erreichen!