

Aus der Poliklinik für Zahnärztliche Prothetik und Werkstoffkunde
der Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Visuelle Fixationen und Betrachtungsmuster von Bissflügelaufnahmen
– eine Eye-Tracking Studie

D i s s e r t a t i o n

zur Erlangung des Doktorgrades der

Zahnmedizin

der Universitätsmedizin

der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Stefanie Valentina Weikl

aus Frankfurt am Main

Mainz, 2025

Wissenschaftlicher Vorstand:

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 17.04.2026

In C-1.0 (Urheberrechtsschutz)

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	II
Tabellenverzeichnis.....	IV
1 Einleitung und Ziel der Dissertation.....	1
2 Literaturdiskussion.....	3
2.1 Die Bissflügelaufnahme.....	3
2.2 Darstellung von Pathologien auf Röntgenbildern.....	6
2.3 Radiologische Ausbildung der Studierenden.....	8
2.4 Eye-Tracking.....	10
2.4.1 Entwicklung des Eye-Tracking.....	10
2.4.2 Grundlagen der visuellen Wahrnehmung (Wichtige Begriffe des Eye-Tracking).....	11
2.4.3 Technik des Eye-Tracking.....	13
2.4.4 Anwendungsgebiete des Eye-Tracking.....	16
2.5 Aktueller Forschungsstand.....	19
2.6 Ziel der Studie.....	21
3 Material und Methoden.....	22
3.1 Probandenkollektiv.....	22
3.2 Bissflügelaufnahmen.....	22
3.3 Eye-Tracking System.....	23
3.4 Software.....	25
3.5 Räumlichkeiten.....	26
3.6 Versuchsablauf.....	27
3.7 Datenexport und Erhebung der Verdachtsdiagnosen.....	28
3.8 Parameter.....	30
3.9 Statistische Analyse.....	31
4 Ergebnisse.....	33

4.1	Zeitliche Betrachtung.....	33
4.2	Betrachtungsmuster	39
4.3	Aufstellung der Verdachtsdiagnose.....	45
5	Diskussion	48
6	Zusammenfassung	61
	Ziel	61
	Material und Methoden	61
	Ergebnisse.....	61
	Schlussfolgerung.....	61
7	Literaturverzeichnis	63
8	Danksagung	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9	Tabellarischer Lebenslauf	Fehler! Textmarke nicht definiert.

Abkürzungsverzeichnis

mSv	Millisievert
PSA	Panoramaschichtaufnahme
AOI	Areas of Interest
M	Mittelwert
SD	Standardabweichung
Md	Median
Min	Minimum
Max	Maximum
p	Signifikanz
r	Pearson-Korrelationskoeffizient
ANOVA	Analysis of Variance
s	Sekunden
Abb.	Abbildung
CT	Computertomographie

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Haltesystem der Bissflügelaufnahme [modifiziert aus (11)]

Abb. 2: Röntgenaufnahme des Oberkieferfrontzahnbereichs, Burn-Out Effekt rot eingekreist [modifiziert aus (4)]

Abb. 3: Bissflügelaufnahme

Abb. 4: Bright pupil Methode [modifiziert aus (32)]

Abb. 5: Dark pupil Methode [modifiziert aus (32)]

Abb. 6: Aufgezeichnetes Bild eines Eye-Trackers, Korneale Reflexion rot eingekreist [modifiziert aus (24)]

Abb. 7: Darstellung der Kameraaufnahme des Auges bei verschiedenen Blickrichtungen des Betrachtenden [modifiziert aus (33)]

Abb. 8: Versuchsaufbau: Computer mit Bildschirm und montiertes Eye-Tracking Gerät, Kinnstütze in 60cm Entfernung

Abb. 9: Darstellung der Augenaufnahme mit der Bright-pupil Methode

Abb. 10: Kalibrierungsvorgang mit Referenz- und Blickpunkten

Abb. 11: Bissflügelaufnahme Nr. 6 mit markierten AOIs

Abb. 12: Beispielbild Scanpath

Abb. 13: Beispielbild Heat Map

Abb. 14: Betrachtungszeit insgesamt (s) der Gruppen

Abb. 15: Anzahl der Oktanten in Abhängigkeit zur Betrachtungszeit

Abb. 16: Erreichter Diagnose-Score in Abhängigkeit zum Mittelwert der Betrachtungszeit pro Probanden (s)

Abb. 17: Betrachtungszeit insgesamt (s) der Geschlechter

Abb. 18: Anzahl der Fixierungen innerhalb einer AOI der Gruppen

Abb. 19: Häufigkeiten der betrachteten Oktanten

Abb. 20: Häufigkeit der betrachteten Oktanten (in Prozent) beider Gruppen

Abb. 21: Anzahl der betrachteten Oktanten (in Prozent) beider Geschlechter

Abb. 22A & B: Heat Map und Scanpath eines Zahnarztes

Abb. 23A & B: Heat Map und Scanpath eines Studierenden

Abb. 24A & B: Heat Map Vergleich Zahnärzte und Studierende

Abb. 25A & B: Heat Map Vergleich Zahnärzte und Studierende

Abb. 26A & B: Heat Map Vergleich Zahnärzte und Studierende

Abb. 27: Erreichter Diagnose-Score der Gruppen

Abb. 28: Häufigkeit (in Prozent) der korrekt erkannten Pathologien

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichung für die zeitlichen Parameter

Tabelle 2: Häufigkeit der betrachteten Oktanten beider Gruppen

Tabelle 3: Häufigkeiten der korrekt erkannten Pathologien

1 Einleitung und Ziel der Dissertation

Das Röntgen ist ein weit verbreitetes medizinisches Verfahren, um Strukturen des Körpers, wie z.B. Organe, Knochen und Gefäße, bildlich darzustellen. Anhand von radioaktiver Strahlung können Pathologien im Körperinneren sichtbar gemacht werden, die mit bloßem Auge nicht zu erkennen sind (1). Nach einer aktuellen Schätzung des Bundesamtes für Strahlenschutz wurden in Deutschland im Jahr 2018 ca. 130 Mio. radiologische Untersuchungen durchgeführt. Dabei macht der größte Anteil von etwa 40% die zahnmedizinischen Röntgenuntersuchungen aus (2). Die Strahlenbelastung der Röntgenaufnahmen in der Zahnmedizin ist im Vergleich zur Häufigkeit jedoch relativ gering.

Die Aufnahme von Röntgenbildern ist in der Zahnmedizin ein Standardverfahren, um Pathologien an Zähnen und ihrer Umgebung zu diagnostizieren. Die Bissflügelaufnahme, auch als Bite Wing bekannt, ist eine häufig in der Zahnmedizin genutzte Bildgebung, weil sie ein nützliches diagnostisches Werkzeug darstellt. Sie bietet eine Betrachtung der approximalen Zahnräume, die bei einer klinischen Untersuchung schlecht inspiziert werden können. Ohne diese Röntgenaufnahmen bleiben approximale kariöse Läsionen oft unentdeckt und können sich unbehindert vergrößern, bis sie schließlich das innere Gewebe des Zahnes erreichen und ihn vollständig bakteriell befallen. Folglich kann dies eine konservative Therapie des Zahnes (Füllung oder Wurzelkanalbehandlung) erforderlich machen und es kann ggf. zu einem frühen Zahnverlust für den Patienten kommen, der durch eine sorgfältige prophylaktische Röntgenbildgebung verhindert werden kann. Des Weiteren werden Bissflügelaufnahmen für die Parodontitis Diagnostik verwendet, damit das Knochenniveau und möglicher Knochenabbau beurteilt werden kann. Die American Dental Association empfiehlt bei gesunden Kindern jedes Jahr eine Röntgenkontrolle, bei Erwachsenen kann das Intervall, abhängig von dem individuellen Kariesrisiko, zwei bis drei Jahre erhöht werden (3).

Aus diesem Grund sind die frühzeitige Erkennung und Behandlung von Karies eine der wichtigsten Aufgaben der behandelnden Zahnärzte (4). Anders als humanmedizinische Fachärzte sind Zahnärzte nicht nur Indikationssteller für Röntgenaufnahmen, sondern auch diejenigen, die das Röntgenbild befunden, die Diagnose stellen und die nachfolgenden Behandlungen durchführen (5).

Die Interpretation von Röntgenaufnahmen ist jedoch ein schwieriger und fehleranfälliger Prozess, auch für erfahrene Zahnärzte (6). Diese Fehler können erhebliche Konsequenzen für Patienten bedeuten, sodass es entscheidend ist, schon zu Beginn der zahnmedizinischen Ausbildung Anomalien richtig erkennen zu können (7). Trotzdem ist es bisher unklar, wie Studierende Bissflügelaufnahmen betrachten und auswerten, welches die Problemstellung der Analyse darstellt.

Ziel dieser Promotion ist es, die visuelle Fixation und Betrachtungsmuster von den Probanden beim Inspizieren von Bissflügelaufnahmen zu analysieren und ihre daraufhin gestellten Diagnosen zu überprüfen.

Die Probanden bestehen aus 2 Kohorten ($n = 35$), insgesamt 13 Zahnärzte und 22 Studierenden der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der Universitätsmedizin Mainz. Somit kann ein Vergleich zwischen Zahnärzten, die bereits über Erfahrung in der Röntgendiagnose verfügen, und Studierenden, die sich noch in der Ausbildung befinden, gezogen werden. Jedem Probanden werden nacheinander 15 Bissflügelaufnahmen gezeigt und anschließend um die Aufstellung einer Diagnose gebeten. Dabei werden die Blickpfade der Probanden mithilfe eines Eye-Trackers (EAS Monocular, LC Technologies, Inc., Fairfax, Virginia, USA) aufgezeichnet. Die vom Eye-Tracking System erfassten Daten werden anschließend statistisch ausgewertet.

Es soll sowohl eruiert werden, welche Bildareale besonders fixiert werden und somit zur Aufstellung der Diagnose beitragen als auch mögliche Unterschiede zwischen den Blickwegen der beiden Probandengruppen und deren Einfluss auf die Diagnose bestimmt werden.

Die **erste Nullhypothese** ist, dass es keine Unterschiede von Fixationen und Betrachtungsdauer beim Betrachten von Pathologien und gesunden Zähnen zwischen den Probandengruppen gibt.

Die **zweite Nullhypothese** ist, dass es keine Unterschiede der Betrachtungsmuster (d.h. die Herangehensweise der Betrachtung) zwischen den Probandenkohorten gibt.

2 Literaturdiskussion

2.1 Die Bissflügelaufnahme

Bissflügelaufnahmen sind der derzeitige Goldstandard für die bildgebende Kariesdiagnostik (8). Sie gehören zu den zweidimensionalen Röntgenaufnahmen, die Objekte in der Mundhöhle durch Überlagerungen auf zweidimensionale Bilder darstellen.

Anders als bei intraoralen Einzelzahnaufnahmen können bei der Bissflügelaufnahme obere und untere Zahnkronen gleichzeitig erfasst und mesiale sowie distale Zahnflächen begutachtet werden. Ursache dafür ist, dass ein entsprechendes Haltesystem mit einem Aufbissbalken zum Einsatz kommt, auf den der Patient in dem Moment der Aufnahme aufbeißt, sodass der Halter zwischen den Okklusionsflächen der oberen und unteren Seitenzähne befestigt wird. Bildempfänger in Form von Speicherfolien oder Sensoren werden dabei oral an die Innenseite der Zähne angelegt und mit dem Haltesystem fixiert (Abb. 1). Der Röntgentubus wird von außen möglichst senkrecht auf die Bildempfängerebene gerichtet.

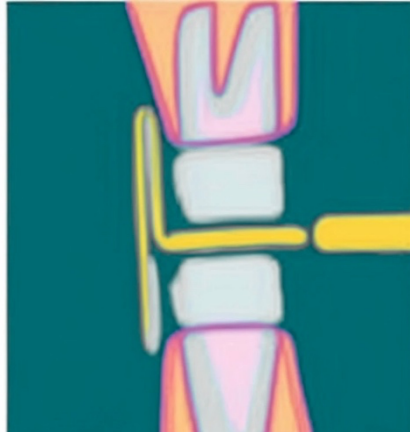


Abbildung 1: Haltesystem der Bissflügelaufnahme [modifiziert aus (11)]

Ein großer Vorteil der Bissflügelaufnahme ist die hohe Ortsauflösung, die eine sehr detailreiche Aufnahme ermöglicht. Deshalb können kariöse Läsionen insbesondere im Approximalraum, aber auch an Restaurationsrändern sowie tiefe Fissuren detektiert werden (8, 9). Diese Regionen sind in der klinischen Untersuchung schwer einsehbar, sodass diese Art der Aufnahme häufig eingesetzt wird. Allerdings ist zu beachten, dass aufgrund des Strahlenwinkels und der röntgenopaken Schmelzschicht besonders initiale Kariesläsionen, die okklusal liegen, nicht gut auf Bissflügelaufnahmen detektiert werden können, was einen Nachteil der Bissflügelaufnahme darstellt. Tiefere

Läsionen, die bereits das Dentin erreicht haben, besitzen entsprechend eine höhere Genauigkeit in der radiologischen Karieserkennung (10). Weitere Indikationen sind die Darstellung von Zahnstein, Restaurationen und Implantaten sowie des Knochenniveaus zur Beurteilung von möglichen Erkrankungen des Zahnhalteapparats.

Eine weitere zweidimensionale Röntgenaufnahme ist die Panoramaschichtaufnahme, die eine Übersichtsaufnahme darstellt und neben der Zahnreihen auch die Kiefer sowie Kiefergelenke und Kieferhöhlen abbildet. Zwar ist das Untersuchungsgebiet der Panoramaschichtaufnahme aufgrund ihrer Aufnahmegröße umfassender (5), jedoch ist auch die effektive Dosis an Röntgenstrahlung höher. Dies ist ein weiterer Vorteil, der sich aus der Bissflügelaufnahme ergibt. Während ein intraorales Kleinbildröntgen, wie die Bissflügelaufnahme, eine mittlere Effektivdosis von ca. 0,003 mSv (Millisievert) pro Aufnahme verursacht, liegt die Dosis bei einer Panoramaschichtaufnahme ca. 13-fach höher (12). Zur Einordnung dieser Werte sei erwähnt, dass die jährliche Effektivdosis durch natürliche Strahlenexposition für eine Einzelperson in Deutschland durchschnittlich 2,1 mSv pro Jahr beträgt (13). Die Strahlenexposition durch kosmische Strahlung bei einem Flug von Wien nach New York beträgt etwa 0,04 mSv, was ungefähr der Effektivdosis einer Panoramaschichtaufnahme entspricht (14).

Aufgrund der zweidimensionalen Aufnahme projizieren sich plastische Gewebestrukturen übereinander. Folglich erscheinen strahlendurchlässigere Weichgewebsstrukturen, die auf dichten, strahlenabsorbierenden Knochen projiziert werden, opaker und heller, da die Röntgenstrahlung stärker abgeschwächt wird. Umgekehrt kann dichter Knochen bei Überlagerung mit lufthaltigem Gewebe dunkler und durchlässiger aussehen, da die Strahlung weniger abgeschwächt wird. Dieses Phänomen wird als Summationseffekt bezeichnet und gilt als nachteilig, da es zu falschen Schlussfolgerungen bei der Befundung führen kann. Ein Summationseffekt im Bereich des zervikalen Zahnhalses ist der sogenannte Burn-Out Effekt. Dabei erscheint das Dentin und der Zahnzement im Interdentalraum verschattet, da der knöcherne Alveolarfortsatz und die dichte Schmelzschicht die Röntgenstrahlen stark abschwächen, während der nur von Gingiva überdeckte Zahnhsal im Vergleich kaum Strahlung absorbiert. Diese Schwärzung in der Zahnhsalregion kann Karies täuschend ähnlich sehen und muss bei der Befundung unbedingt in Betracht gezogen werden (Abb. 2) (4).



Abbildung 2: Röntgenaufnahme des Oberkieferfrontzahnbereichs, Burn-Out Effekt rot eingekreist [modifiziert aus (4)]

Wie in der Bissflügelaufnahme in Abbildung 3 zu sehen, ist am Zahn 16 ein kleiner Burn-Out Effekt mesial am Zahnhsal erkennbar. Dieser ist jedoch vom darüber liegenden dunklen Bereich im Zahnschmelz, der eine initiale Kariesläsion darstellt, zu unterscheiden.

Eine Bissflügelaufnahme zeigt bei korrekter Aufnahmetechnik den Kronen- und Zahnhsalbereich der Ober- und Unterkieferseitenzähne einer Gesichtshälfte. Um eine umfangreiche Darstellung zu gewährleisten, sollten mindestens die beiden Prämolaren sowie der erste und zweite Molar enthalten sein. Wird der rechte Kiefer aufgenommen, so liegen die Molaren am linken Bildrand der Bissflügelaufnahme, umgekehrt liegen die Molaren des linken Kiefers am rechten Bildrand. In Abbildung 3 ist eine Bissflügelaufnahme der rechten Gesichtshälfte dargestellt.

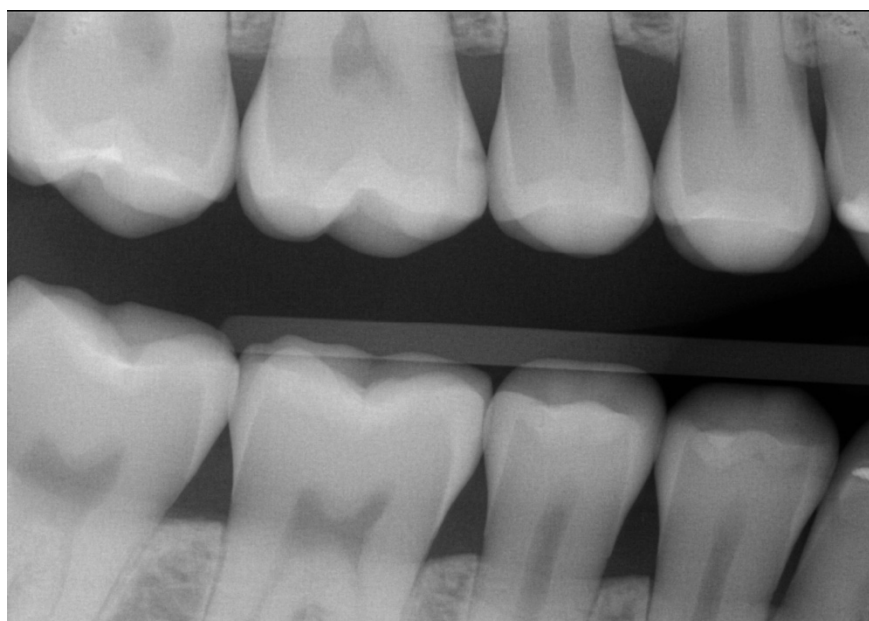


Abbildung 3: Bissflügelaufnahme

2.2 Darstellung von Pathologien auf Röntgenbildern

Das Röntgenbild ist ein Schattenbild bzw. ein Negativbild bei dem die Grauwerte umgekehrt sind. Die Bildentstehung unterscheidet sich grundlegend von der uns bekannten Entstehung von Bildern durch das sichtbare Licht.

Während bei einem Foto Gegenstände sichtbar gemacht werden, indem sichtbares Sonnenlicht auf ein Objekt trifft und reflektiert wird, durchdringen bei einem Röntgenbild energiereiche Röntgenstrahlen ein Objekt. Der Bildempfänger, der sich hinter dem zu untersuchenden Objekt befindet, misst die nach dem Passieren verbliebende Strahlung. Bei den früher verwendeten Röntgenfilmen wurden die enthaltenen Silberbromidkristalle durch die Röntgenstrahlung geschwärzt. Heute werden für das digitale Röntgen Sensoren verwendet, die die Intensität der Strahlung messen und die Belichtungsinformationen an den Computer weitergeben, der ein digitales Röntgenbild erzeugt (4).

Wenn Röntgenstrahlung den Körper durchdringt, wird diese unterschiedlich stark absorbiert. Dichtes Gewebe wie Knochen oder Zahnhartsubstanz absorbiert und streut die Strahlung, sodass diese nur abgeschwächt auf den Bildempfänger trifft. Folglich bleibt das Röntgenbild an diesen Stellen weiß. Umgebungsluft oder der hohe Wasseranteil im Bindegewebe können wiederum kaum energiereiche Strahlung absorbieren, sodass die Röntgenstrahlung ungehindert den Bildempfänger erreicht und das Bild schwärzt. Das Ergebnis ist ein Schwarz-Weiß-Bild mit vielen Graustufen aufgrund der unterschiedlichen Dichten der durchdrungenen Gewebe (15).

Karies ist die häufigste Erkrankung, die zur Zerstörung der Zahnhartsubstanz führen kann. Sie entsteht, wenn Mikroorganismen wie Bakterien, die in der Mundhöhle natürlich vorkommen, niedermolekulare Kohlenhydrate verstoffwechseln. Dabei bilden die Bakterien Säuren, die die Mineralien aus dem Zahnschmelz herauslösen und ihn somit demineralisieren. Die Demineralisierung beginnt zunächst an der Schmelzoberfläche (Schmelzkaries) und breitet sich nach dem Durchbrechen der Schmelz-Dentin-Grenze unterminierend im Dentin bis zum Zahnnerv (Pulpa) aus (Dentinkaries) (16). Insbesondere der Approximalraum zwischen zwei benachbarten Zähnen ist eine Prädilektionsstelle für Karies, da die Zugänglichkeit für die Reinigung erschwert ist (15). Aufgrund des Mineralverlustes in der Zahnhartsubstanz werden die

Röntgenstrahlen weniger stark absorbiert und schwärzen an diesen Stellen die Röntgenaufnahme, sodass ein dunkler Fleck entsteht.

Wenn nach einer Füllungstherapie der Randschluss der Füllung insuffizient ist und Mikroorganismen erneut in einen offenen Spalt eindringen können, entsteht Sekundärkaries (15). Röntgenologisch ist die Sekundärkaries als dunkler Schatten um das röntgenopake, dicht weiße Füllungsmaterial erkennbar.

Wird die Plaque aus Bakterien und Substrat durch den Speichel wieder mineralisiert, entsteht Zahnstein. Dieser kann sowohl supragingival, d.h. oberhalb des Zahnfleisches, als auch subgingival, d.h. unterhalb des Zahnfleisches liegen. Die mineralisierten Konkreme absorbieren wiederum ähnlich wie die Zahnhartsubstanz die Röntgenstrahlung, sodass das Röntgenbild an diesen Stellen weißlich erscheint.

Das Knochenniveau ist ein weiterer Aspekt, der anhand von Röntgenbildern untersucht werden kann. Zu einem gesunden Zahnhalteapparat gehört ein Knochenniveau nahe der Schmelz-Zement-Grenze, sodass die Zähne fest über kollagene Fasern im Knochen verankert sind. Mit zunehmendem Alter bildet sich der Knochen zurück, was einem horizontalen Knochenverlust entspricht. Dieses gleichmäßig abgesenkte Knochenniveau ist auf dem Röntgenbild zu erkennen, da die dichte äußere Knochenschicht (Kompakta) unter der Schmelz-Zement-Grenze liegt. Der vertikale Knochenverlust ist hingegen ein Zeichen für eine lokale Parodontitis, die einen oder mehrere benachbarte Zähne angreift. Dabei aktivieren Bakterien eine überschießende Abwehrreaktion des Körpers, die über Entzündungsprozesse zum Abbau des Knochens führt (16). Das Ergebnis ist eine vertikale Knochentasche, die aufgrund der fehlenden Absorption auf dem Röntgenbild dunkler erscheint (15).

Darüber hinaus können auch überstehende Kronen- und Füllungsrän der zu Problemen führen. Sie können das Parodont reizen und zu Schmerzen führen, aber auch neue Schmutznischen bilden, in denen sich Bakterien und Essensreste sammeln (17). Metallische Kronen oder röntgenopake Füllungsmaterialien absorbieren viel Röntgenstrahlung, sodass sie folglich weiß und gut sichtbar auf den Aufnahmen zu sehen sind.

2.3 Radiologische Ausbildung der Studierenden

Im Laufe des zahnärztlichen Studiums wird den Studierenden die Sachkunde im Strahlenschutz vermittelt und sie erwerben mit der Staatsexamensprüfung die zahnärztliche Fachkunde im Strahlenschutz.

Der Erwerb der Fachkunde hat den Schutz der Allgemeinheit vor Röntgenstrahlung zum Ziel. Laut § 47 der Strahlenschutzverordnung (StrlSchV) müssen Personen, die Röntgenstrahlung für Untersuchungen am Menschen verwenden, über die technischen Grundlagen, die Vermeidung unnötiger Strahlenbelastung und die Anwendung von Strahlenschutzmaßnahmen geschult werden. In Kursen mit praktischen Übungen soll dieses erforderliche Wissen vermittelt werden.

Im Folgenden werden die röntgenologischen Kurse und theoretischen Vorlesungen für Zahnmedizinstudierende an der Johannes-Gutenberg-Universität dargestellt.

Im 1. Klinischen Semester (6. Semester) findet die Vorlesung zum radiologischen Kurs mit besonderer Berücksichtigung des Strahlenschutzes statt und dient als Begleitveranstaltung zum praktischen Kurs. In dieser Vorlesung werden die physikalischen und technischen Grundlagen des Röntgen sowie die Projektionsgeometrie bei der Aufnahme von Intraoralaufnahmen besprochen. Weitere Lernziele der Vorlesung sind die Bildentstehung von Panoramaschichtaufnahmen, das Erlernen der Befundung von Röntgenbildern und die dreidimensionalen Röntgenaufnahmetechniken. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf dem Strahlenschutz, sodass den Studierenden Wissen über die Wirkung von ionisierender Strahlung und ihrer Folgen sowie wirksame Schutzmaßnahmen vermittelt werden. In dem radiologischen Kurs, der im gleichen Semester stattfindet, wird das Aufnehmen von Röntgenaufnahmen und die Strahlenschutzmaßnahmen praktisch am Phantom geübt. An drei Praktikumstagen erlernen die Teilnehmenden die Einstelltechniken, selbstständig Röntgenaufnahmen aufzunehmen und diese zu befunden.

Nach Abschluss des Praktikums hat jeder Studierende 20 Aufnahmen durchgeführt. Nach der Fachkundenrichtlinie zum Sachkundenerwerb vom 22. Dezember 2005 (18) müssen Zahnärzte 100 Aufnahmen durchführen. Aus diesem Grund haben die Studierenden die Möglichkeit im Laufe der restlichen klinischen Semester in der

zahnärztlichen Röntgenabteilung der Universitätsklinik Mainz Patientenaufnahmen einzustellen und zu befunden.

Darüber hinaus findet nach der Approbationsordnung für Zahnärzte aus dem Jahr 1955 im 5. klinischen Semester die klinisch röntgenologische Differenzialdiagnose Vorlesung statt. Hierbei lernen die Studierenden anhand von radiologischen Aufnahmen Krankheitsbilder zu erkennen und diese voneinander zu unterscheiden (19).

2.4 Eye-Tracking

Das Eye-Tracking ist eine Methode, mit der das Blickverhalten einer Person untersucht werden kann. Dabei zeichnet ein Eye-Tracker die Augenbewegung auf, sodass bestimmt werden kann, welche Objekte vom Betrachtenden wann und wie lange fixiert werden und in welcher Reihenfolge das Auge die Fixationen betrachtet (20). Mithilfe dieser visuellen Muster wird versucht, die kognitiven Verarbeitungsprozesse und die subjektive Wahrnehmung einer Person nachzuvollziehen (21). Somit lässt sich ermitteln, auf welche Bereiche einer Bildschirmseite sich der Betrachtende konzentriert und aufmerksam beobachtet.

2.4.1 Entwicklung des Eye-Tracking

Bereits Ende des 19. Jahrhunderts beschäftigten sich Wissenschaftler mit der Frage, wie die Augenbewegung von Menschen untersucht werden kann. Zu dieser Zeit versuchte man, psychologische Phänomene wie z.B. visuelle Illusionen mit Hilfe der Augenbewegung zu erklären. Einer der ersten Versuche, die Bewegung der Augen zu erfassen, wurde von Émile Javal 1879 unternommen (22). Er beobachtete die Augenbewegung über einen Spiegel, während seine Probanden lasen. Außerdem befestigte er ein Mikrofon an einem geschlossenen Auge und ließ das andere frei, um lesen zu können. Dabei hörte er immer ein Geräusch, wenn die Hornhaut des Auges z.B. beim Wechseln zur nächsten Zeile gegen das Mikrofon stieß. Javal beschrieb mit seinem Versuch erstmals den Begriff der Sakkade (siehe Abschnitt 2.4.2) (22).

Unvorteilhaft war jedoch, dass die Aufzeichnung der Augenbewegung nicht objektiv war, sodass E. Huey 1898 eine Art Kontaktlinse auf das Probandenaugaplatzierte, die über ein Kabel an einem Wellenschreiber verbunden war, der die Bewegung aufzeichnete. Aufgrund der starken Schmerzen musste das Auge während des Versuchs mit Kokain betäubt werden. Im gleichen Jahr entwickelte E. B. Delabarre ein ähnliches Verfahren, das jedoch auch wie das von Huey aufgrund der Augenverletzungen kritisiert wurde (23).

R. Dodge und T.S. Cline erfanden daraufhin 1901 den ersten augensicheren Eye-Tracker. Sie arbeiteten mit einem Lichtstrahl, der auf die Hornhaut des Auges projiziert wurde und dabei zurückreflektierte. Das reflektierte Licht wurde mit Hilfe eines optischen Geräts auf Fotopapier registriert. Mit ihren Versuchen konnten Sie

feststellen, dass während einer Sakkade die Aufnahme von Informationen aus der Umgebung nicht möglich ist (23).

Ein weiterer Meilenstein in der Entwicklung von Eye-Trackern war die Nutzung von Elektroden, die dicht an beiden Augen platziert wurden und die elektrischen Potentiale der Hornhaut (Cornea) und Netzhaut (Retina) aufzeichneten (23). Später bediente man sich der Kameratechnik und nahm die Augenbewegung mit einer Fernsehkamera in den 1970er Jahren auf. Dabei wurde die Position des Limbus, der Übergang zwischen der farbigen Iris und der weißen Sklera, beobachtet. Ein Nachteil dieser Methode war allerdings, dass die Iris aufgrund ihrer Größe oftmals vom Augenlid verdeckt wurde (22).

Eine noch heute verwendete Methode ist die *bright-pupil* Methode (siehe Abschnitt 2.4.3), die 1974 von Merchant entdeckt wurde. Dabei macht man sich die Tatsache zu Nutze, dass das Auge bei zentraler Lichteinstrahlung das Licht wieder zurückreflektiert, sodass die Pupille zu leuchten erscheint. Der helle Punkt kann daraufhin deutlich beobachtet werden (22).

Neben den stationären Eye-Trackern gibt es auch mobile Eye-Tracker, die auf Helme oder in Brillen integriert sind, welche erstmals 1948 von H. Hartridge entwickelt wurden (23). Diese ermöglichen eine natürliche Bewegung des Kopfes während der Aufzeichnung der Augenbewegung ohne Beeinträchtigung der Ergebnisse. Heute ist es wichtig, besonders flexible Systeme zu entwickeln, die es dem Anwender ermöglichen, den Eye-Tracker auch außerhalb der Laborumgebung einzusetzen und so noch mehr Einsatzgebiete zu erforschen (24).

2.4.2 Grundlagen der visuellen Wahrnehmung (Wichtige Begriffe des Eye-Tracking)

Vor der Erläuterung der Technik des Eye-Trackers ist es notwendig, im Folgenden die Grundlagen des scharfen Sehens und die charakteristischen Augenbewegungen darzustellen.

Das Auge, das auch als „schlechteste Kamera der Welt“ bezeichnet wird, hat viele optische Mängel (25). Im Gegensatz zum Foto einer Kamera, ist das visuelle Bild, welches das Auge generiert, nicht vollständig homogen scharf (26). Während ein Foto sowohl in der Mitte als auch an den Seiten scharf ist, ist die visuelle Wahrnehmung

des Auges nur in der Mitte scharf. Das liegt daran, dass es auf der Netzhaut nur eine Stelle des schärfsten Sehens gibt, die so genannte *Fovea centralis*, eine Vertiefung in der Netzhaut. An dieser Stelle ist die Netzhaut nur mit einem Typ von Photorezeptoren, den Zapfen, ausgestattet. Sie sind verantwortlich für das Farbsehen und aufgrund ihrer hohen Dichte in der Fovea centralis geben sie bei Belichtung eine hohe Anzahl an Informationen an das Gehirn weiter, das ein detailreiches Bild generiert (foveales Sehen). Außerhalb dieser Zone befinden sich neben den Zapfen auch Stäbchen, deren Belichtungsinformationen auf weitere Nervenzellen geschaltet und gebündelt werden, sodass die Bildinformation eine geringere Auflösung besitzt (peripheres Sehen) (27). Aus diesem Grund müssen wir, wenn wir ein Objekt betrachten, direkt darauf schauen, damit das reflektierte Licht auf die Fovea centralis trifft und wir den Gegenstand scharf sehen können. Diese Tatsache nutzt der Eye-Tracker und kann so genau bestimmen, wohin der Proband schaut (24).

Damit der Betrachtende ein Bild vollständig sehen kann, muss er mit seinen Augen immer einen neuen Punkt fokussieren. Die beiden dabei relevanten Augenbewegungen sind die Fixation und die Sakkade.

Die *Fixation* ist eine Phase während der visuellen Betrachtung, in der das Auge still zu stehen scheint. Dabei wird das fixierte Objekt vom Betrachtenden foveal angeschaut, sodass das Objekt scharf gesehen wird. Während diesem Halt der Augenbewegung werden die Bildinformationen des Auges an das Gehirn weitergeleitet, wo dann der Sinneseindruck registriert und bearbeitet wird. Das Auge steht dabei jedoch nicht völlig still, sondern versucht den Fokus durch Mikrobewegungen leicht zu verschieben, damit die Photorezeptoren bei gleichbleibendem Lichtreiz nicht adaptieren und keine Information mehr an das Gehirn weiterleiten. Bei diesen Mikrobewegungen handelt es sich beispielsweise um ein leichtes Zittern des Auges (Tremor) oder schnelle Mikrosakkaden und Driftbewegungen (28).

Nach einer beendeten Fixation folgt eine *Sakkade* mit dem Ziel, das Auge schnell auf einen neuen Fixationspunkt zu richten. Diese Sprünge können unwillkürlich bei plötzlichen Veränderungen oder bewusst z.B. beim Zeilenwechsel während des Lesens auftreten. Während dieser schnellen Augenbewegung werden keine Bildinformationen registriert und verarbeitet, sodass das Auge beim Überfliegen der

Umgebung „blind“ ist. Eine Sakkade dauert maximal ca. 100 Millisekunden und wird bei zunehmender Komplexität des Stimulus immer kürzer (29).

2.4.3 Technik des Eye-Tracking

Die am häufigsten verwendete Eye-Tracking Technik beruht auf einer videobasierten Aufnahme von Hornhautreflexionen. Bei der Videookulographie zeichnet eine Videokamera das Auge auf, während zusätzlich eine Lichtquelle auf das Auge scheint und so eine Reflexion auf der Hornhaut verursacht.

Zur Erzeugung von Hornhautreflexion können zwei verschiedene Arten von Lichtquellen verwendet werden. Bei der so genannten „*passive light*“ Methode wird das natürliche Licht der Umgebung verwendet. Bei der „*active light*“ Methode wiederum wird ein Infrarotlicht als künstliche Lichtquelle verwendet. Das emittierte Infrarotlicht eignet sich sehr gut als Lichtquelle, da es für das menschliche Auge unsichtbar ist und somit den Betrachtenden während des Versuches nicht stört. Für die Kamera des Eye-Trackers ist das Licht wiederum sichtbar, sodass die Lichtreflexion auf dem Auge aufgezeichnet werden kann. Zudem besteht keine gesundheitliche Gefahr für das Auge, da die verwendeten Infrarotlichtquellen in Eye-Tracker Geräten sehr schwach sind. Folglich ist die „*active light*“ Methode die Methode der Wahl (30, 31).

Wird das Auge mit Infrarotlicht bestrahlt, können zwei Arten von Reflexionen entstehen, die Pupillenreflexion und die Korneareflexion.

Die Pupillenreflexion dient dazu, die Pupillenmitte zu registrieren und kann mit zwei verschiedenen Verfahren erfasst werden. Bei der *bright-pupil* Methode liegt die Infrarotlichtquelle sehr nah an der optischen Achse der Kamera. Wenn der Lichtstrahl nun zentral auf das Auge scheint, trifft der auf die Netzhaut (Retina) und reflektiert in der gleichen Achse wieder zurück. Das Licht trifft auf die Kamera, sodass die Pupille des Betrachtenden nach dem *bright-pupil Effekt* hell erscheint (Abb. 4).

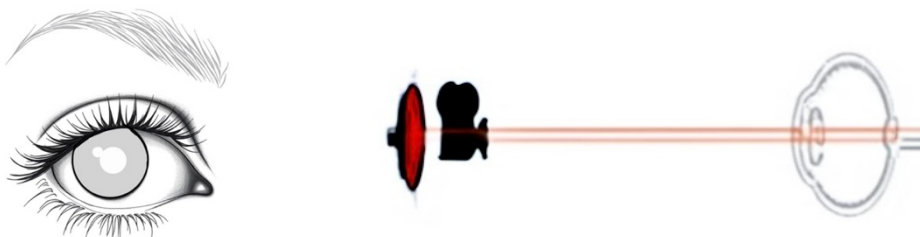


Abbildung 4: Bright pupil Methode [modifiziert aus (32)]

Bei der *dark-pupil* Methode befindet sich die Lichtquelle in einer anderen Position als die der Kamera, sodass das Infrarotlicht in einem anderen Winkel auf das Auge trifft und von der Netzhaut an der Kamera vorbei reflektiert wird. Die Kamera erhält ein Licht, sodass die Pupille nach dem *dark-pupil Effekt* dunkel erscheint (Abb. 5).

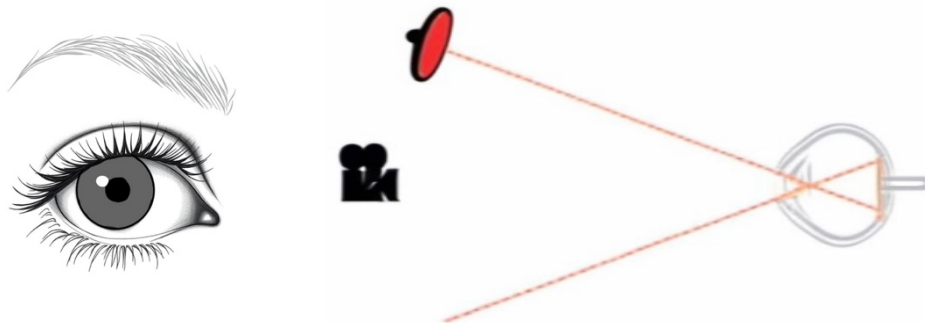


Abbildung 5: Dark pupil Methode [modifiziert aus (32)]

Beide Verfahren können zur Erfassung der Pupille aufgrund ihres hellen bzw. dunklen Erscheinungsbildes verwendet werden. Dies ist der erste Referenzpunkt für den Eye-Tracker (32).

Die korneale Reflexion ist der zweite Referenzpunkt und entspricht der einfachen Reflexion des infraroten Lichtstrahls, der von der Hornhaut (Cornea) des Auges reflektiert wird. Die Lichtreflexion erkennt man als einen kleinen weißen Punkt auf dem Auge (Abb. 6).

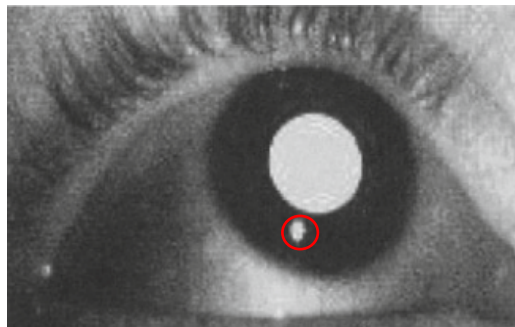


Abbildung 6: Aufgezeichnetes Bild eines Eye-Trackers, Korneale Reflexion rot eingekreist [modifiziert aus (24)]

Da die Lichtquelle am Eye-Tracker fest positioniert ist, bleibt die korneale Reflexion auch immer an derselben Stelle. Bei einer Augenbewegung verändert sich nur die Lage der Pupille, da der Betrachtende seinen Blick auf verschiedene Objekte ausrichtet. Abbildung 7 veranschaulicht, wie die Kamera des Eye-Trackers das Auge bei verschiedenen Blickrichtungen des Betrachtenden sieht. Aus dem relativen Abstand von Pupillenmitte und Hornhautreflexion kann die Software des Eye-Trackers dann die Position des fovealen Betrachtungspunkt des Beobachters errechnen (33).

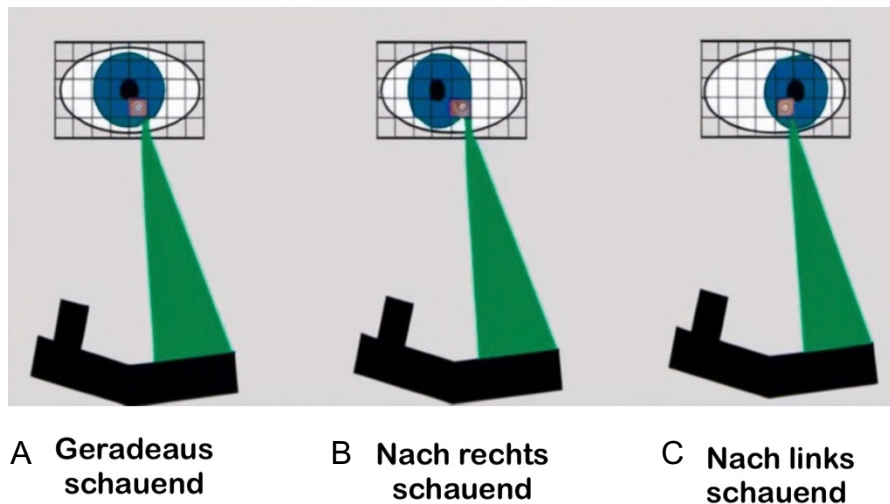


Abbildung 7: Darstellung der Kameraaufnahme des Auges bei verschiedenen Blickrichtungen des Betrachtenden [modifiziert aus (33)]

A: Darstellung des Auges, wenn der Betrachtende geradeaus schaut. Die Pupille steht mittig und die Hornhautreflexion erscheint auf einer festen Position.

B: Darstellung des Auges, wenn der Betrachtende nach rechts schaut. Die Pupille sitzt weiter rechts, wobei die Hornhautreflexion sich nicht mitbewegt und auf der gleichen Position bleibt.

C: Darstellung des Auges, wenn der Betrachtende nach links schaut. Die Pupille sitzt weiter links, wobei die Hornhautreflexion auf der gleichen Position bleibt.

Noch vor der Aufzeichnung des Blickverlaufs müssen dem System des Eye-Trackers Beispiele gegeben werden, wie die Hornhautreflexion und Pupillenposition beim Betrachten des Bildschirms aussehen. Aus diesem Grund wird der Betrachtende bei der Kalibrierung aufgefordert, nacheinander auf dem Bildschirm erscheinende Punkte mit festgelegten Koordinaten zu fixieren. Mit Hilfe der Aufzeichnung der Pupillenmitte und der Hornhautreflexion beim Betrachten der Punkte, erhält das System Bezugspunkte und kann danach die Blickpunkte des Betrachtenden errechnen (24, 25).

Ein großer Vorteil bei der Verwendung von zwei Referenzpunkten (Pupillenmitte und Hornhautreflexion) besteht darin, dass unbeabsichtigte Kopfbewegungen keine schwerwiegenden Auswirkungen auf die Messung der Blickpunkte haben. Das relative Verhältnis der Referenzpunkte zueinander bleibt auch bei einer Bewegung konstant (25).

2.4.4 Anwendungsgebiete des Eye-Tracking

Die Technik des Eye-Tracking wird heutzutage in vielfältiger Weise eingesetzt. Sie kann diagnostisch verwendet werden, um den visuellen Betrachtungsprozess und somit die kognitive Verarbeitung und Aufmerksamkeit des Betrachtenden objektiv zu erfassen. Darüber hinaus kann die Technik jedoch auch interaktiv verwendet werden, um visuell vermittelte Anwendungen zu nutzen (25).

Die Aufzeichnung der Augenbewegung eines Betrachtenden während der Präsentation eines Stimulus erweist sich besonders im Marketingbereich als nützlich. Mithilfe von Eye-Tracking Experimenten kann ermittelt werden, welche Bereiche eines dargestellten Reizes die Aufmerksamkeit des Betrachtenden auf sich ziehen und für den Entscheidungsprozess beim Kauf eines Produktes verantwortlich sind. In so genannten Regaltests werden Probanden Bilder von Supermarktregalen gezeigt, um den Betrachtungsprozess von Kunden zu erfassen. Die Lebensmittelindustrie kann somit analysieren, wie sichtbar Ihre Produkte im Regal sind und welche Eigenschaften die Aufmerksamkeit der potenziellen Käufer steigern, die gegebenenfalls die Kaufentscheidung beeinflussen. Aber auch bei der Website oder Magazingestaltung wird erforscht, welches Design von Grafiken und Texten wirkungsvoll ist, damit eine längere Verweildauer auf der Website oder ein längeres Betrachten eines Magazincovers generiert wird. Des Weiteren kann überprüft werden, wie benutzerfreundlich eine Internetseite gestaltet ist, indem analysiert wird, ob die Nutzer wichtige Informationen schnell und unkompliziert finden und damit die Erwartungen der Besucher erfüllen (34).

Neben dem Marketingbereich wird die Eye-Tracking Technologie zunehmend auch in der Industrie eingesetzt. Ein Beispiel dafür ist die Nutzung von Fahrerüberwachungssystemen (Driver monitoring system, DMS) in der Automobilindustrie. Diese Systeme überwachen das Fahrverhalten mit Hilfe von Eye-Tracking Kameras und künstlicher Intelligenz. Die Blickrichtung, Blinkrate und Kopfposition des Fahrers werden dabei genau aufgezeichnet, sodass das System erkennen kann, wenn der Fahrer aufgrund von Ablenkung oder Müdigkeit den Fokus auf die Straße verliert. In diesen Situationen kann das System Warnmeldungen auslösen, um so eine Gefahrensituation zu verhindern. Diese Eye-Tracking Systeme sind bereits marktreif und werden schon in Fahrzeugen eingebaut (35).

Zur Analyse von Reaktions- und Entscheidungsprozessen werden Eye-Tracker auch in Trainingssituationen eingesetzt. Beispielsweise werden Fluglotsen, Piloten oder andere Bediener in kritischen und belastenden Umgebungen an Simulatoren oder in realen Situationen mit Eye-Trackern geschult. Dabei können die aufgezeichneten Augenbewegungen Einblicke in das menschliche Verhalten geben. In der anschließenden Video-Rückschau können die Auszubildenden gemeinsam mit dem Ausbilder die kognitiven Prozesse bei der Entscheidungsfindung überprüfen und so das Training optimieren (36).

Ein weiteres Anwendungsgebiet für Eye-Tracker ist die Videospiegelindustrie, die Eye-Tracker in VR-Brillen (Virtual Reality Brillen) einsetzen. Mit diesen Brillen werden die Augenbewegungen der Spieler verfolgt, sodass Gesichtsausdrücke und Augenkontakte auf virtuelle Avatare übertragen werden können und so die Spielwelt realistischer empfunden wird (37).

Auch im Bereich der Medizin hat die Eye-Tracking Technologie einen hohen Stellenwert. Bei einer LASIK-OP (Laser-in-situ-Keratomileusis) wird die Fehlsichtigkeit der Augen mithilfe eines Lasers korrigiert. Damit bei unwillkürlichen Augenbewegungen der Laserstrahl trotzdem auf die richtige Stelle trifft, wird das Auge durch einen Eye-Tracker verfolgt, der die genaue Augenposition an den Laser weitergibt (38). Die Nutzung von Eye-Trackern verbessert das visuelle Ergebnis bei LASIK Operationen und reduziert das Auftreten von postoperativen Hornhautverkrümmungen (Astigmatismus) (39).

Die Augenbewegungen von Patientinnen und Patienten können auch Hinweise auf eine Reihe von neurologischen Erkrankungen geben. Dabei können Merkmale in der Augenbewegung als Biomarker für die Diagnose von Alzheimer Demenz, Parkinson und weiteren Erkrankungen des Nervensystems genutzt werden (40). Aufgrund der Neurodegeneration kommt es bei der Parkinson-Krankheit zu Schädigungen der okulomotorischen Nerven, sodass die Augenmotorik gestört ist. Folglich leiden die Erkrankten an gestörten, abnormalen Blickbewegungen, die von einem Eye-Tracker aufgenommen werden können. Sie zeigen deutliche Unterschiede in den visuellen Erkundungsstrategien im Vergleich zu nicht erkrankten Personen (41). Auch in der Diagnostik von Alzheimer Demenz werden die Augenbewegungen der Patienten gemessen. Alzheimerpatienten führen verlangsamte Augenbewegungen aus, die ihr

Ziel oft nicht genau treffen und seltener durch korrigierende Bewegungen der Augen ausgleichen werden. Mit diesen neuen Diagnosetests kann die Demenzerkrankung schon in einem früheren Stadium diagnostiziert und behandelt werden (42). Ebenso können depressive Erkrankungen an den Augenbewegungen erkannt werden. Unter Depressionen leidende Patienten zeigen in Eye-Tracker Tests eine unterschiedliche visuelle Verarbeitung bei der Betrachtung von positiven und negativen Gesichtsausdrücken. Sie haben eine geringere Aufmerksamkeit, wenn sie einen fröhlichen Gesichtsausdruck betrachten und eine höhere Aufmerksamkeit, wenn sie traurige Gesichter betrachten. Somit kann nachgewiesen werden, dass Menschen mit Depressionen die Fähigkeit verlieren, Freude zu empfinden und wenig Interesse an positiven Reizen haben (43).

Die Eye-Tracking Technologie kann jedoch auch für die Steuerung von Geräten genutzt werden. Für Menschen, die unter schweren körperlichen Behinderungen wie ALS (Amyotrophe Lateralsklerose) leiden, ist es aufgrund der Lähmung nicht möglich elektrische Rollstühle mit Steuerhebel zu bedienen. Sie können Eye-Tracking gesteuerte Rollstühle verwenden, die die Augenbewegung der Person aufnehmen und die Blickrichtung als Steuerbefehl an den Motor weitergeben. Mit dieser Erfindung haben gelähmte Menschen die Möglichkeit selbstständig den Rollstuhl zu steuern und so alltägliche Aktivitäten eigenständig durchzuführen (44).

Darüber hinaus wird das Eye-Tracking, wie in dieser Studie beschrieben, auch als Analyseinstrument in der medizinischen Lehre eingesetzt. Insbesondere in der Zahnmedizin wird mit Hilfe von Eye-Tracking die Betrachtung von Röntgenbildern untersucht (7, 45-51). Dadurch können mögliche Defizite bei der Betrachtung von Röntgenbildern aufgedeckt und Konsequenzen für die medizinische Ausbildung gezogen werden. Neuere Studien (52, 53) verwenden Eye-Tracking, um mögliche Veränderungen in der Betrachtung von Röntgenbildern durch den Einsatz von Diagnoseprogrammen mit künstlicher Intelligenz zu ermitteln. Neben der Anwendung in der radiologischen Betrachtung wird die Eye-Tracking Technologie auch in anderen Bereichen der Lehre eingesetzt, zum Beispiel bei der Betrachtung von histologischen Bildern (54) oder der Auswertung von Elektrokardiogrammen (55).

2.5 Aktueller Forschungsstand

In den zahnmedizinischen Studien wird die Eye-Tracking Technologie vereinzelt verwendet, um die Betrachtung von dentalen Röntgenaufnahmen zu analysieren. Dabei werden in den meisten Versuchen Panoramaschichtaufnahmen (PSA) eingesetzt, da diese sehr häufig in dem zahnmedizinischen Praxisalltag als diagnostisches Werkzeug genutzt werden. Sie bieten einen umfassenden Überblick des Kauapparats und angrenzende Gesichtsstrukturen, sodass eine Reihe von Pathologien mit Hilfe der Aufnahme diagnostiziert werden können (45). Dennoch sind Einzelzahnaufnahmen für den praktizierenden Zahnmediziner ebenso essenziell für eine detaillierte Bildgebung der Zähne und des Zahnhalteapparats (8, 9). Im Bereich der radiologischen Betrachtungsanalyse wurden bislang nur wenige Studien mit Einzelzahnaufnahmen veröffentlicht (47-49).

In der aktuellen Studie von *Gnanasekaran et al.* (45) wurden die Suchmuster und visuellen Fixierungen von Zahnmedizinstudierenden beim Betrachten von PSA ermittelt. Die Studierenden im letzten Ausbildungsjahr zeigten ein unsystematisches Vorgehen beim Betrachten der Röntgenaufnahmen, sodass sie häufig nicht alle Pathologien fanden und 65% von Ihnen nicht die richtige Diagnose stellen konnten. Die Studie stellte fest, dass die Studierenden vermehrt die abgebildeten Zähne fixierten und dabei die Umgebungsstrukturen weniger beachteten. Die Studienleiter appellierten für eine Verbesserung in der zahnmedizinischen Ausbildung, damit eine standardisierte Strategie zur Interpretation von PSA gelehrt werden kann.

In einer weiteren Studie aus dem Jahr 2020 (7) wurde das Scanverhalten von Zahnmedizinstudierende im ersten klinischen Semester beim Betrachten von PSA überprüft. Die Studierenden stellten vor und nach ihrem universitären Röntgenkurs Diagnosen für die präsentierten PSA, damit die Effektivität der radiologischen Ausbildung untersucht werden konnte. Die Ergebnisse zeigten, dass sich die Studierenden verbesserten, da sie einen größeren Bereich des Röntgenbilds betrachteten und so mehr Pathologien identifizieren konnten. Trotzdem wurde rund die Hälfte der Anomalien nicht gefunden und die Anzahl an falsch-positiven Diagnosen stieg an.

In einer ähnlichen Studie des Mainzer Universitätsklinikums (46) wurden die Studierenden aus dem ersten klinischen Semester vor und nach ihrem Röntgenkurs

mit den Studierenden aus dem fünften klinischen Semester verglichen. Die Studie fand heraus, dass sich das Befunden der PSA mit längerer zahnärztlicher Ausbildungszeit der Studierenden verbesserte. Sowohl die Betrachtungszeit als auch die Vollständigkeit der Betrachtung des gesamten Bildes waren bei dem erfahrenen, höheren Semester am höchsten. Damit hat sich auch die Genauigkeit der Diagnosen erhöht.

Turgeon et al. (56) untersuchten die Betrachtung von PSA von Studierenden und zahnärztliche Radiologen („oral and maxillofacial radiologists“). Sie stellten fest, dass erfahrene Radiologen schneller pathologische Strukturen auffanden und fixierten und sie insgesamt eine kleinere Betrachtungsstrecke beim Analysieren von offensichtlichen Pathologien mit ihren Augen zurücklegten.

Die Eye-Tracking Studie von *Hermanson et al.* (47) unterscheidet sich von den anderen, da sie keine PSA, sondern periapikale Einzelzahnaufnahmen verwendeten. Die Probanden waren Zahnmedizinstudierende, Zahnärzte und spezialisierte Endodontologen, sie wurden jedoch nicht miteinander verglichen. Die Studie ermittelte, dass die Mehrheit der Probanden eine Zahn-für Zahn Betrachtungsstrategie verfolgten und die meisten wiederkehrenden Fixationen im Wurzelbereich stattfanden.

Eine japanische Studie (48) ermittelte die Beeinflussung von diagnostischer Information beim Betrachten von radiologischen Einzelzahnaufnahmen von marginaler und periapikaler Parodontitis. Ein Teil der rekrutierten Zahnärzte erhielt dabei Patienteninformationen zum Röntgenbild, während die anderen diese nicht bekamen. Sie stellten fest, dass die Betrachtungszeit der Gruppe mit Informationen kürzer war.

Die Eye-Tracking Studien (7, 45-48, 56) kommen zu dem Schluss, dass der Erfolg des richtigen Diagnostizierens von zahnärztlichen Röntgenaufnahmen im Zusammenhang mit der Erfahrung und Ausbildung steht. Sie stellten fest, dass Studierende eine unsystematische Vorgehensweise bei der Betrachtung von Röntgenaufnahmen haben und häufig nicht das ganze Bild untersuchen (7, 45, 46). Jedoch verbesserte sich die Befundungskompetenz mit der Teilnahme an den universitären Röntgenkursen und der Routine in der Berufsausübung (7, 45, 46, 56).

In der aktuellen Literatur ist derzeit keine Studie bekannt, die sich mit dem Vergleich von Studierenden und Zahnärzten bei der Betrachtung von Bissflügelaufnahmen beschäftigt. Während der Erstellung dieser Studie wurde eine neue Studie zu der

Betrachtungsanalyse von Bissflügelaufnahmen veröffentlicht (49). Diese untersuchte die Betrachtungsstrategie von Zahnärzten beim Betrachten von Bissflügelaufnahmen und stellte keine Vergleiche zwischen Probanden verschiedener Ausbildungszeitpunkten an oder überprüfte die Diagnosefähigkeiten der Probanden. Die Studie ermittelte, dass die teilnehmenden Zahnärzte am häufigsten eine Zahn-für-Zahn Betrachtungsstrategie verfolgten und kariöse Läsion länger betrachteten als Restaurationen. Auffällig war, dass tiefe Läsionen häufiger betrachtet wurden als oberflächlich liegende Läsionen.

2.6 Ziel der Studie

Das Ziel der vorliegenden Studie ist es zu vergleichen, wie Studierende und fertig ausgebildete Zahnärzte Bissflügelaufnahmen betrachten und befunden. Mit Hilfe eines Eye-Trackers soll die Betrachtungszeit, das Betrachtungsmuster und die Fixationen auf zuvor definierten wichtigen Regionen der Probanden analysiert werden. Darüber hinaus soll jeder Versuchsteilnehmende eine Diagnose zu jedem präsentierten Röntgenbild stellen.

3 Material und Methoden

3.1 Probandenkollektiv

Die Probanden der Studie bestehen aus 2 Kohorten und wurden in der Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz auf persönliche Anfrage rekrutiert. Insgesamt bestand das Probandenkollektiv aus $n = 35$ Probanden.

Die Gruppe der Studierenden bestand aus Zahnmedizinstudierenden, die sich in ihrem 3. Klinischen Semester befanden und stellten $n = 22$ Teilnehmende. Sie repräsentierten den Kenntnisstand der Studierenden in der Mitte der klinischen zahnmedizinischen Ausbildung.

Die Gruppe der Zahnärzte setzte sich aus in der Uniklinik Mainz praktizierenden Ärzten der Abteilung für Parodontologie sowie für zahnärztliche Prothetik zusammen. Die Zahnärzte bestanden aus $n = 13$ Probanden und verfügten über eine unterschiedlich lange Berufserfahrung (Mittelwert ca. 4 Jahre).

Alle Probanden nahmen freiwillig an der Studie teil und unterzeichneten vor der Durchführung eine Einverständniserklärung. Sie wurden ausführlich über die Ziele der Studie in einem persönlichen Gespräch informiert und ihnen wurde eine Informationsschrift über Wesen, Bedeutung, Risiken und Tragweite der Studie zur Verfügung gestellt. Alle Studienteilnehmende wiesen einen guten allgemeinen Gesundheitszustand auf. Ein weiteres Kriterium für die Aufnahme in die Studie war eine normale Sehschärfe, die ein scharfes Sehen auf dem Computerbildschirm ermöglicht. Personen, die auf eine Brille oder Kontaktlinsen angewiesen waren, durften nicht an der Studie teilnehmen, da das vom Eye-Tracker emittierte Infrarotlicht von dem Brillenglas reflektiert wird und es somit zu einer unpräzisen Aufzeichnung der Augenbewegung führt.

3.2 Bissflügelaufnahmen

Die Bissflügelaufnahmen, die für die Studie verwendet wurden, wurden aus der Röntgenabteilung der Klinik für Zahn-, Mund- und Kieferkrankheiten der Universitätsmedizin Mainz selektiert. Es wurden aus 27 anonymisierten Aufnahmen insgesamt 15 digitale Bissflügelaufnahmen ausgewählt, die eine gute Bildqualität besaßen und verschiedene Krankheitsbilder aufwiesen. Die Aufnahmen stammen

sowohl vom rechten als auch vom linken Kiefer und enthielten mindestens beide Prämolaren sowie den ersten Molar. Die Bildqualität und Größe der Röntgenaufnahmen besitzen keine einheitliche Norm, da sie von verschiedenen Röntgengeräten und Bildempfängern aufgenommen wurden. Die richtige Diagnose der Bissflügelaufnahmen wurde von dem Leiter der „Oral Diagnostic Sciences“ der Zahnmedizinischen Klinik der Universität Bern gestellt. Dabei wurde für die Aufnahmen eine Verdachtsdiagnose gestellt und zusätzlich die *Areas of Interest* (AOIs) festgelegt.

3.3 Eye-Tracking System

Für den Eye-Tracking Versuch wurde das Gerät „Eyegaze Edge Monocular System“ der Firma LC Technologies, Inc., (Fairfax, Virginia, USA) verwendet. Diese hat den Eye-Tracker in Kooperation mit dem deutschen Unternehmen Interactive Minds (Dresden, Germany) entwickelt. Die monokulare Kamera besitzt eine Abtastfrequenz von 60 Hz und erkennt und fokussiert das aufgenommene Auge automatisch. Die Abweichung des Gerätes wird unter 0,4 Grad angegeben, sodass der Eye-Tracker eine hohe Genauigkeit besitzt (57). Das Gerät verwendet zudem die *bright-pupil* Methode (siehe Abschnitt 2.4.3 und Abb. 9). Der Eye-Tracker ist mit einer Halterung an dem unteren Rand eines 19 Zoll Computerbildschirms (Marke Fujitsu Technology Solutions, München) montiert. Der Bildschirm steht 60cm von den Augen des Betrachtenden entfernt (Abb. 8). Eine Kinnstütze sorgt für den richtigen Abstand des Probanden zum Computerbildschirm und verhindert zusätzlich Kopfbewegungen, die die Blickregistrierung stören könnten. Vor jeder Aufnahme wurde eine Kalibrierung durchgeführt, bei der nacheinander neun auf dem Monitor verteilte Punkte angezeigt wurden (Abb. 10). Der Proband wurde gebeten, die Punkte nacheinander zu fixieren, um dem System Referenzpunkte zu geben, mit denen sich im weiteren Verlauf die genauen Blickpunkte des Betrachtenden berechnet werden konnten. Entstanden bei der Kalibrierung Abweichungen, so wurde diese so lange wiederholt, bis alle Punkte genau registriert wurden.

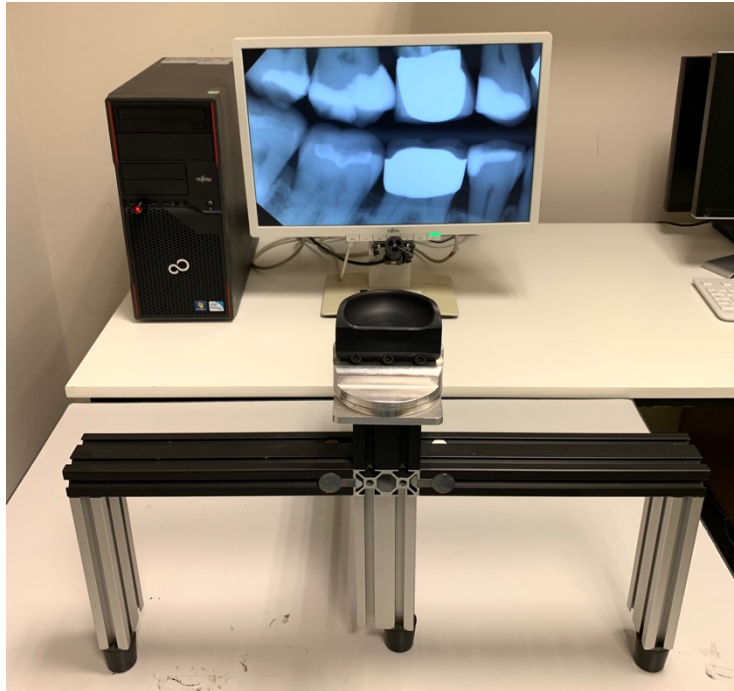


Abbildung 8: Versuchsaufbau: Computer mit Bildschirm und montiertes Eye-Tracking Gerät, Kinnstütze in 60cm Entfernung

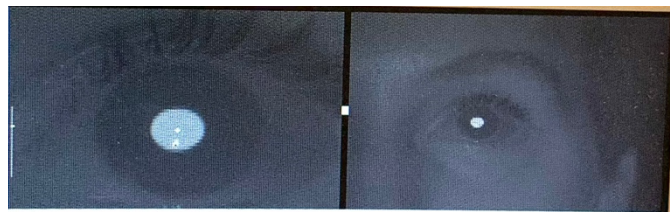


Abbildung 9: Darstellung der Augenaufnahme mit der Bright-pupil Methode



Abbildung 10: Kalibrierungsvorgang mit 9 Referenzpunkten; Rote Kreuze: Referenzpunkte, die vom Betrachtenden fixiert werden sollen; Blaue Punkte: realen Blickpunkte des Betrachtenden; kleine Abweichungen zwischen Referenzpunkte und Blickpunkte werden von dem System akzeptiert

3.4 Software

Der „Eyegaze Edge“ Eye-Tracker wurde zusammen mit dem Computerprogramm NYAN® 2.0 Eyetracking Data Analysis Suite (Interactive Minds GmbH, Dresden, Germany) verwendet. Das Programm lief unter dem Microsoft Windows 7 Professional Betriebssystem auf einen Esprimo P700 Fujitsu Computer (Fujitsu Technology Solutions, München). In das NYAN® Programm wurden alle 15 digitalen Röntgenbilder importiert und eine Mediashow erstellt. Bei der Mediashow handelt es sich um die Bildschirmpräsentation aller Röntgenbilder, die den Probanden präsentiert wurde. Alle Röntgenbilder wurden in einer zufälligen Reihenfolge in die Mediashow eingepflegt, und jeder Proband bekam diese Reihenfolge zu sehen.

Für jedes Röntgenbild wurde im Programm die *Areas of interest* (AOI) eingezeichnet. Diese interessanten Regionen, die eine Pathologie im Röntgenbild aufzeigten, wurden von Hand mit der Computermaus markiert und benannt. Diese Bereiche wurden dann im Programm hinterlegt, damit das Programm für diese Areale Eye-Tracking Daten generieren konnte. Während der Bildschirmpräsentation für die Probanden wurden die AOIs jedoch nicht auf dem Bildschirm angezeigt, sodass der Proband das Originalbild betrachten konnte.

Zusätzlich wurde jede Röntgenaufnahme in acht anatomische Einheiten geteilt. Diese so genannten Oktanten beinhalteten jeweils einen Zahn im Ober- bzw. Unterkiefer. Jeder Oktant wurde als rechteckige AOI markiert und von oben links nach oben rechts (1 – 4) sowie von unten links nach unten rechts (5 – 8) nummeriert. Da die Röntgenbilder sowohl vom rechten als auch vom linken Kiefer stammten, beinhalteten die Oktanten nicht immer die gleichen Zähne. Mit Hilfe des Achtelns der Röntgenbilder konnte später die Reihenfolge der Betrachtung für jeden Probanden rekonstruiert werden.

In Abbildung 11 ist beispielhaft das Röntgenbild (Nr. 6) zu sehen, auf dem die markierten Pathologien (pink gefärbt) und Oktanten (grün gefärbt) als AOIs in dem NYAN® Programm gekennzeichnet wurden.

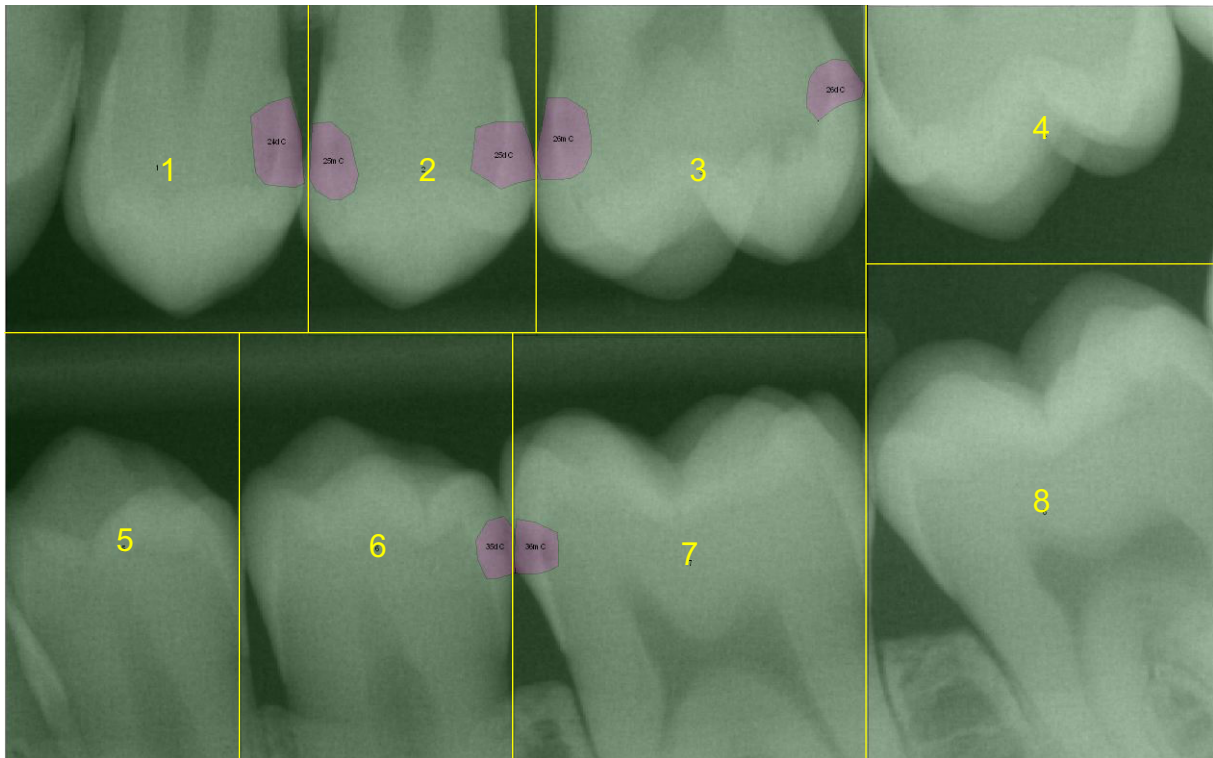


Abbildung 11: Bissflügelaufnahme Nr. 6 mit markierten AOIs; Oktanten sind grün gefärbt und von 1 - 8 nummeriert, Pathologien sind pink gefärbt und nach Zahn und Art der Pathologie benannt

3.5 Räumlichkeiten

Der Ort der Versuchsdurchführung entsprach einem gewöhnlichen Befundungsraum für digitale Röntgenaufnahmen. Der abgedunkelte Raum war nicht mit Fenstern ausgestattet, sodass keine störenden Lichtquellen vorhanden waren, die einen Einfluss auf die Darstellung der Röntgenbilder auf dem Computerbildschirm hätte haben können, was zu einer Beeinträchtigung der Befundung hätte führen können. Nach der aktuellen Monitornorm DIN 6868-157 der Röntgenverordnung (58) wurde die arbeitstägliche Konstanzprüfung für das Bildwiedergabesystem vor jedem Versuchstag durchgeführt. Die visuelle Prüfung wurde am Testbild TG18-OIQ durchgeführt und es wurden die 5 Prüfkenngrößen erfolgreich geprüft (58).

3.6 Versuchsablauf

Insgesamt haben 35 Probanden, bestehend aus 22 Zahnmedizinstudierende und 13 Zahnärzten, den Eye-Tracking Versuch durchgeführt.

Die Probanden wurden in der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Universitätsmedizin Mainz auf persönliche Anfrage rekrutiert. Nach Aufklärung über Ablauf und Ziel der Studie in einem persönlichen Gespräch und Zustimmung der freiwilligen Teilnahme wurde die Eye-Tracking Messung durchgeführt. Jeder Proband durfte den Versuch nur einmal durchführen, Wiederholungen waren nicht erlaubt.

Jedem Probanden wurden nach vorangehender Kalibrierung des Eye-Trackers 15 Bissflügelaufnahmen für jeweils maximal 30 Sekunden auf dem Computerbildschirm präsentiert. In dieser Zeit betrachtete der Proband das Bild, während der Eye-Tracker die Augenbewegung aufzeichnete, und nannte die eigene Verdachtsdiagnose. Die Beisitzerin (Stefanie Weigl) schrieb die genannte Diagnose mit.

Nach jedem Röntgenbild wurde ein *Black Screen* in die Bildschirmpräsentation eingebaut. Dieser schwarze Bildschirm hatte keine Zeitlimitation und galt als visuelle Pause bis zum nächsten Röntgenbild. Der Proband entschied selbst mit einem Rechtsklick der Computermaus, wann die Präsentation weitergeführt und das nächste Röntgenbild angezeigt wurde. Außerdem hatte jeder Proband die Möglichkeit, die Präsentation eines Röntgenbildes vor dem Ablauf der 30 Sekunden weiter zu klicken. Dies war auch durch einen Rechtsklick möglich und wurde zum Beispiel verwendet, wenn die Betrachtung eines unauffälligen Röntgenbildes ohne Pathologien schnell beendet wurde und der Proband zum nächsten Bild übergehen wollte.

Den Probanden wurde vor der Durchführung mitgeteilt, dass die Bildschirmpräsentation verschiedene Röntgenbilder beinhaltete. Sie wurden darüber informiert, dass die Röntgenbilder sowohl mit als auch ohne jegliche Pathologie im Verlauf des Versuches zu sehen sein würden. Ein Beispielbild, das zuvor ausgewählt wurde und den Probanden ohne Zeitlimitation vor der eigentlichen Präsentation gezeigt wurde, sollte den Probanden als Vorbereitung für den folgenden Versuch dienen und ein Exempel für die Röntgenbilder und den Ablauf geben. Zusätzlich wurde betont, dass der Schwerpunkt der Studie auf der Untersuchung der Betrachtungsweise und nicht auf der Benennung der richtigen Diagnose liegt.

3.7 Datenexport und Erhebung der Verdachtsdiagnosen

Jeder teilnehmende Proband erhielt für den Versuch einen anonymisierten *Subject Code* in Form einer Nummer, so dass keine Rückschlüsse auf die Leistung der Person gezogen werden konnte. Das NYAN® Programm erstellte aus den aufgezeichneten Eye-Tracking Daten jedes Probanden eine Excel Tabelle (Excel Version 16, Microsoft) für jedes betrachtete Bild. Insgesamt wurden für jeden der 35 Probanden 15 Excel Tabellen erstellt. Die Tabelle beinhaltete für die in Abschnitt 3.8 genannten Parameter die individuellen Probanden-Werte. Alle Probandendaten wurden im Anschluss in einer großen Excel Tabelle zusammengeführt.

Die mündlich von den Probanden genannten Verdachtsdiagnosen wurden in einer Word Datei (Word Version 16, Microsoft) erfasst. Sie wurden im Anschluss mit der richtigen Diagnose verglichen und kontrolliert. Jeder Proband musste zu jeder Bissflügelaufnahme eine Diagnose stellen. Wenn keine Pathologien auf dem Röntgenbild zu sehen waren, wurde das Bild als unauffällig kategorisiert. Insgesamt gab es sowohl unauffällige Röntgenbilder sowie Röntgenbilder mit intaktem Zahnersatz und pathologischen Läsionen.

Darüber hinaus bot das NYAN® Programm die Möglichkeit zur Visualisierung der Betrachtung in Form von Grafiken. Mit der *Scanpath* Funktion konnte für jedes Bild eine Aufzeichnung des Blickpfades erstellt werden. Dabei wurden vom Betrachtenden fixierte Bereiche als rote Kreise dargestellt, die zusätzlich noch eine Nummerierung für die Reihenfolge der Fixierungen hatten. Die roten Kreise waren außerdem durch grüne Linien miteinander verbunden, um den Blickverlauf besser zu verdeutlichen (Abb. 12).

Ein weiteres Schaubild, das generiert werden konnte, waren die *Heat Map* Darstellungen. Diese farbcodierte Visualisierung ermöglichte es Bereiche zu identifizieren, die besonders lange und häufig betrachtet wurden. Je stärker die Fixierungen an einer Stelle waren, desto mehr änderte sich die Färbung des Bereichs von gelb nach rot. Die Untergrenze der Farbpalette (gelb) stellte die Mindestbetrachtungszeit einer Fixierung dar, während die Obergrenze (rot) die maximale Betrachtungszeit darstellte. Für jeden Probanden und jedes betrachtete Bild konnte eine solche Darstellung erzeugt werden. Auf diese Weise war es möglich, schnell und einfach Unterschiede zwischen den Probandengruppen zu erkennen (Abb. 13).

Allerdings ist darauf hinzuweisen, dass die beiden Visualisierungsmöglichkeiten nur eine grobe Darstellung der Eye-Tracking Daten sind und diese nicht für die statistische Auswertung verwendet wurden.

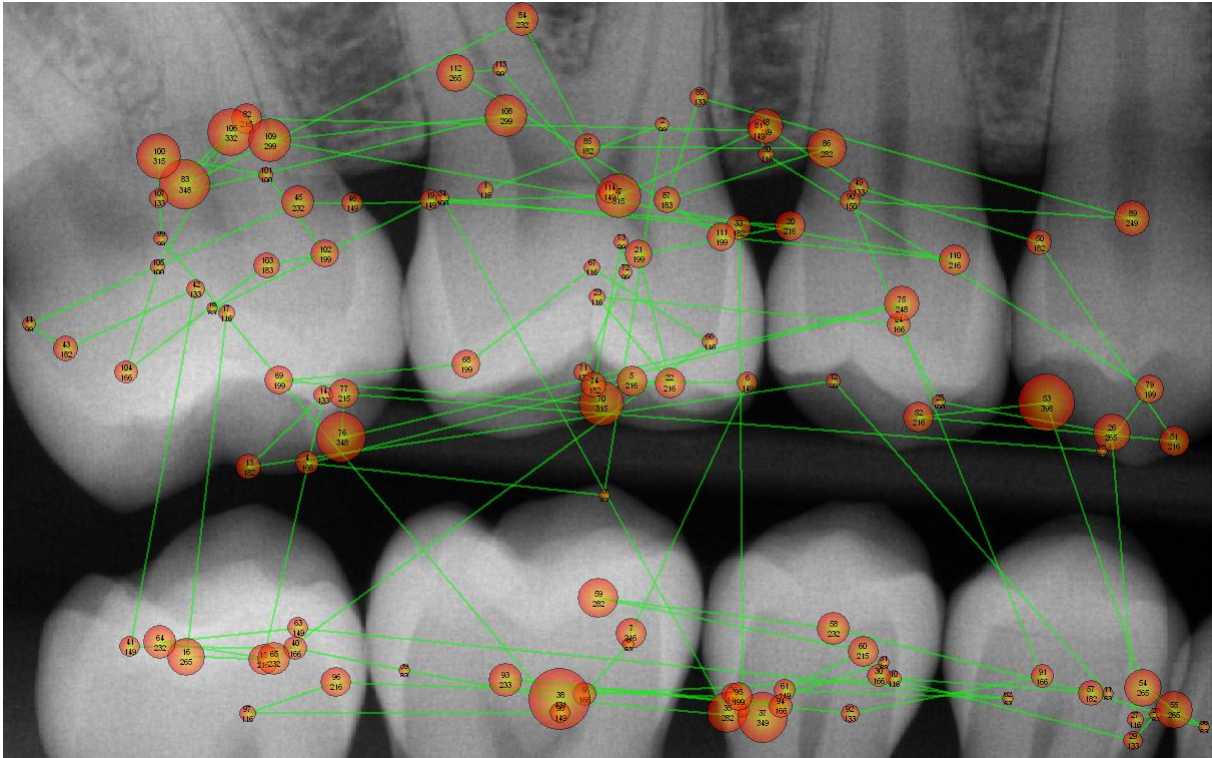


Abbildung 12: Beispielbild Scanpath (Proband Nr. 5)

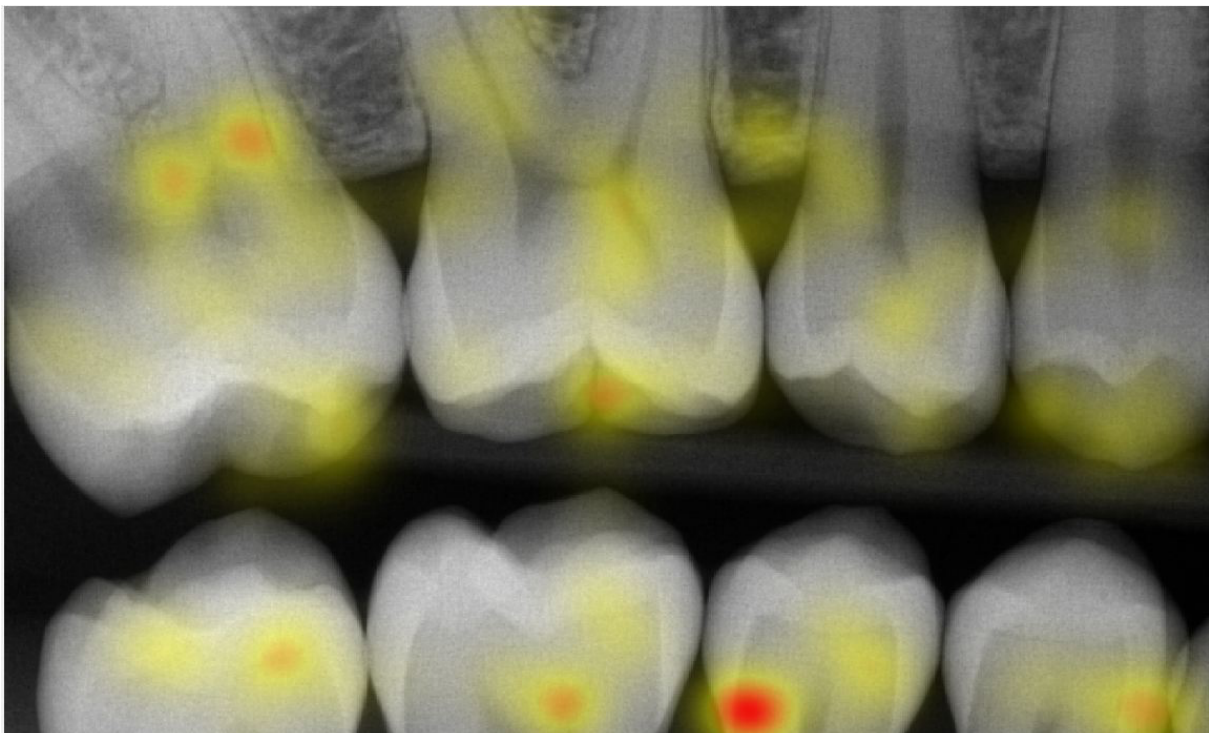


Abbildung 13: Beispielbild Heat Map (Proband Nr. 5)

3.8 Parameter

Für jedes betrachtete Bild jedes Probanden wurden für jede AOI Werte für die folgenden Parameter generiert:

Der Parameter *Total Time To First Fixation* gibt die Zeit an, die vergeht, bis der Betrachtende eine AOI zum ersten Mal fixiert. Der Wert wird in Sekunden angegeben und muss aufgrund der Zeitlimitation kleiner als 30 Sekunden sein. Sowohl für die AOIs der Oktanten 1 – 8, als auch der Pathologie AOIs erzeugte das Programm Daten. Wenn der Betrachtende die AOI nicht fixierte, fehlte der Wert für diese AOI in der Excel Tabelle.

Die Anzahl an Fixierungen einer AOI während der ganzen Betrachtungszeit wird von dem Parameter *Total Fixation Count* angegeben. Je häufiger eine AOI wiederholt betrachtet wird, desto höher ist der Wert.

Der Parameter *Total Gaze Duration* gibt die Gesamtbetrachtungszeit einer AOI an. Der Wert der Total Gaze Duration für alle AOIs gibt die Gesamtzeit an, während der die Testperson das Bild betrachtet, d.h. die Gesamtdauer der Betrachtung des Bildes.

Da jedes Röntgenbild eine unterschiedliche Anzahl von Pathologien besitzt, kann nicht mit Hilfe einer Ja/Nein Entscheidung festgelegt werden, ob der Proband das Bild richtig diagnostiziert hat. Aus diesem Grund wurde für alle Bilder ein *Diagnose-Score* für die Verdachtsdiagnose berechnet, der die Anzahl der richtigen Diagnosen darstellt. Wenn der Proband ein Röntgenbild richtig als unauffällig und pathologiefrei diagnostizierte, gab es für die richtige Benennung auch einen Punkt. Insgesamt wurden für alle richtigen Diagnosen 64 Punkte vergeben.

Für eine genauere Analyse der Verdachtsdiagnosen wurden zusätzlich kategorisierte Scores für Pathologiearten aufgestellt. Zu den Kategorien gehörten Karies, Knochenabbau und insuffiziente Füllungen, für die jeweils die Anzahl der Punkte ermittelt wurde, die von den einzelnen Probanden in der jeweiligen Kategorie erreicht wurden.

3.9 Statistische Analyse

Die statistische Auswertung der Eye-Tracking Daten erfolgte mit dem Datenanalysenprogramm SPSS Statistics Version 27 (IBM, Armonk, NY, USA). Dabei wurde die in Abschnitt 3.7 beschriebene Excel Tabelle, die die Messdaten des Versuches beinhaltet, in das Programm importiert.

Für die Hypothesentests wurde das Signifikanzniveau von 5% ($\alpha = 0,05$) gewählt. Dies bedeutet, dass bei einem p-Wert $<0,05$ die Nullhypothese H_0 abgelehnt und die Alternativhypothese H_1 angenommen werden kann und das Ergebnis statistisch signifikant ist. Nachfolgend werden Werte kleiner als 0,001 mit $p < 0,001$ bezeichnet.

Alle aus dem Versuch generierten Messparameter (siehe Abschnitt 3.8) wurden mit Hilfe des Kolmogorov-Smirnov-Tests auf Normalverteilung überprüft. Für die Parameter *Total Gaze Duration* (Gesamtbetrachtungszeit) und *Diagnose-Score* kann eine Normalverteilung angenommen werden.

Zur deskriptiven Analyse der Messparameter wurden die folgenden statistischen Kennwerte berechnet: M= Mittelwert, SD= Standardabweichung, Md= Median, Min= Minimum und Max= Maximum.

T-Test für unabhängige Stichproben wurden verwendet, um in Bezug auf verschiedenen Messparametern zu überprüfen, ob sich zwei Gruppen (Zahnärzte-Studierende oder Männer-Frauen) signifikant unterscheiden.

Zur graphischen Darstellung der Ergebnisse wurden Box-Plot Diagramme erstellt. Sie bestehen aus einer Box, die sich vom unteren bis zum oberen Quantil ziehen und zwei Linien (Whiskers), die das Minimum bzw. das Maximum darstellen. Der Median wird als vertikaler Strich in der Box eingezeichnet. Werte, die über das Ende der Whisker fallen, werden als Ausreißer bezeichnet und im Diagramm als Punkte eingezeichnet (59).

Der Zusammenhang von zwei Parametern wurde mit Hilfe von Pearson-Korrelationsanalysen untersucht. Der Pearson-Korrelationskoeffizient r nimmt Werte zwischen -1 und +1 an und gibt an, ob ein positiver bzw. negativer linearer Zusammenhang zwischen den Parametern vorliegt (60).

Mit Kreuztabellen und Chi-Quadrat Tests wurden die Vollständigkeit der Betrachtung analysiert und auf Unterschiede zwischen zwei Gruppen überprüft. Die Ergebnisse wurden mit Balkendiagrammen veranschaulicht.

Zur statistischen Überprüfung der Reihenfolge der betrachteten Oktanten wurde eine Varianzanalyse (ANOVA) gerechnet, die Mittelwertunterschiede zwischen mehreren Gruppen (Zahnärzte-Studierende) berechnet. Dabei wurde der Innersubjektfaktor Oktantenabfolge (erster bis achter Oktant) und die Zwischensubjektfaktoren Gruppe und der erreichte Anteil des Diagnose-Scores verwendet. Die Ergebnisse wurden nach Greenhouse-Geisser korrigiert.

4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der statistischen Auswertung werden im Folgenden dargestellt und im Hinblick auf die Forschungsfragen erläutert.

4.1 Zeitliche Betrachtung

Zunächst wurde die Betrachtungszeit untersucht, die die Probanden für die Betrachtung der Röntgenbilder benötigten.

Die zwei untersuchten Gruppen (Zahnärzte und Studierende) unterschieden sich in ihrer Betrachtungsweise signifikant ($p=0,018$). Die Gruppe der Zahnärzte betrachtet die Aufnahmen im Mittel ($M=16,79s$, $SD=4,32$) länger als die Studierenden ($M=15,67s$, $SD=5,75$). Zudem fällt eine größere Varianz der Werte bei der Gruppe der Studierenden auf. In Abbildung 14 sind die Betrachtungszeiten als Box-Plots dargestellt.

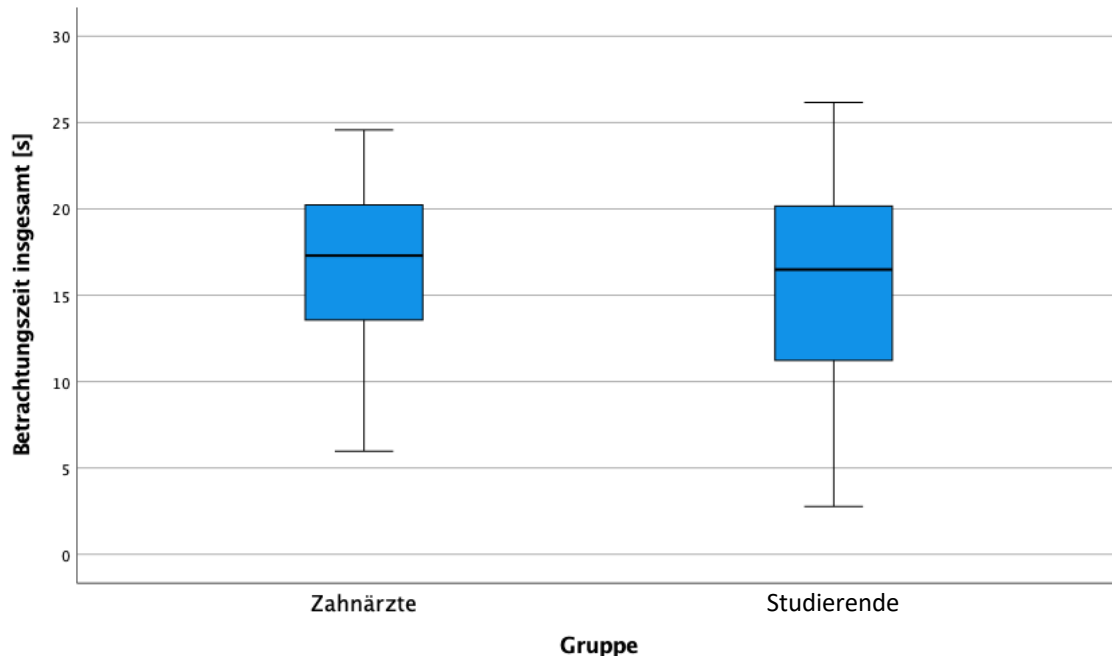


Abbildung 14: Betrachtungszeit insgesamt (s) der Gruppen

Darüber hinaus wurde untersucht, ob die Anzahl der von den Probanden betrachteten Oktanten mit der Zunahme der Betrachtungszeit steigt und ob einen Zusammenhang zwischen der Zeit und der Vollständigkeit des Betrachtens vorliegt.

Mittels Pearson-Korrelationsanalyse konnte ermittelt werden, dass es eine signifikante ($p < 0,001$, $r = 0,188$) Korrelation der Betrachtungszeit zu der betrachteten Anzahl der Oktanten gibt. Dies bedeutet, dass mit einer längeren Betrachtungszeit von Röntgenbildern eine höhere Vollständigkeit erzielt werden kann.

In Abbildung 15 ist dargestellt, dass die Probanden im Versuch 5 bis 8 Oktanten pro Röntgenbild betrachteten. Eine Person des Probandenkollektivs fixierte jedoch nur vier Oktanten auf einem Röntgenbild. Das Diagramm veranschaulicht, dass es eine Zunahme der Oktantenanzahl bei längerer Betrachtungszeit gibt, allerdings ist der Anstieg nicht konstant. Ab einer längeren Betrachtungszeit von ca. 17s (Median) ist die Vollständigkeit der Betrachtung weniger stark von der Zeit abhängig und die Probanden fixieren entweder 7 oder 8 Oktanten des Röntgenbildes.

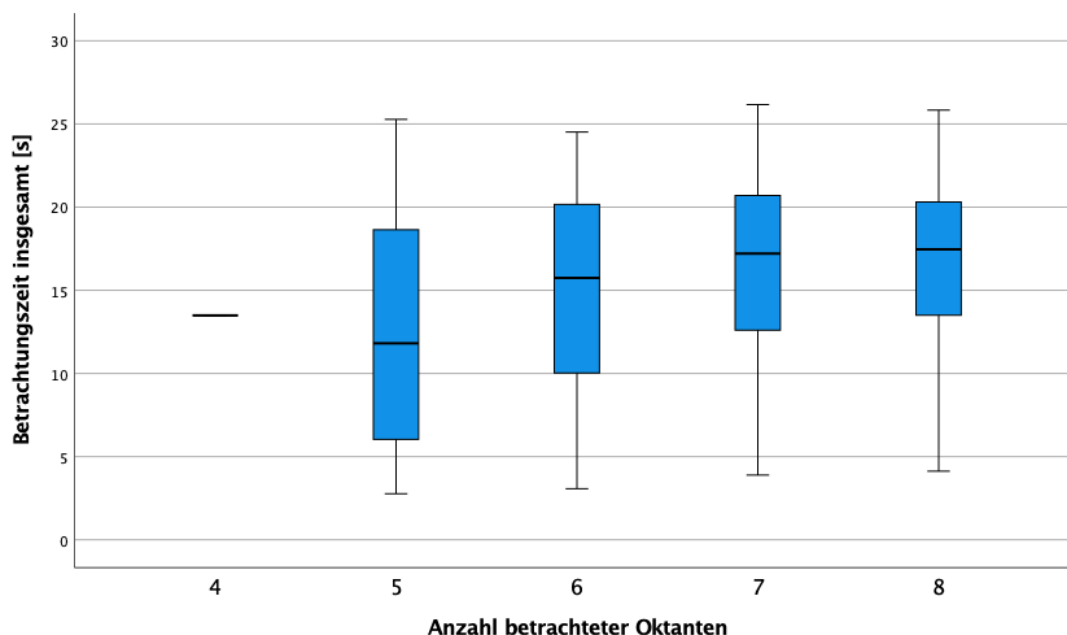


Abbildung 15: Anzahl der Oktanten in Abhängigkeit zur Betrachtungszeit

Zudem wurde untersucht, ob die Probanden für die Aufstellung der richtigen Verdachtsdiagnose eine längere Betrachtungszeit benötigen und es eine Korrelation zwischen dem Diagnose-Score und der Betrachtungszeit gibt.

Die Pearson-Korrelationsanalyse ergab, dass kein signifikanter ($p=0,233$, $r=0,207$) Zusammenhang zwischen der Diagnoseperformance und der Betrachtungszeit nachvollziehbar ist.

Folglich ist die diagnostische Leistung unabhängig von der Betrachtungszeit und eine korrekte Diagnose kann möglicherweise durch andere Faktoren wie Erfahrung und Wissen bestimmt werden. Das untenstehende Streudiagramm (Abb. 16) illustriert den erreichten Diagnose-Score in Abhängigkeit zum Mittelwert der Betrachtungszeit pro Probanden. Jeder aufgezeichnete Punkt stellt die Daten eines Probanden dar. Auch graphisch ist kein statistischer Zusammenhang erkennbar.

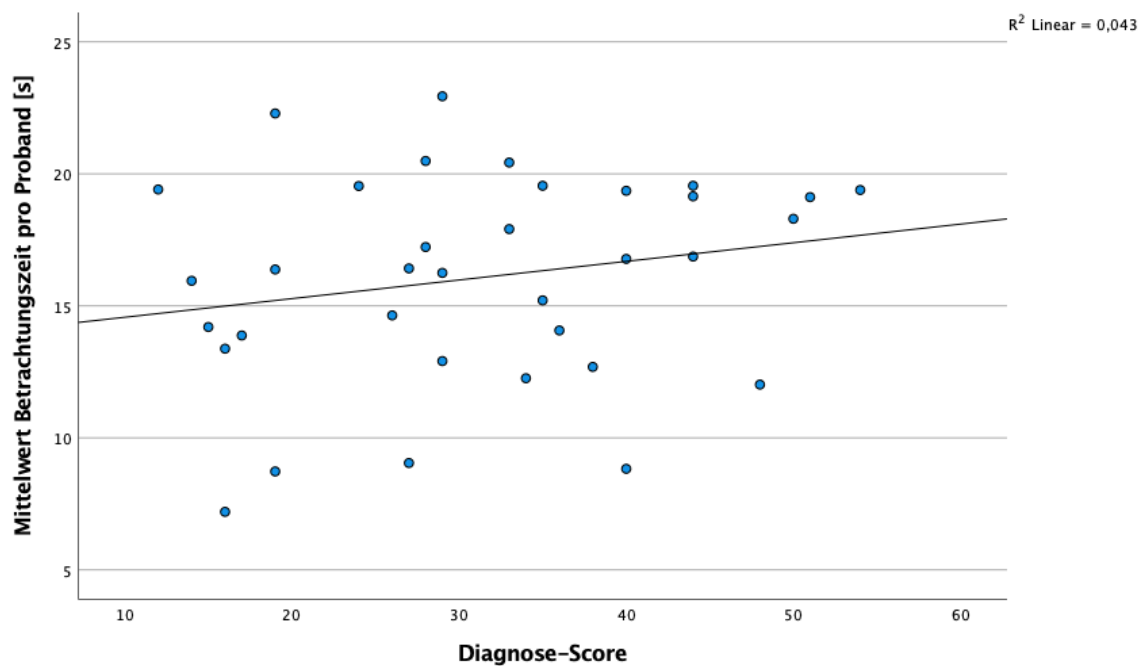


Abbildung 16: Erreichter Diagnose-Score in Abhängigkeit zum Mittelwert der Betrachtungszeit pro Probanden (s)

Es wurde zusätzlich untersucht, wie sich die Betrachtungszeit zwischen den Geschlechtern unterscheidet. Männer und Frauen unterschieden sich signifikant ($p < 0,001$) in ihrer Betrachtungszeit. Die männlichen Probanden betrachteten die Röntgenbilder im Mittel ($M = 18,01s$, $SD = 4,55s$) länger als die weiblichen Probanden ($M = 14,64s$, $SD = 5,35s$). In Abbildung 17 fällt zudem auf, dass die Werte der Frauen eine größere Varianz haben als bei den Männern.

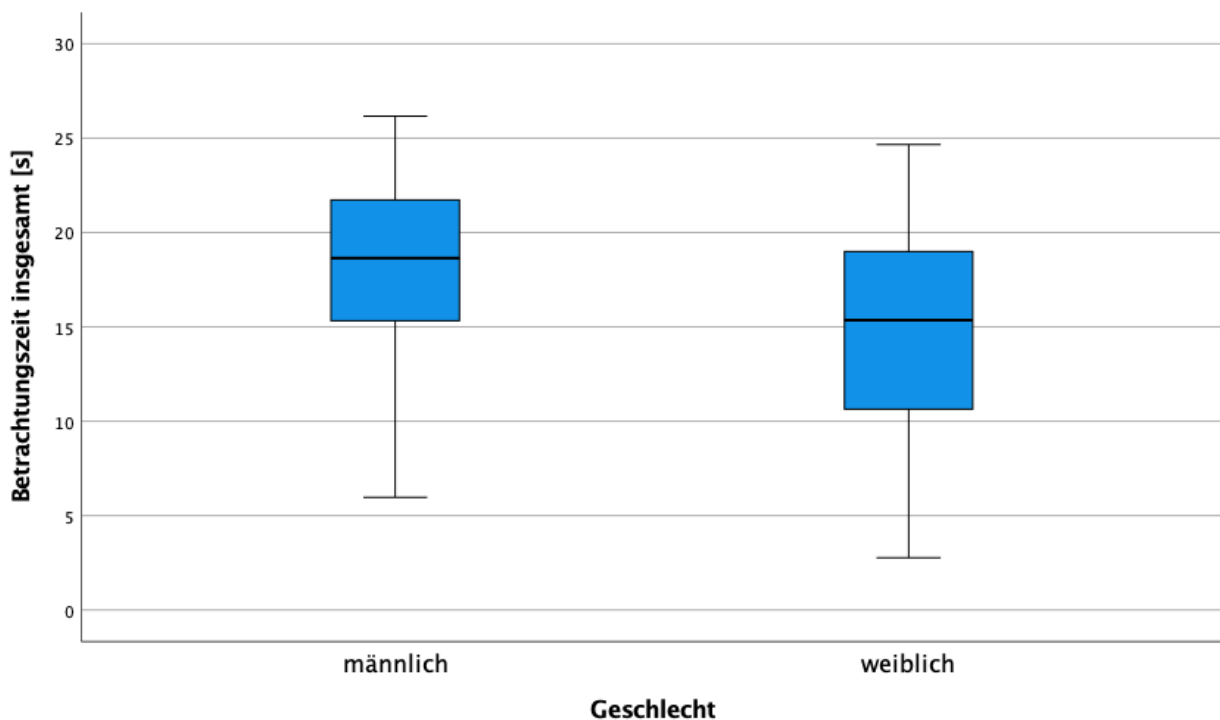


Abbildung 17: Betrachtungszeit insgesamt (s) der Geschlechter

Anschließend wurde die Anzahl der Fixierungen innerhalb einer AOI für beide Probandenkohorten analysiert, um herauszufinden, welche Gruppe eine Area of Interest häufiger fixiert.

Die Analyse ergab einen signifikanten ($p=0,003$) Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Die Zahnärzte fixierten im Versuch eine AOI im Mittel häufiger ($M= 84,88$; $SD=17,64$) als die Studierenden ($M= 78,37$; $SD=21,57$). Es ist daher davon auszugehen, dass Zahnärzte beim Erkennen eines auffälligen Bereiches diesen häufiger ansehen und mehr Aufmerksamkeit darauf verwenden.

In Abbildung 18 sind die Ergebnisse dargestellt und auch hier fällt eine größere Varianz bei den Werten der Studierenden auf.

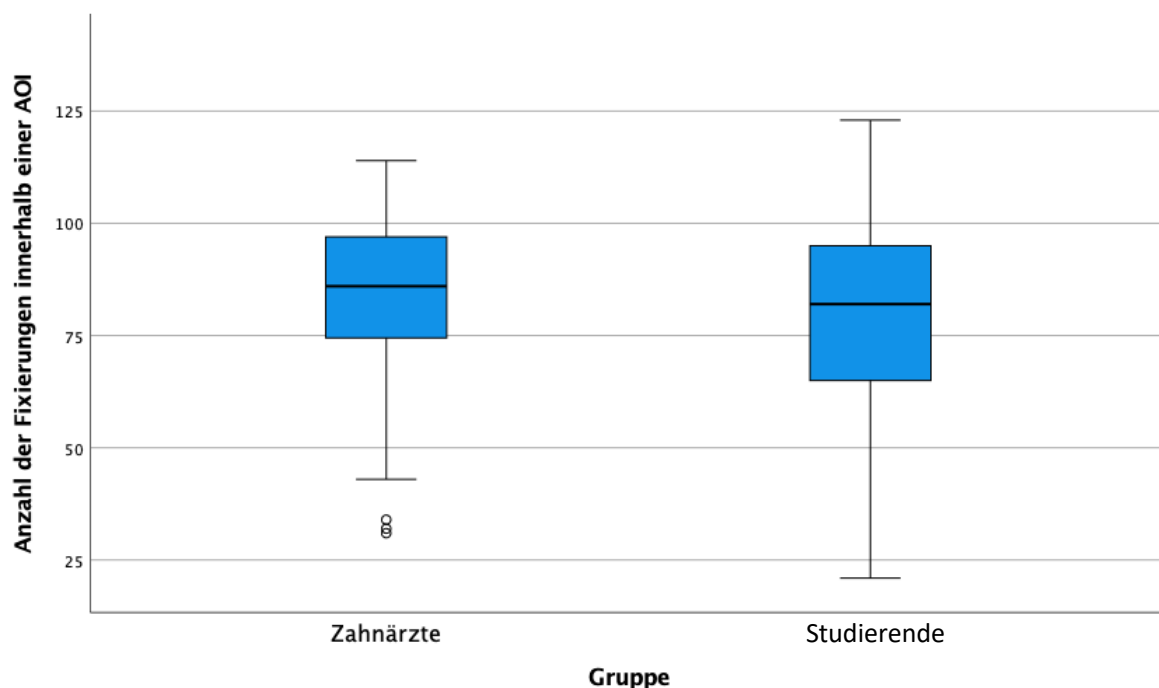


Abbildung 18: Anzahl der Fixierungen innerhalb einer AOI der Gruppen

Ferner wurden für alle metrischen Messdaten eine Tabelle erstellt, die die Werte des zeitlichen Verhaltens zwischen den Gruppen darstellt.

Dabei konnte ein signifikanter Unterschied in der Betrachtungszeit ($p=0,018$), der Anzahl an Fixierungen innerhalb einer AOI ($p=0,003$) und der Anzahl der betrachteten Oktanten ($p<0,001$) zwischen den Zahnärzten und den Studierenden festgestellt werden. In der Zeit, die ein Proband benötigt, um eine AOI zu finden und zu fixieren (Total Time to First Fixation) konnte kein signifikanter Unterschied ($p=0,677$) zwischen den zwei Gruppen erkannt werden. Ebenso ergab die Analyse für die Zeit, die ein Proband zum Betrachten einer Pathologie benötigte (Pathologie Gaze Duration), keinen signifikanten Unterschied ($p=0,847$) zwischen Zahnärzten und Studierenden. Dies bedeutet, dass beide Kohorten eine ähnliche Zeit für das erste Fixieren in einer AOI und eine ähnliche Dauer für die Betrachtung von Pathologien benötigen.

Tabelle 1: Mittelwerte und Standardabweichung für die zeitlichen Parameter

	Betrachtungszeit (s)	Total Time to First Fixation (s)	Pathologie Gaze Duration (s)	Total Fixation Count	Betrachtete Oktanten
Zahnärzte	16,79 (4,32)	0,24 (0,24)	1,32 (1,61)	84 (17,64)	8 (0,75)
Studierende	15,7 (5,75)	0,25 (0,35)	1,35 (1,38)	78 (21,57)	7 (0,92)
alle	16,08 (5,29)	0,25 (0,32)	1,34 (1,47)	80 (20,36)	7 (0,88)

4.2 Betrachtungsmuster

Neben der Anzahl der von jedem Probanden pro Röntgenbild betrachteten Oktanten konnte auch die genaue Position der angesehenen Oktanten mit Hilfe der Eye Tracking Daten ermittelt werden. Aus diesen Daten wurden Häufigkeiten berechnet, die Aufschluss darüber geben, welche Oktanten häufiger bzw. seltener in Augenschein genommen wurden.

In Abbildung 19 sind die Häufigkeiten der Oktanten veranschaulicht. Es ist deutlich zu sehen, dass die vier in der Mitte der Röntgenbilder liegenden Oktanten mit über 97%

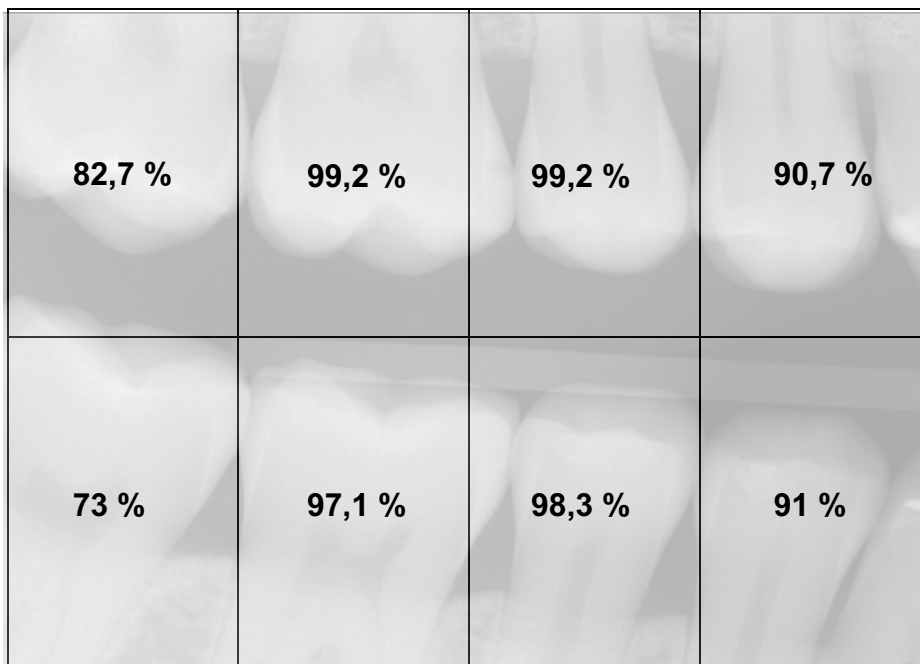


Abbildung 19: Häufigkeiten der betrachteten Oktanten

fast immer von den Probanden betrachtet wurden. Die vier äußeren Oktanten wurden seltener angeschaut, wobei die Probanden die Oktanten rechts außen häufiger betrachteten als die Oktanten links außen. Der links untenstehende Oktant wurde mit 73% am seltensten von Versuchsteilnehmenden betrachtet. Zudem fällt auf, dass die vier oben liegenden Oktanten insgesamt häufiger als die unteren Oktanten beobachtet wurden.

Des Weiteren wurde verglichen, wie sich Zahnärzte und Studierende in der Anzahl der betrachteten Oktanten unterscheiden und welche Gruppe die Röntgenbilder vollständiger anschaute.

Die Auswertung der Messdaten ergab, dass es einen signifikanten ($p < 0,001$; Pearson-Chi-Quadrat Wert 24,06) Unterschied der Oktantenanzahl zwischen den beiden Gruppen gibt. Die Häufigkeiten der betrachteten Oktanten innerhalb der Gruppe von Zahnärzten und Studierenden sowie von allen Probanden insgesamt sind in Tabelle 2 dargestellt. Rund die Hälfte (54%) der von den Probanden betrachteten Röntgenbilder wurden vollständig (alle 8 Oktanten betrachtet) angeschaut. Dabei haben die Zahnärzte deutlich mehr Röntgenbilder (68%) komplett betrachtet als die Gruppe der Studierenden (47%). Das Fehlen eines Oktanten in der Betrachtung ist bei etwa einem Viertel der Betrachtungen aufgetreten. Auffallend ist, dass die Gruppe der Studierenden in mehr Fällen als die Gruppe der Zahnärzte mehr als einen fehlenden Oktanten in ihrer Untersuchung hatte (30% zu 20% bei einem fehlenden Oktanten, 17,9% zu 9,7% bei zwei fehlenden Oktanten, 5,2% zu 2,1% bei drei fehlenden Oktanten). Sogar etwa ein Fünftel der Studierenden entging bei der Betrachtung der Röntgenbilder zwei Oktanten. In einem Fall wurde in der Studierendengruppe nur 4 Oktanten eines Röntgenbildes gesehen. Weniger als 4 Oktanten wurden von den Probanden beider Gruppen nicht gesehen.

Tabelle 2: Häufigkeit der betrachteten Oktanten beider Gruppen

Anzahl der Oktanten

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Zahnärzte	0%	0%	0%	0%	0%	2,1%	9,7%	20%	68,2%
Studierende	0%	0%	0%	0%	0,3%	5,2%	17,9%	30%	46,7%
alle	0%	0%	0%	0%	0,2%	4%	14,9%	26,3%	54,7%

In Abbildung 20 sind die Häufigkeiten nochmals als Balkendiagramm dargestellt.

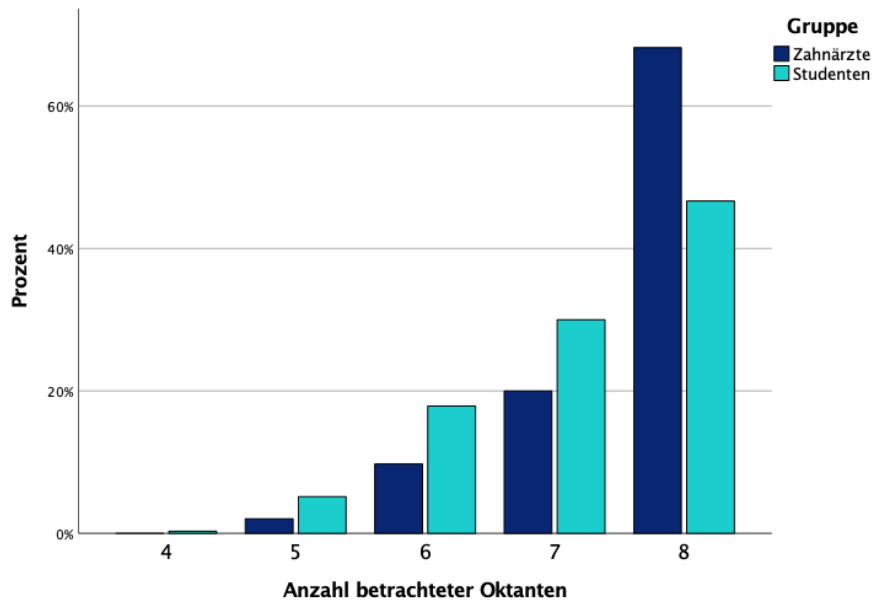


Abbildung 20: Häufigkeit der betrachteten Oktanten (in Prozent) beider Gruppen

Darüber hinaus wurde die Vollständigkeit des Betrachtens zwischen den Geschlechtern verglichen. Die Auswertung ergab, dass es keinen signifikanten Unterschied ($p=0,751$, Pearson-Chi-Quadrat Wert 1,919) in der Anzahl der betrachteten Oktanten zwischen Frauen und Männer gibt. Die Häufigkeit der betrachteten Oktanten ist bei beiden Geschlechtern in etwa gleich groß (siehe Abb. 21).

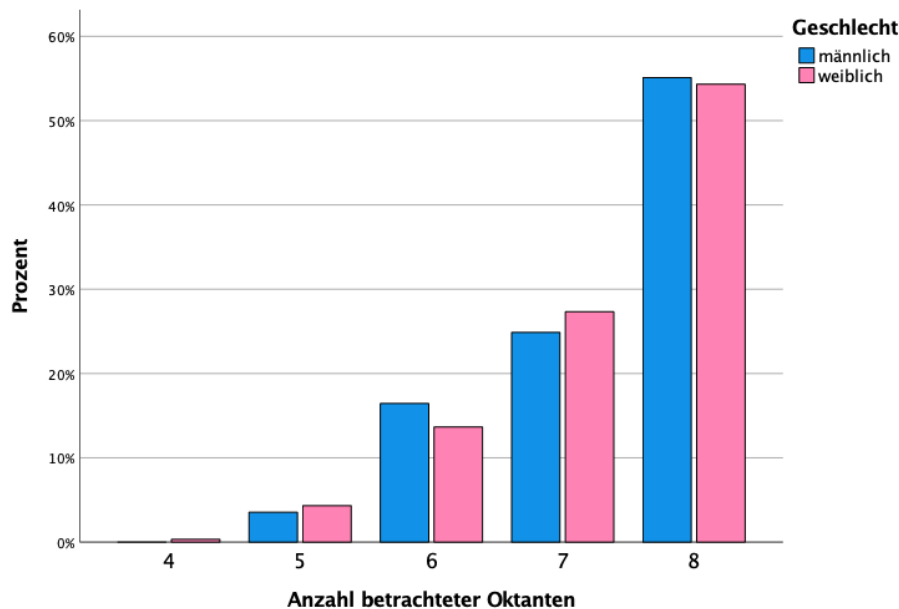


Abbildung 21: Anzahl der betrachteten Oktanten (in Prozent) beider Geschlechter

Ein weiterer Schwerpunkt in der Auswertung war die Untersuchung der Blickreihenfolge. Mit Hilfe des Parameters *Total Time to First Fixation* konnte ermittelt werden, welcher Oktant nach welcher verstrichenen Zeit bei der Betrachtung des Röntgenbildes gesehen wurde. Im Anschluss daran konnte eine Reihenfolge generiert werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass diese Methode nur die Reihenfolge des ersten Betrachtens eines Oktanten beschreibt und eine Wiederbetrachtung eines bereits gesehenen Oktanten nicht mit einbezieht. Für die Auswertung einer Blickstrategie ist diese Methode jedoch ausreichend.

Alle von den Probanden aufgenommenen Reihenfolgen unterscheiden sich signifikant ($p < 0,001$) voneinander. Hieraus ist erkennbar, dass jeder Proband eine andere Blickstrategie verfolgt und es keine dominierende Vorgehensweise der Betrachtung gibt. Jedoch gibt es auch einen signifikanten Unterschied ($p = 0,002$) in der Blickreihenfolge zwischen der Gruppe der Zahnärzte und den Studierenden. Zahnärzte und Studierende scheinen daher eine voneinander abweichende Reihenfolge zu verfolgen. Interessant ist jedoch, dass bei der Betrachtung der Oktantenreihenfolge im Zusammenhang mit dem erreichten Diagnose-Score pro Röntgenbild kein signifikanter Unterschied ($p = 0,089$) in der Reihenfolge besteht. Dies bedeutet, dass der Faktor Diagnoseperformance keinen Einfluss auf die Blickreihenfolge hat. Vereinfacht ausgedrückt bedeutet dies, dass die Probanden keine unterschiedliche Reihenfolge bei einem richtig oder falsch diagnostizierten Röntgenbild vorweisen. Es ist also nur ein nicht signifikant gesicherter Trend in Bezug auf den Unterschied in der Betrachtung von gut und schlecht diagnostizierten Bildern erkennbar. Es ist daher davon auszugehen, dass es im Probandenkollektiv keine bestimmte Oktantenreihenfolge gibt, die die diagnostische Leistung eines Probanden verbessert.

Die oben beschriebenen Beobachtungen werden durch zwei exemplarische Heat Map- bzw. Scanpathbilder (siehe Abschnitt 3.7) bestätigt, die von Probanden beider Gruppen erstellt wurden. In Abbildung 22 ist die Betrachtung eines Zahnarztes visualisiert. Es fällt auf, dass der Proband die Röntgenaufnahme sehr vollständig betrachtete und in jedem Oktanten eine Fixierung machte. Insbesondere die kariesanfälligen Approximalräume wurden vom Zahnarzt intensiv beobachtet, wie die Einfärbungen im Heat Map Bild zeigen. Die Betrachtung der gleichen Röntgenaufnahme eines Studierenden lässt große Unterschiede erkennen (Abb. 23). Der Studierende fokussierte nur das im Unterkiefer liegende Implantat mit verbundener Zahnkrone und ließ die restlichen abgebildeten Zähne außer Acht. Dabei übersah der Studierende die Kariesläsion im Oberkiefer.

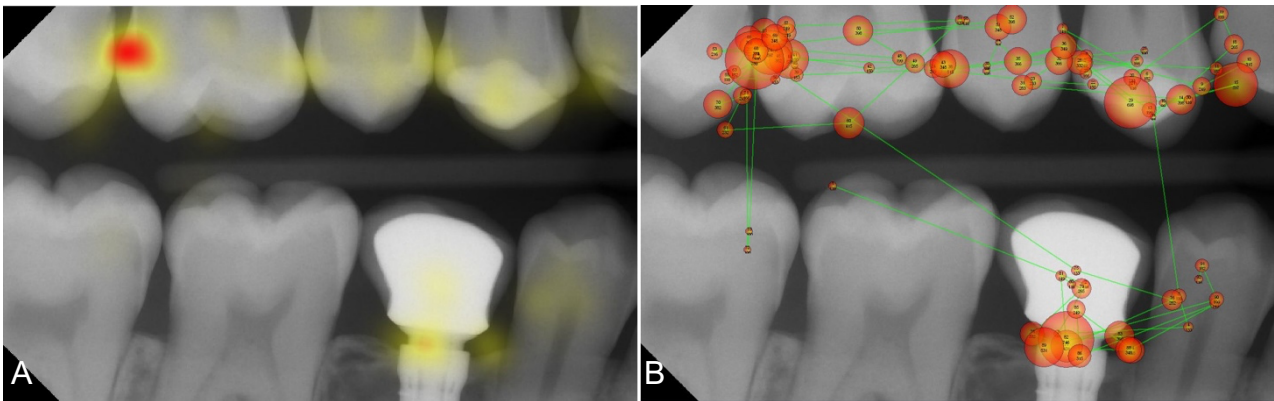


Abbildung 22A & B: Heat Map und Scanpath eines **Zahnarztes** [Färbungen auf der Heatmap visualisieren die Intensität von Fixierungen von gelb nach rot; Rote Kreise des Scanpaths visualisieren Fixierungen mit Nummerierungen zur Rekonstruktion der Blickreihenfolge]

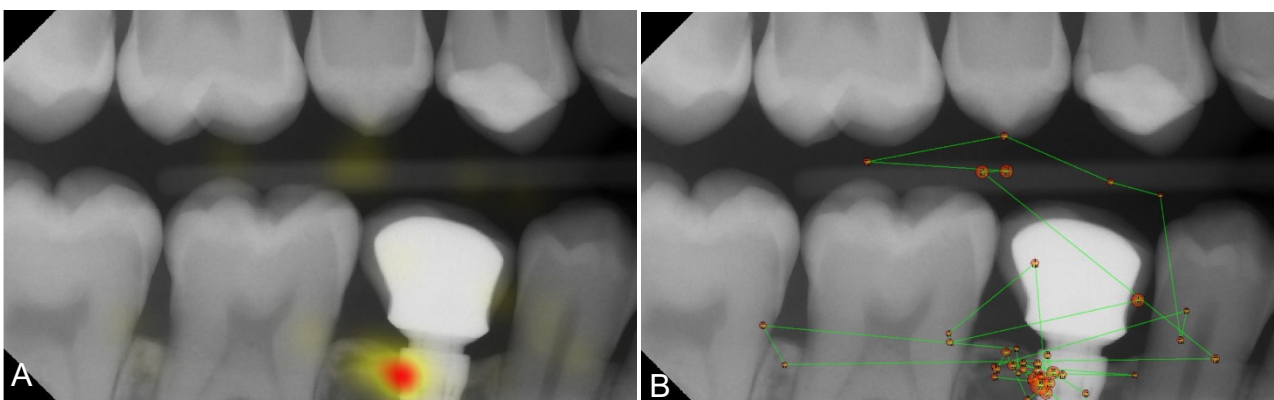


Abbildung 23A & B: Heat Map und Scanpath eines **Studierenden**

Die visuelle Auswertung der Gruppenergebnisse ergab ähnliche Beobachtungen. Die folgenden Heatmap-Bilder (Abb. 24-26) zeigen die zusammengefassten Fixationsschwerpunkte der beiden Probandengruppen. Sie verdeutlichen, dass erfahrene Zahnärztinnen und Zahnärzte die Röntgenbilder umfassender betrachten und Pathologien an Prädilektionsstellen durch routinemäßiges Betrachten von zahnärztlichen Röntgenaufnahmen suchen, erkennen und somit diagnostizieren können.

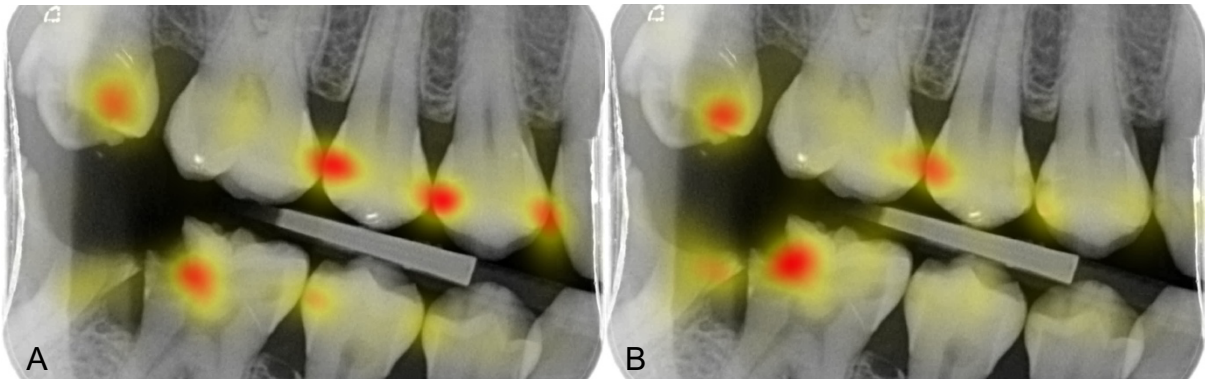


Abbildung 24A (Zahnärzte) 24B (Studierende): Das Heatmap-Bild der Zahnärzte zeigt intensive Fixierungen in den Approximalräumen der Zähne, wo sich kariöse Läsionen befinden. Das Bild der Studierenden ist an diesen Stellen aufgrund der geringeren Fixierung schwächer gefärbt, wobei die Intensität der Fixierung an den gut erkennbaren Zahnhartsubstanzdefekten im Unterkiefer stärker ist.

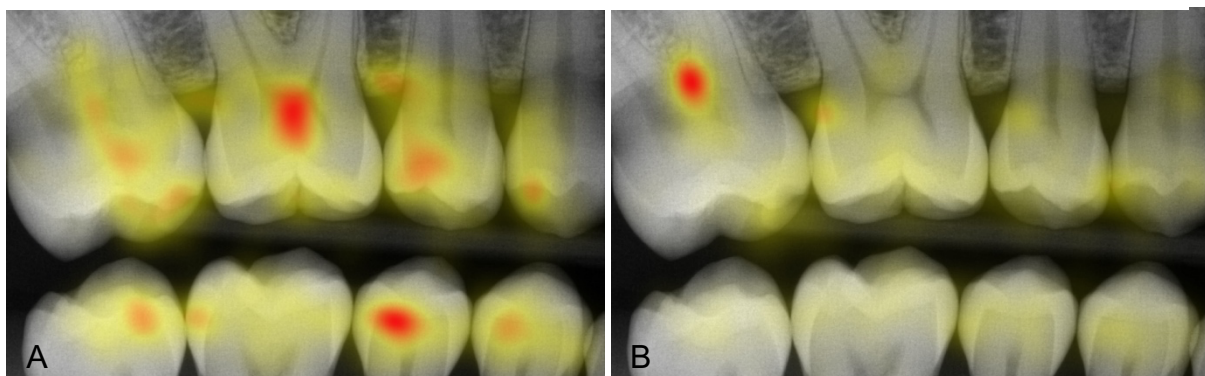


Abbildung 25A (Zahnärzte) 25B (Studierende): Beim Vergleich der beiden Heatmaps fällt auf, dass in der Heatmap der Zahnärzte alle abgebildeten Zähne stärker und großflächiger fixiert wurden, während in der Heatmap der Studierenden die stark gefärbten Fokuspunkte fehlen.

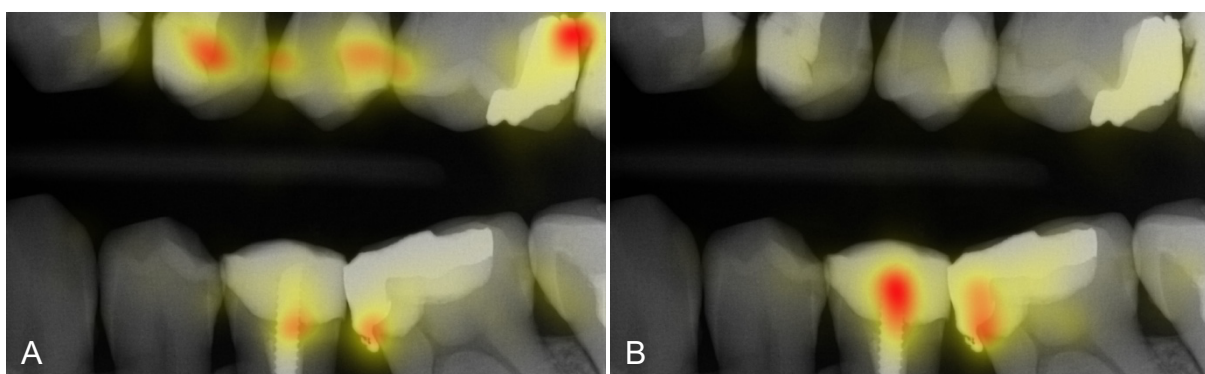


Abbildung 26A (Zahnärzte) 26B (Studierende): Die Heatmap der Zahnärzte zeigt eine intensive Fixierung an den insuffizienten Füllungen, während die Studierenden sich auf den Stift-Stumpf-Aufbau im Unterkiefer konzentrierten und die Pathologien im Oberkiefer vernachlässigten.

4.3 Aufstellung der Verdachtsdiagnose

Schließlich wurde der erhobene Diagnose-Score, der Aufschluss über die diagnostischen Fähigkeiten der einzelnen Probanden gibt, näher betrachtet.

Es gibt einen signifikanten Unterschied ($p < 0,001$) in der Anzahl an erreichten Diagnosepunkten zwischen den zwei Gruppen. Bei der maximal erreichbaren Anzahl von 64 Diagnosepunkten haben die Zahnärzte im Mittel etwa 40 Punkte ($SD=8,57$) und die Studierenden 26 Punkte ($SD=9,928$) erreicht. Dieses Ergebnis macht deutlich, dass Zahnärzte aufgrund ihrer längeren Erfahrung Röntgenbilder besser diagnostizieren können. Im Hinblick auf die größere Varianz der Diagnose-Werte in der Gruppe der Studierenden kann man sagen, dass es zwar bereits Studierende gibt, die einen ähnlichen Diagnose-Score wie die Zahnärzte haben und somit ähnlich gute diagnostische Leistung aufweisen, aber noch nicht alle Studierende dieses Niveau erreicht haben. In Abbildung 27 sind die Ergebnisse nochmals in einem Box-Plot Diagramm veranschaulicht.

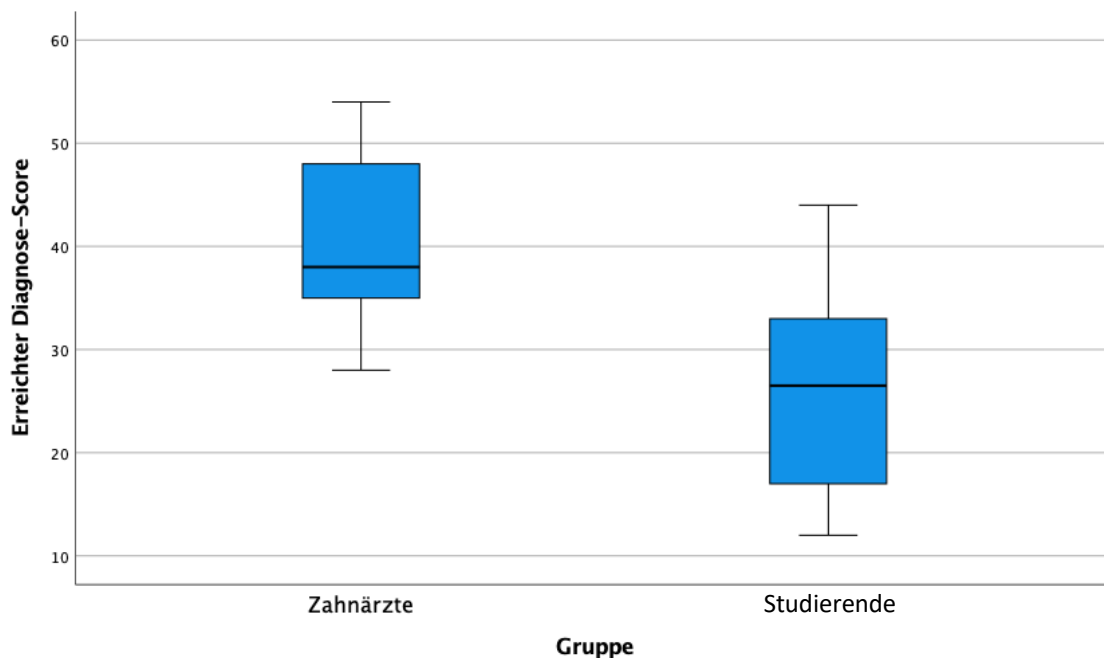


Abbildung 27: Erreichter Diagnose-Score der Gruppen

Danach wurde untersucht, in welcher Pathologiekategorie die Probanden Pathologien erkennen und benennen können. Die auf den Röntgenbildern hauptsächlich erkennbaren Pathologien waren Karies, Knochenabbau und Insuffiziente Füllungen.

In der untenstehenden Tabelle (Tabelle 3) sind die Häufigkeiten der richtig diagnostizierten Pathologien eingetragen. Insgesamt wurden etwa die Hälfte der Diagnosen (48,8%) richtig erkannt und genannt. Die Gruppe der Zahnärzte hat mit 62,6% mehr Pathologien diagnostiziert als die Gruppe der Studierenden mit 40,6%. Besonders die Pathologien Karies (43,4%) und Insuffiziente Füllungen (52,1%) wurden von allen Probanden besser erkannt als Röntgenbilder mit sichtbarem Knochenabbau (20%). Die Zahnärzte haben in allen Pathologiekategorien mehr Diagnosepunkte erhalten als die Studierenden (59% zu 34%, 31% zu 14% und 64% zu 46%), sodass die Ärzte eine höhere diagnostische Fähigkeit besitzen als die Studierenden. Nur ein Drittel der Kariespathologien (34,2%) wurde von den Studierenden richtig diagnostiziert. Insuffiziente Füllungen wiederum konnten beiden Gruppen am besten erkennen und benennen (64% und 46%).

Tabelle 3: Häufigkeiten der korrekt erkannten Pathologien

	Zahnärzte	Studierende	alle
<i>Karies</i>	58,9% (18,4%)	34,2% (17,6%)	43,3% (21,3%)
<i>Knochenabbau</i>	30,8% (32,5%)	13,64% (22,8%)	20% (27,7%)
<i>Insuffiziente Füllungen</i>	63,5% (27,7%)	45,5% (23%)	52,1% (26%)
<i>Diagnose-Score</i>	62,6% (13,4%)	40,6% (15,5%)	48,8% (18,1%)

In dem Balkendiagramm (Abb. 28) sind die Ergebnisse zusätzlich graphisch dargestellt.

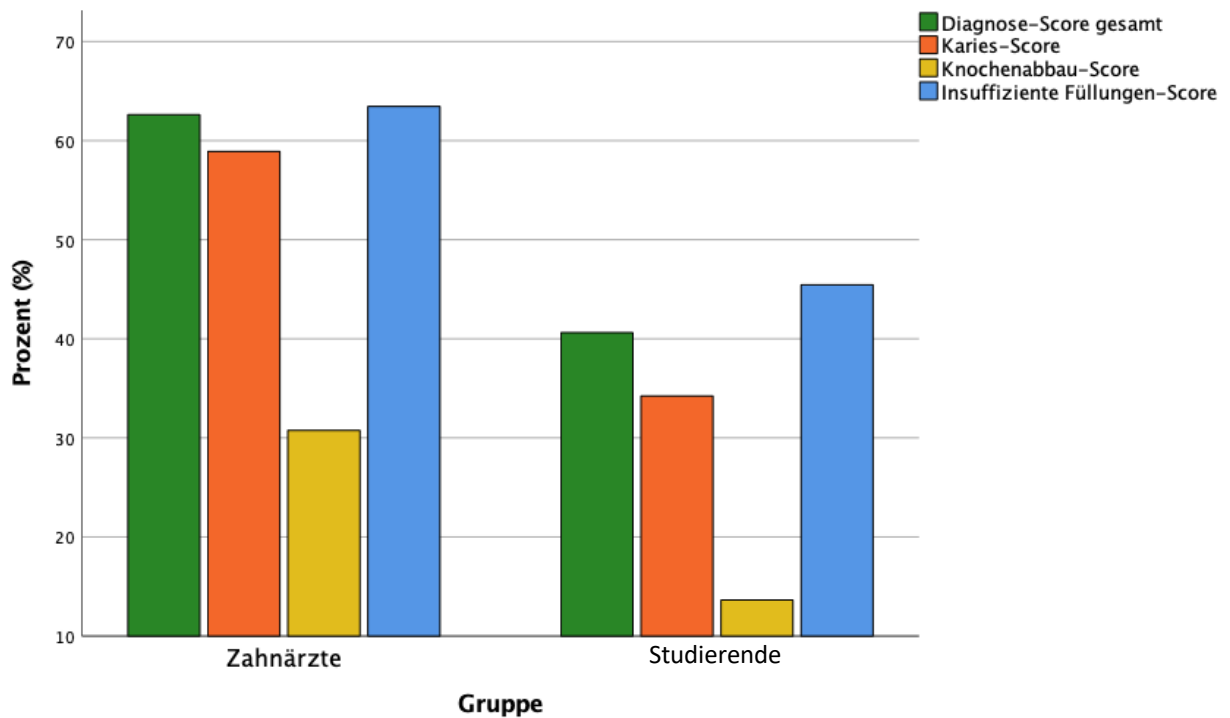


Abbildung 28: Häufigkeit (in Prozent) der korrekt erkannten Pathologien

Zum Schluss wurde überprüft, ob es eine Korrelation zwischen dem erreichten Diagnose-Score und der Berufserfahrung der Zahnärzte gibt.

Die Pearson-Korrelationsanalyse ergab, dass es keinen signifikanten Zusammenhang ($p = -0,092$) gibt. Dies bedeutet, dass eine längere Berufserfahrung den Diagnose-Score nicht beeinflusst und verbessert. Interessant ist, dass es eine negative Korrelation gibt, die darauf schließen lässt, dass jüngere Ärzte eine etwas höhere diagnostische Fähigkeit besitzen als Ärzte, die eine langjährige Berufserfahrung haben.

5 Diskussion

Ziel dieser Studie war es, die unterschiedlichen Betrachtungsweisen von Bissflügelaufnahmen zu analysieren und die Ergebnisse zweier Kohorten (Zahnärzte und Studierende) zu vergleichen. Dabei wurden Eye-Tracking Daten, die Aufschluss über die Betrachtungszeit, die Betrachtungsvollständigkeit und die Betrachtungsmuster geben sowie der Diagnosescore, der die Diagnoseleistung jedes Probanden ermittelt, erhoben.

Alle 35 Probanden betrachteten die 15 Bissflügelaufnahmen, sodass insgesamt 525 Eye-Tracking Aufnahmen aufgezeichnet wurden und diese für die Beantwortung der Forschungsfragen benutzt werden konnten.

Die erste Nullhypothese der vorliegenden Studie lautete, dass es keine Unterschiede in den Fixationen und Betrachtungsdauer beim Betrachten von Pathologien und gesunden Zähnen zwischen den Zahnärzten und Studierenden gibt. Diese Nullhypothese ist abzulehnen, da sich die Eye-Tracking Ergebnisse der beiden Probandengruppen signifikant unterscheiden ($p=0,003$ und $p=0,018$). Zahnärzte verbringen mehr Zeit mit der Betrachtung der Bissflügelaufnahmen und erhalten dadurch auch ein vollständigeres Bild. Obwohl Zahnärzte und Studierende etwa die gleiche Zeit zum Auffinden von interessanten Arealen (AOI) auf den Röntgenaufnahmen benötigen, fixieren Zahnärzte diese Areale öfter, was für ein genaueres Analysieren des Bereiches spricht. Aufgrund des genaueren und vollständigeren Betrachtens der Aufnahmen fanden die Zahnärzte mehr Pathologien und erreichten einen höheren Diagnose-Score. Demnach erkannten die Zahnärzte rund 63% der Pathologien, was um mehr als 20% über dem Ergebnis der Studierenden lag. In allen Pathologiekategorien zeigten die Zahnärzte deutlich bessere diagnostische Leistungen als die Studierenden, die an der Studie teilnahmen.

Die zweite Nullhypothese lautete, dass es keine Unterschiede der Betrachtungsmuster zwischen den Probandenkohorten gibt. Diese Nullhypothese kann nicht angenommen werden, da signifikante Unterschiede zwischen den Oktantenreihenfolgen von Studierenden und Zahnärzten vorliegen. Alle aufgenommenen Betrachtungen der Probanden unterscheiden sich jedoch voneinander, sodass es keine dominierende Strategie bei der Betrachtung der Röntgenbilder gibt und jeder Proband scheinbar einer individuellen Betrachtungsweise folgt. Gründe dafür können sein, dass jedes Bild

anders aussehende Zähne mit unterschiedlichen Graustufen enthält. Dem Betrachtenden können beim Analysieren der Bilder kontrastreiche Areale auffallen, wie zum Beispiel eine im Röntgenbild hell dargestellte Metallkrone neben einem dunklen, röntgenologisch transluzenten natürlichen Zahn, die sich in jedem Bild an einer anderen Stelle befinden. Dadurch wird die visuelle Aufmerksamkeit immer wieder auf verschiedene Bildpunkte gelenkt und der Betrachtende folgt den visuellen Reizen anstatt einer reproduzierbaren Betrachtungsreihenfolge. Die Vermutung, dass ein solches Phänomen nur die erste Fixierung des Betrachtenden beeinflusst, kann verneint werden, da bei der Auswertung der Blickreihenfolge auch die später betrachteten Oktanten in keiner vergleichbaren Reihenfolge betrachtet wurden und zudem oft mehr als eine optische Auffälligkeit auf den Röntgenbildern abgebildet war.

In der Literatur gab es bisher einige Studien, die mit Hilfe von Eye-Tracking Verfahren die Betrachtung von Röntgenbildern analysierten (7, 45-49, 51). Dabei untersuchten die meisten dieser Studien die Betrachtung von Panoramaschichtaufnahmen und verglichen die Betrachtungsweisen von Studierenden innerhalb verschiedener Zeitpunkte ihrer Ausbildung (7, 45, 46) oder stellten die Unterschiede zwischen Zahnärzten und zahnmedizinische Fachangestellte (51) dar. Nur wenige Studien befassten sich mit kleineren zahnärztlichen Röntgenaufnahmen, wie der Einzelzahnaufnahme (47, 48). Während der Datenerhebung für die vorliegende Studie wurde eine neue Studie veröffentlicht, die sich erstmals mit der Betrachtung von Bissflügelaufnahmen befasst (49). Die Studie untersuchte allein die Betrachtungsweise von Zahnärzten und verglich diese nicht mit einer anderen Probandenkohorte.

Bei den nachfolgend diskutierten Studien handelt es sich nicht um Vergleiche zwischen Studierenden, die sich noch in der Ausbildung befinden, und fertig ausgebildeten Zahnärzten. Zwar erhob die Studie von **Hermanson et al.** (47) sowohl Eye-Tracking Daten von Zahnärzten als auch Zahnmedizinistudierenden, jedoch wurden die Ergebnisse zusammengefasst und nicht miteinander verglichen. Zwei Studien untersuchten ausschließlich die Betrachtung von Zahnärzten (48, 49), während sich andere nur auf die Betrachtung von Studierenden (7, 45, 46) konzentrierten.

Viele Studien befassten sich hauptsächlich mit den visuellen Eye-Tracking Daten und analysierten keine Diagnosestellungen zu den präsentierten Bildern (47-49). Dadurch konnte zwar ermittelt werden, auf welche Art und Weise zahnärztliche Röntgenbilder betrachtet werden, nicht aber, ob das Gesehene auch richtig interpretiert werden kann. Die Studien überprüften, ob die Probanden die Pathologien auf den Röntgenbildern finden konnten, jedoch konnten sie nicht untersuchen, ob sie auch wussten, was sie sahen. Mit Hilfe der visuellen Daten kann angenommen werden, dass der Betrachtende aufgrund seiner Fixierung auf ein Objekt dieses analysiert, jedoch kann die kognitive Verarbeitung des Gesehenen nicht ohne Kontrolle angenommen werden (21). Aufgrund dieser Aspekte hielten wir es für sinnvoll, zusätzlich zur Blickaufnahme die aufgestellte Diagnose von jedem Probanden zu erfassen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studie in Bezug auf die zeitliche Betrachtung stehen im Einklang mit den Erkenntnissen aus ähnlichen Studien.

Die Studie mit Bissflügelaufnahmen von **Arsiwala-Scheppach et al.** (49) ergab, dass die untersuchten Zahnärzte im Mittel 0,36s benötigten, um eine AOI auf einer Bissflügelaufnahme zu sehen. Dieses Ergebnis stimmt mit den erforschten Ergebnissen der Studie überein, bei der sowohl Zahnärzte als auch Studierende etwa gleich schnell ($M=0,25s$) die interessanten Areale fanden. Allerdings war die Anzahl der Fixierungen innerhalb einer AOI in unserer Studie mit durchschnittlich 80 Fixierungen deutlich geringer als in der Studie von **Arsiwala-Scheppach et al.** (49) mit 167 Fixierungen. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Probanden der Arsiwala-Scheppach Studie keine Zeitbegrenzung für die Betrachtung der Bissflügelaufnahmen hatten und sie somit im Mittel 49s mit der Betrachtung verbrachten, während die Probanden unserer Studie eine begrenzte Betrachtungszeit von 30s hatten und die Röntgenbilder im Mittel 16,23s betrachteten. Aus diesem Grund stand den Probanden der Arsiwala-Scheppach Studie mehr Zeit zur Verfügung, die AOIs länger und häufiger zu betrachten.

Die Studie mit Panoramaschichtaufnahmen von **Richter et al.** (7) verglich die Betrachtung von Studierenden vor und nach der Teilnahme an einem Röntgenkurs, ähnlich dem in Abschnitt 2.3 beschriebenen. Da alle an unserer Studie teilnehmenden Studierenden den Röntgenkurs des 6. Semesters bereits absolvierten, werden die Ergebnisse mit der Gruppe nach dem Röntgenkurs verglichen. Die Richter Studie

ermittelte eine durchschnittliche Fixierungsdauer von 1,66s für eine Pathologie auf einer PSA, was der in unserer Studie ermittelten Fixierungsdauer von 1,34s für Pathologien auf Bissflügelaufnahmen ähnelt. Die vergangene Zeit bis zur Fixierung einer Pathologie war mit 1,66s bei den Panoramaschichtaufnahmen vermutlich aufgrund der größeren Bildfläche und der größeren Darstellung des Kiefers deutlich länger als die in unserer Studie ermittelte Zeit von 0,25s bei den kleineren Bissflügelaufnahmen.

Eine weitere Studie von **Vogel und Schulze** (46) analysierte die Betrachtung von Panoramaschichtaufnahmen und verglich Studierende vor und nach ihrem Röntgenkurs sowie Studierende kurz vor ihrem Staatsexamen. Sie stellte fest, dass die Betrachtungszeit von Röntgenbildern mit zunehmendem Ausbildungsstand zunimmt und dass Studierende, die ihr Studium fast abgeschlossen haben, länger auf die Panoramaschichtaufnahmen blickten als Studierende, die sich noch in der Mitte ihrer Ausbildung befinden. Dieses Ergebnis wird auch von der vorliegenden Studie bestätigt, in der die Zahnärzte die Bissflügelaufnahmen länger betrachteten als die Studierenden. Darüber hinaus bestätigt sich auch der Befund, dass die männlichen Probanden Röntgenbilder über einen längeren Zeitraum betrachten als ihre weiblichen Kolleginnen. Dies gilt sowohl für Panoramaschichtaufnahmen als auch für Bissflügelaufnahmen. Die vergangene Zeit bis zur Fixierung einer Pathologie war in der Studie von **Vogel und Schulze** (46) bei den Studierenden, die den Röntgenkurs noch nicht absolvierten, deutlich länger als in der Gruppe der Studierenden nach dem Röntgenkurs und geringfügig länger als bei den fortgeschrittenen Studierenden. Dies deutet darauf hin, dass die Studierenden nach ihrem Röntgenkurs mehr Erfahrung hatten und in der Lage waren, Pathologien schneller zu finden und zu fixieren. Eine Erklärung für die deutlich kürzere Zeit bei den Studierenden nach dem Röntgenkurs könnte sein, dass sie nach dem halbjährigen Kurs über ein hohes Maß an Kenntnissen in der Erkennung von Pathologien auf zahnärztlichen Röntgenbildern verfügten und in dem Befunden durch wiederholtes Üben in der Befunderhebung routiniert waren. Da diese Routine nach dem Röntgenkurs nicht mehr vorhanden war, könnte es sein, dass die Studierenden, die kurz vor ihrem Studienabschluss standen und deren Röntgenkurs schon weiter zurückliegt, an Schnelligkeit in dem Auffinden von Pathologien verloren haben. Eine andere plausible Erklärung für dieses Phänomen wäre, dass fortgeschrittene Studierende eine Systematik bei der Befundung von

Röntgenbildern erworben haben und ihr Blick nicht optischen Auffälligkeiten folgt, sondern einem strategischen Ablauf, der in der Studie nicht eindeutig erfasst werden konnte. In der vorliegenden Studie wird dieses Ergebnis nicht geteilt, da Zahnärzte und Studierende fast identische Werte für die Zeit bis zur Fixierung erhielten. Die Studierenden unserer Studie absolvierte ihren Röntgenkurs ein Jahr zuvor und zeigten die gleiche Schnelligkeit im Auffinden von auffälligen Arealen wie die fertigen Zahnärzte.

Auch die Fixierungsdauer einer Pathologie war in den beiden Probandengruppen der vorliegenden Studie nahezu identisch. Zahnärzte und Studierende betrachteten eine Pathologie auf Bissflügelaufnahmen im Durchschnitt 1,34s, während die fortgeschrittenen Studierenden in der Studie von **Vogel und Schulze** (46) die Pathologien auf Panoramaschichtaufnahmen länger betrachteten (2,62s) als die Studierenden nach dem Röntgenkurs (1,48s). Die kürzere Fixierungsdauer der PSA bei den unerfahrenen Studierenden ist möglicherweise durch das Phänomen „Satisfaction of search“ bedingt. Bei dem unerfahrenen Betrachter kann es folglich passieren, dass nach dem Erkennen einer ersten Pathologie die Suche auf dem Röntgenbild beendet ist, da der Betrachter mit dem Auffinden bereits sein Ziel erreicht hat (46). Die Unterschiede in der Fixierungsdauer von Pathologien auf PSA und Bissflügelaufnahmen können jedoch darauf zurückzuführen sein, dass auf einer Panoramaschichtaufnahme ein breites Spektrum an Pathologien, z.B. an den Kieferhöhlen oder den Kiefergelenken, dargestellt werden kann, die eine längere Betrachtungsdauer erfordern.

Die Analyse der von den Probanden betrachteten Oktanten ergab, dass insbesondere die vier mittleren Oktanten am häufigsten betrachtet wurden, während die vier außenstehenden Oktanten von den Probanden mit geringerer Aufmerksamkeit betrachtet wurde. **Vogel und Schulze** (46) machten in ihrer Studie mit Panoramaschichtaufnahmen eine ähnliche Beobachtung. Die mittleren Bildflächen, die auf einer PSA das Gebiss darstellten, wurden häufiger betrachtet als die äußeren Bildflächen, die die Kieferknochen, Kieferhöhlen und Kiefergelenke abbildeten.

Diese Feststellung beschrieb auch **Davis et al.** (61), denn sie erkannten, dass der Mensch beim Betrachten eines Bildes dazu neigt, sich auf die kleinen, hellen und zentral gelegenen Objekte im Bild zu fokussieren. Dies erklärt möglicherweise auch,

warum in der vorliegenden Studie sowohl Studierende als auch Zahnärzte insuffiziente Füllungen besser diagnostizierten als Karies. Der Grund dafür liegt darin, dass Füllungen wegen ihrer Röntgenopazität auf Röntgenbildern heller erscheinen und die Aufmerksamkeit des Betrachtenden auf sich ziehen, während Kariesläsionen aufgrund ihrer geringeren Mineralisierung dunkler erscheinen und beim Betrachten übersehen werden können. Darüber hinaus wurden Erkrankungen wie der Knochenabbau von beiden Probandengruppen am wenigsten korrekt diagnostiziert, da sie vermutlich auf den Röntgenbildern oft nicht gesehen wurden. Wegen der größeren Übersicht des Zahnhalteapparats und der besseren Darstellung der knöchernen Strukturen wird zudem die Panoramaschichtaufnahme der Bissflügelaufnahme für die Diagnostik des parodontalen Zustandes vorgezogen (50). An dieser Stelle muss jedoch erwähnt werden, dass Einzelzahnaufnahmen auch für die Diagnostik verwendet werden (62), insbesondere zur Berechnung des prozentualen Knochenabbaus.

Der Studie von **Arsiwala-Scheppach et al.** (49) fiel zudem auf, dass die Probanden bei der Betrachtung der Bissflügelaufnahmen oberflächliche Karies später als tiefer liegende Läsionen sahen und diese aufgrund des höheren Kontrastes auch länger betrachteten. Sie stellten außerdem fest, dass die hell dargestellten Restaurationen von den Probanden häufiger fixiert wurden als die Kariesläsionen. Diese Beobachtungen verstärken die zuvor beschriebene Vermutung (siehe Seite 49), dass kontrastreiche Bereiche auf Röntgenbildern eine höhere visuelle Aufmerksamkeit auf sich ziehen.

Bezüglich der Vollständigkeit der betrachteten Röntgenbilder wurde in der vorliegenden Studie festgestellt, dass Zahnärzte die gesehenen Bilder vollständiger betrachten als die Studierenden. Dieses Ergebnis wird auch durch die Studie von **Vogel und Schulze** (46) bestätigt, in der die Studierenden, die kurz vor dem Examen standen, die Röntgenbilder vollständiger betrachteten als die jüngeren Studierenden nach dem Röntgenkurs. Ein Vergleich zwischen männlichen und weiblichen Probanden ergab jedoch keine Unterschiede in der Vollständigkeit der Betrachtung. Es ist daher davon auszugehen, dass das vollständige Betrachten von der zahnmedizinischen Erfahrung abhängt und mit dieser zunimmt.

Etwas nur mit den Augen gesehen zu haben, bedeutet noch lange nicht, es auch verstanden zu haben. Das Lesen von Röntgenbildern ist nicht wie das Lesen eines

Buches, bei dem der Mensch die Buchstaben sieht und sie vorliest. Jeder sieht das gleiche Wort und liest es identisch vor. Im Gegensatz dazu ist es schwieriger, Röntgenaufnahmen zu lesen, da sie interpretiert werden müssen. Dieser Interpretationsprozess wird jedoch von vielen verschiedenen Faktoren beeinflusst. Beispielsweise hängt der Erfolg der Interpretation von der Konzentration des Betrachtenden ab und kann durch Müdigkeit oder einer späten Uhrzeit beeinträchtigt werden. Die Kenntnis der Krankengeschichte des Patienten hilft wiederum bei der gezielten Suche nach der Pathologie auf dem Röntgenbild und erhöht die Erfolgsrate (63).

Eine Studie von **Horiuchi et al.** (48) bestätigte diese Beobachtung mit ihrem Eye-Tracking Experiment, indem sie herausfand, dass Zahnärzte, die vor der Betrachtung von zahnmedizinischen Einzelzahnaufnahmen Informationen über die Krankengeschichte des Patienten erhielten, das Röntgenbild kürzer betrachteten als die Kontrollgruppe, da sie bereits wussten, wonach sie suchen mussten.

Neben den geeigneten Umständen sind die Kenntnisse der Anatomie des Kiefers und die Erfahrungen mit Röntgenaufnahmen ebenso essenziell für die Aufstellung einer korrekten Diagnose. Durch den Vergleich des Gesehenen mit bereits bekannten Röntgenbildern wird die Diagnosestellung vereinfacht und die Sicherheit des Betrachtenden in der richtigen Interpretation des Bildes erhöht. *Fuhrmann* (15) bezeichnet diesen Vergleich des Gesehenen mit den im Gedächtnis abgespeicherten Bildern als einen „natürlichen Vorgang in unserem Gehirn“. Je reicher das Gedächtnis an Röntgenbildern ist, desto mehr Erfahrung hat der Betrachtende und desto sicherer und schneller werden Auffälligkeiten auf Röntgenbildern erkannt und diagnostiziert (15).

Um einen besseren Einblick in den Interpretationsprozess der Betrachtenden zu erhalten, wurden zusätzlich zu den Eye-Tracking Daten die gestellten Diagnosen zu jedem Bild erfasst, um zu überprüfen, ob das Gesehene auch gedeutet werden konnte. Hier konnte in der vorliegenden Studie eruiert werden, dass die Zahnärzte mit 62,5% richtigen Diagnosen mehr Pathologien diagnostizierten als die Studierenden mit nur 40,6%. Grund dafür könnte die längere Erfahrung sein. Einige der bereits erwähnten Eye-Tracking Studien kommen zu ähnlichen Ergebnissen. Die Studie von **Richter et al.** (7) ermittelte, dass die Studierenden vor der Teilnahme am Röntgenkurs 35% und danach 51% der Pathologien erkannten. In der Studie von **Gnanasekaran**

et al. (45) erreichten die Studierenden im letzten Ausbildungsjahr eine Diagnoseperformance von 34,7%. **Vogel und Schulze** (46) fand heraus, dass die fortgeschrittenen Studierenden 35,2% der Diagnosen richtig stellten, während die Studierenden, die den Röntgenkurs abgeschlossen hatten, nur 16,7% der Pathologien richtig diagnostizierten. Überraschend war, dass in der Studie von **Vogel und Schulze** (46) die Studierenden vor ihrem Röntgenkurs jedoch eine höhere Diagnoseperformance von 20,40% erreichten. Diesen Rückgang in der Diagnoseleistung begründet **Vogel und Schulze** (46) damit, dass die Studierenden nach dem Erlernen der röntgenologisch sichtbaren Pathologien unsicher waren, die gesehene Pathologie korrekt zu benennen und deshalb bei Unsicherheit keine Diagnose stellten, die potenziell falsch sein könnte, während sie vor dem Röntgenkurs auf ihre Vermutungen vertrauten. Ähnliche Beobachtungen beschrieb die **Khalifa** Studie (64), bei der die Studierenden nach einem Trainingsprogramm zum Analysieren von Panoramaschichtaufnahmen häufiger unauffällige Röntgenaufnahmen fälschlicherweise als pathologisch diagnostizierten. Scheinbar sinkt die Sicherheit der Studierenden in der Diagnosestellung von Röntgenbildern nach intensivem Training, jedoch scheint dies bei erfahrenen Zahnärzten nicht der Fall zu sein, da sie sich auf ihr Wissen verlassen. Insgesamt ist festzuhalten, dass Zahnmedizinstudierende nur etwa ein Drittel der auf Röntgenbildern dargestellten Krankheitsbilder richtig diagnostizieren. Es ist jedoch zu beachten, dass in den oben genannten Studien Panoramaschichtaufnahmen verwendet wurden, die aufgrund ihres größeren Ausschnitts des Kiefers mehr Pathologien aufzeigen können als die kleineren Bissflügelaufnahmen.

Ein interessanter Befund ergab sich aus der Analyse des erreichten Diagnose-Scores und der Berufserfahrung der Zahnärzte. Von den teilnehmenden Zahnärzten erzielten die jüngeren Zahnärzte mit weniger Berufserfahrung bessere diagnostische Leistungen als die Zahnärzte mit längerer Berufserfahrung. Dies kann möglicherweise damit zusammenhängen, dass Zahnärzte, die schon länger praktizieren und sich bereits auf verschiedene Bereiche der Zahnmedizin wie die Prothetik, Kieferorthopädie oder Chirurgie spezialisiert haben, sich bei der Suche nach Pathologien nur auf ihr Fachgebiet konzentrieren und Krankheitsbilder, mit denen sie sich weniger beschäftigen, übersehen. Obwohl es die Annahme in der Forschung gibt, dass Erfahrung in der Bildinterpretation die diagnostische Genauigkeit verbessert (15), gibt

es einzelne Eye-Tracking Studien, die gezeigt haben, dass weniger erfahrene Probanden äquivalente oder sogar bessere diagnostische Leistungen als erfahrene Ärzte erbringen. Die Studie von **Botelho et al.** (51) ermittelte ebenfalls, dass Zahnärzte im ersten Arbeitsjahr signifikant mehr Pathologien diagnostizierten als zahnmedizinische Fachangestellte mit einer Berufserfahrung von mindestens 15 Jahren. Experten neigen dazu, voreingenommen zu sein und scheinen bereits eine systematische Herangehensweise in der Bilddiagnostik zu haben, bei der sie besonders Bereiche, in denen Anomalien zu erwarten sind, absuchen. Die Eye-Tracking Studie mit Thoraxröntgenbildern von **Kok et al.** (65) ergab, dass unerfahrene Medizinstudierende die Röntgenbilder genauer und länger betrachteten als Experten, die aufgrund ihrer strategischen Betrachtungsweise nur bestimmte Regionen fixierten. Diese visuellen Abkürzungen können womöglich dazu führen, dass seltene oder unwahrscheinlich auftretende Pathologien übersehen werden. In einer anderen Studie von **Drew et al.** (66) wurde festgestellt, dass sich Radiologen bei der Interpretation von Röntgenbildern so stark auf ihre Betrachtungsmuster konzentrierten, dass sie einen im Röntgenbild versteckten Gorilla übersahen. Die in die CT(Computertomographie)-Aufnahmen einer Lunge eingefügten Bilder eines Gorillas wurden von über 80% der Radiologen nicht gesehen. Eine weitere Studie von **Grünheid et al.** (67) bestätigt diese Vermutung, indem sie zeigte, dass erfahrene Kieferorthopäden Panoramaschichtaufnahmen unvollständiger betrachteten und weniger AOIs fixierten als unerfahrene. Die Autoren gehen davon aus, dass insbesondere der Bereich der dargestellten Wurzeln auf der PSA ein wichtiges Betrachtungsfeld für den Kieferorthopäden darstellt und somit andere Bildbereiche für die Befundung in den Hintergrund treten. Allerdings sollte der eigene Überblick eines Röntgenbildes nicht durch eine Spezialisierung auf ein bestimmtes Fachgebiet eingeschränkt werden. Da die Panoramaschichtaufnahme Teil der kieferorthopädischen Erstuntersuchung von Patienten ist, sehen Kieferorthopäden eine große Anzahl von PSA, was eine sorgfältige Betrachtung und die Feststellung von Nebendiagnosen besonders wichtig macht.

Die vorliegende Studie analysierte darüber hinaus die aufgenommenen Blickreihenfolgen der Probanden. Hierbei wurde die in Abschnitt 4.2 beschriebene Methode angewandt, bei der die erste Betrachtung eines Oktanten zur Erstellung einer Blickreihenfolge führte. Die Erstellung einer genaueren Blickreihenfolge, z.B. durch

Nachverfolgung aller betrachteten Bildpunkte, war nicht möglich, da die Probanden häufig bereits betrachtete Areale erneut mit den Augen fixierten und dies nicht zur Erstellung eines Betrachtungsmusters beitrug. Dieser Kompromiss, der bei der Ermittlung der Blickreihenfolge gewählt wurde, stellt folglich nicht die reale Situation dar und kann zu Ungenauigkeiten in den Ergebnissen führen. Die Analyse der Blickreihenfolge ergab, dass die Probanden keine einheitliche Strategie in der Betrachtung verfolgten und die Röntgenbilder immer wieder anders betrachteten. Dieses Ergebnis bestätigt das von **Gnanasekran et al.** (45), die herausfanden, dass die Blickverläufe der Studierenden bei der Betrachtung von Panoramaschichtaufnahmen keine standardisierte Strategie aufwiesen und die Probanden die Bilder eher zufällig scannten. Widersprüchliche Ergebnisse lieferten jedoch die Studien von **Hermanson et al.** (47) und **Arsiwala-Scheppach et al.** (49). In beiden Fällen wurde festgestellt, dass eine Zahn-für-Zahn Strategie am häufigsten angewandt wurde. Es ist jedoch zu beachten, dass in beiden Studien nur Zahnärzte bzw. überwiegend Zahnärzte untersucht wurden und diese aufgrund ihrer Routine in der Röntgeninterpretation eine Betrachtungsstrategie entwickelt haben.

Die vorliegende Studie weist auch Grenzen auf, die die Forschung einschränken und beeinflussen und die im Folgenden diskutiert werden.

Es wurde eine kleine und ausgewählte Anzahl von Bissflügelaufnahmen für die Studie verwendet. Man entschied sich für eine Anzahl von 15 Röntgenbildern, um möglichst viele verschiedene Krankheitsbilder darzustellen. Die Qualität und Größe der Bilder waren unterschiedlich, da sie mit verschiedenen Röntgengeräten und Bildempfängern aufgenommen wurden. Die Probanden hatten keine Möglichkeit, Helligkeit und Kontrast der Bilder während der Bildschirmpräsentation zu verändern. Herkömmliche Befundungsprogramme für Röntgenbilder bieten dem Betrachtenden die Möglichkeit, die Bildeinstellungen zu verändern, um schwer erkennbare Areale besser herausstellen zu können. Die in der Studie verwendeten Röntgenbilder wurden jedoch so ausgewählt, dass alle Pathologien bei den gewählten Einstellungen gut sichtbar waren. Durch den Verzicht auf Modifikationsmöglichkeiten wurde zudem sichergestellt, dass alle Probanden die Bilder in der gleichen Darstellung sahen und somit eine bessere Vergleichbarkeit gegeben war. Die richtigen Diagnosen zu jedem Röntgenbild wurden von einem externen Experten nach bestem Wissen und Gewissen gestellt. Es ist darauf hinzuweisen, dass lediglich ein Gutachter die Diagnose stellte

und damit kein Anspruch auf 100-prozentige Richtigkeit garantiert werden konnte. Diesen Vorbehalt haben die Studienleiter jedoch akzeptiert.

Für die Betrachtung der Bissflügelaufnahmen wurde den Probanden in der vorliegenden Studie ein Zeitlimit von jeweils 30 Sekunden eingeräumt. Damit wurde versucht, eine angemessene Zeit zu wählen, die es den Betrachtenden ermöglicht, die Röntgenbilder stressfrei und genau zu betrachten und gleichzeitig den Probanden eine angemessene Gesamtzeit für die Sitzung der Studie abverlangt. Eine längere Betrachtungszeit hätte auch zu einer größeren Menge an Eye-Tracking Daten geführt, die für die Beantwortung der Studienfragen nicht von Nutzen gewesen wären. In der Studie von **Arsiwala-Scheppach et al.** (49) wurde die Präsentation der Röntgenbilder nicht eingeschränkt und es wurde ermittelt, dass die Probanden die Bissflügelaufnahmen durchschnittlich 49 Sekunden lang betrachteten. Eine Verlängerung der Zeit hätte den Probanden zwar mehr Zeit zum Betrachten gegeben, es bestand jedoch die Gefahr, dass die Aufmerksamkeit beim Betrachten von 15 Bildern mit der Zeit nachlässt. Die visuelle Aufmerksamkeit nimmt zudem laut einer Studie (68) kontinuierlich ab: während die Aufmerksamkeitsspanne 2004 noch bei 2,5 Minuten lag, beträgt sie 2019 nur noch 47 Sekunden. Die Mehrheit der teilnehmenden Probanden gab nach der Studie an, dass sie die Zeitlimitation in Ordnung fanden und ausreichend Zeit für eine vollständige Betrachtung hatten. Einige wenige Probanden, die die Röntgenbilder sehr sorgfältig betrachteten und langsamer in der Betrachtung zu sein schienen, empfanden die Zeitbegrenzung als zu kurz, schienen aber ihr Tempo im Laufe des Experiments anzupassen. Es ist zu erwarten, dass unerfahrene Betrachter bei der Betrachtung von Röntgenbildern möglicherweise mehr Zeit benötigen, um das Bild vollständig nach Pathologien zu durchsuchen. Die vorliegende Studie zeigt jedoch, dass die Studierenden die Röntgenbilder im Durchschnitt eine Sekunde kürzer betrachteten als die Zahnärzte. Dies kann auf das bereits erwähnte Phänomen „satisfaction of search“ zurückgeführt werden.

Eine weitere Einschränkung der vorliegenden Studie ergibt sich aus der begrenzten und ausgewählten Kohorte aus Probanden, die an der Studie teilgenommen haben. Sie repräsentieren nicht allgemein die Betrachtungsweise und die diagnostischen Fähigkeiten der Studierenden der Zahnmedizin und der praktizierenden Zahnärzte, sondern nur einen kleinen Teil der universitären Einrichtung, aus der sie rekrutiert wurden. Des Weiteren waren sich die Probanden der Tatsache bewusst, dass ihre

Augenbewegung aufgenommen wurde. Dies kann das Verhalten der Probanden verändert haben, sodass es nicht ganz der alltäglichen Röntgenbefundung von Zahnärzten entspricht. Es ist möglich, dass die Probanden in dem Experiment darauf achteten, die Röntgenbilder besonders gründlich zu betrachten und möglichst alle Pathologien zu finden, um ein gutes Ergebnis zu erzielen. Dieser so genannte „Hawthorne-Effekt“ (69) kann das Studienergebnis leicht verzerrt haben.

Die Studienleiter entschieden sich dafür, dass die Betrachtenden die Pathologien direkt beim Sehen des Röntgenbildes benennen sollten, anstatt die Befunde erst während des *Black Screens* zu erfassen. Somit hatten die Probanden den Vorteil, sich nicht die Diagnosen bis nach Ablauf der 30 Sekunden zu merken. Dies führte jedoch dazu, dass die Probanden während der Eye-Tracking Aufnahme ihren Kopf beim Sprechen leicht bewegten. Es wurde jedoch versucht, die daraus resultierenden leichten Abweichungen in den Eye-Tracking Daten durch die Verwendung der Kinnstütze und der Doppelreferenzmethode des Eye-Trackers (siehe Abschnitt 2.4.3) so gering wie möglich zu halten.

Auf der Grundlage der Ergebnisse der Studie können Empfehlungen für die Durchführung weiterer Studien und für die Verbesserung der zahnmedizinischen Ausbildung formuliert werden.

In weiterführenden Studien kann die Eye-Tracking Technologie auch in anderen Bereichen der Zahnmedizin eingesetzt werden. Beispielsweise können die Augenbewegungen beim Betrachten klinischer Bilder aufgenommen werden, um zu untersuchen, ob Studierende auch die klinischen Bilder von Pathologien erkennen und diagnostizieren können. Hier kann beurteilt werden, ob die Probanden die dargestellten Strukturen vollständig betrachten und mögliche Erkrankungen des Zahnfleisches erkennen, die auf Röntgenbildern nicht sichtbar sind. Mit mobilen Eye-Trackern ist es möglich, den Blickverlauf während einer praktischen Behandlung am Patienten aufzuzeichnen und anschließend mit einem Lehrenden zu besprechen. Gerade durch die Aufzeichnung kann auf Defizite und Verbesserungen aufmerksam gemacht werden, was einen guten Lerneffekt für die Studierenden mit sich bringt. Schließlich können auch einrichtungsübergreifende Eye-Tracking Studien in Zusammenarbeit mit mehreren Universitäten durchgeführt werden, um die

Betrachtungs- und Befundungsfähigkeiten der Studierenden miteinander zu vergleichen und mögliche bewährte Lernmethoden der Institutionen aufzudecken. Im Zeitalter der künstlichen Intelligenz können zudem Informationen darüber, wie Zahnärzte Röntgenbilder betrachten und diagnostizieren, genutzt werden, um Programme zu entwickeln, die Pathologien selbstständig erkennen und den Zahnarzt bei der Diagnose unterstützen können.

Von den in der zahnärztlichen Ausbildung erworbenen Kenntnissen ist die Röntgendiagnostik ein wichtiger Teil, der für die Erkennung von Krankheiten und die Auswahl geeigneter Therapien notwendig ist. Aus den Forschungsergebnissen der vorliegenden Studie lässt sich ableiten, dass die Ausbildung in diesem Bereich verbessert werden sollte. Obwohl die Studierenden die gesehenen Röntgenbilder schon recht genau und vollständig betrachten, können sie das Gesehene noch nicht durchgängig richtig interpretieren. Das bereits in dieser Arbeit dargestellte Röntgenprogramm nach der Strahlenschutzverordnung kann durch praktische und interaktive Lernmodule erweitert werden. Es sollten mehr Röntgenbilder befundet werden und die Studierenden sollten mehr Möglichkeiten für ein Feedback der Dozenten zu den gestellten Verdachtsdiagnosen erhalten. Mit Hilfe von Eye-Tracking Technologien können die Studierenden ihre Betrachtung kritisch überprüfen und durch die visuelle Darstellung einen höheren Lerneffekt erzielen. Ferner sollten mögliche Strategien zur Betrachtung von Röntgenbildern unterrichtet werden, die die Vollständigkeit der Betrachtung erhöhen und damit den Anteil übersehener Pathologien reduzieren.

Nicht außer Acht zu lassen sind die praktizierenden Ärzte, die ihre zahnärztliche Ausbildung bereits beendet haben. Auch für sie sollten zur Auffrischung der radiologischen Kenntnisse und zur Überprüfung der eigenen diagnostischen Fähigkeiten Fortbildungsprogramme angeboten werden. Hierbei muss erwähnt werden, dass Zahnärzte von der Zahnärztekammer verpflichtet sind, alle fünf Jahre ihre Fachkunde im Strahlenschutz zu aktualisieren (70), jedoch liegt der Schwerpunkt dieser Kurse auf dem Strahlenschutz und könnte mit Programmen zur Diagnosestellung erweitert werden.

6 Zusammenfassung

Ziel

Das Ziel dieser Studie war es, die visuelle Betrachtung bei der Befundung von Bissflügelaufnahmen zu erfassen und Unterschiede zwischen Studierenden und Zahnärzten zu analysieren. Anhand der von den Probanden gestellten Verdachtsdiagnosen konnten Rückschlüsse auf die diagnostischen Fähigkeiten gezogen werden.

Material und Methoden

Die teilnehmenden Probanden (n=35) setzten sich aus 2 Kohorten zusammen, bestehend aus 13 Zahnärzten und 22 Studierenden im dritten klinischen Semester. Sie betrachteten insgesamt 15 digitale Bissflügelaufnahmen, wobei die Betrachtungsdauer jeweils auf 15 Sekunden begrenzt war. Zu jeder Aufnahme stellten sie zudem eine Diagnose auf. Die ausgewählten Röntgenaufnahmen besaßen eine unterschiedliche Anzahl an Pathologien, die von einem Experten diagnostiziert wurden. Mit Hilfe eines Eye-Trackers wurden die Blickpfade der Probanden aufgezeichnet. Auffällige Bereiche auf den Röntgenbildern, die Pathologien darstellen, wurden als Areas of interest (AOI) definiert und im Eye-Tracking Programm hinterlegt. Es wurde die Gesamtbetrachtungszeit, Time to First Fixation, Gaze Duration, Fixation Count und die Blickreihenfolge ermittelt.

Ergebnisse

Die durchschnittliche Betrachtungszeit der Zahnärzte betrug $16,79 \pm 4,32$ s und war länger als die der Studierenden mit $15,7 \pm 5,75$ s. Die Zahnärzte betrachteten die Röntgenbilder vollständiger und fixierten Pathologien häufiger als die Studierenden. Alle Probanden betrachteten die Bissflügelaufnahmen in einer unterschiedlichen Reihenfolge ($p < 0,001$). Der erreichte Diagnose-Score lag bei den Zahnärzten signifikant höher ($p < 0,001$) als bei den Studierenden. Insuffiziente Füllungen konnten besser diagnostiziert werden als Karies oder Knochenabbau.

Schlussfolgerung

Das Ergebnis der Studie zeigt, dass Studierende vor allem Defizite bei der Interpretation von Bissflügelaufnahmen haben. Es wird vorgeschlagen, mehr praktische und interaktive Lernmodule in den Röntgenunterricht zu integrieren und die

Studierenden durch mehr korrigierendes Feedback bei dem Erlernen der Röntgenbefundung zu unterstützen.

7 Literaturverzeichnis

1. Stiftung Gesundheitswissen. Röntgen: Wie es funktioniert [Stand: 11.03.2023]. Verfügbar unter: <https://www.stiftung-gesundheitswissen.de/gesund-leben/koerper-wissen/roentgen-wie-es-funktioniert>.
2. Bundesamt für Strahlenschutz. Häufigkeit und Strahlenexposition für die deutsche Bevölkerung, [Stand: 11.03.2023]. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medicin/diagnostik/roentgen/haeufigkeit-exposition.html2022>.
3. The American Dental Association Council on Scientific Affairs. Dental Radiographic Examinations: Recommendations for Patient Selection and Limiting Radiation Exposure 2012.
4. Pasler FA. Zahnärztliche Radiologie. 7. unveränderte Auflage ed. Stuttgart New York: Georg Thieme Verlag; 2021.
5. ZMK-Aktuell. Der aktuelle Stand der Röntgendiagnostik in der Zahnmedizin. [Stand: 12.03.2023]. Verfügbar unter: https://www.zmk-aktuell.de/fachgebiete/allgemeine-zahnheilkunde/story/der-aktuelle-stand-der-roentgendiagnostik-in-der-zahnmedizin--teil-1_206.html2010.
6. Stheeman SE, Mileman PA, van' t Hof M, van der Stelt PF. Room for improvement? The accuracy of dental practitioners who diagnose bony pathoses with radiographs. Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod. 1996;81(2):251-4.
7. Richter J, Scheiter K, Eder TF, Huettig F, Keutel C. How massed practice improves visual expertise in reading panoramic radiographs in dental students: An eye tracking study. PLoS One. 2020;15(12):e0243060.
8. Schulze R. Lehrbuch zahnärztliches Röntgen : Grundlagen, Technik, Anwendung : Hintergrundinformationen. 1. Auflage ed. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität Mainz; 2019. 327 Seiten p.
9. Meyer-Lückel H, Alkilzy M. Karies : Wissenschaft und klinische Praxis. Stuttgart: Thieme; 2012. XXII, 455 Seiten p.
10. Schwendicke F, Tzschope M, Paris S. Radiographic caries detection: A systematic review and meta-analysis. J Dent. 2015;43(8):924-33.
11. Kerr Dental. Kwik-Bite™. [Stand: 20.03.2023]. Verfügbar unter: <https://www.kerrdental.com/de-de/zahnaerztliche-restaurationsprodukte/kwikbite-diagnose2023>.

12. Ludlow JB, Timothy R, Walker C, Hunter R, Benavides E, Samuelson DB, et al. Effective dose of dental CBCT-a meta analysis of published data and additional data for nine CBCT units. Dentomaxillofac Radiol. 2015;44(1):20140197.
13. Bundesamt für Strahlenschutz. Natürliche Strahlung in Deutschland. [Stand: 21.03.2023]. Verfügbar unter: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/umwelt/natuerliche-strahlung/natuerliche-strahlung.html>. 2022.
14. ZWP Online. Strahlenschutz in der Zahnarztpraxis. [Stand: 21.03.2023]. Verfügbar unter: <https://www.zwp-online.info/zwpnews/wirtschaft-und-recht/praxiseinrichtung/strahlenschutz-in-der-zahnarztpraxis2017>.
15. Fuhrmann A. Zahnärztliche Radiologie. Stuttgart [u.a.]: Thieme; 2013. 189 S. p.
16. Wenz H-J, Hellwig E, Lehmann KM. Zahnärztliche Propädeutik : Einführung in die Zahnheilkunde. 14., aktualisierte Auflage ed. Köln: Deutscher Zahnärzte Verlag; 2019. XIII, 402 Seiten p.
17. Hellwege K-D. Die Praxis der zahnmedizinischen Prophylaxe : ein Leitfaden für die Individualprophylaxe für Zahnärzte und Mitarbeiter. 7., aktualisierte Auflage ed. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag; 2018. 1 Online-Ressource p.
18. Bundesamt für Strahlenschutz. Richtlinie Fachkunde und Kenntnisse im Strahlenschutz bei dem Betrieb von Röntgeneinrichtungen in der Medizin oder Zahnmedizin vom 22. Dezember 2005- korrigiert am 28. November 2012 [Stand: 07.05.2023] Verfügbar unter: https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Strahlenschutz/fachkunde_roev-medizin_komp_bf.pdf.
19. Burwinkel M. Aus der Klinik für Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie der Universitätsmedizin Mainz: Logbuch Röntgendiagnostik und Fachkunde Strahlenschutz2022.
20. Zimmermann U. Eye Tracking Kompetenzzentrum der Schweiz, Eye Tracking Lexikon, Eye Tracking. [Stand: 03.04.2023]. Verfügbar unter: <https://eyetracking.ch/glossar-eye-tracking/2013>.
21. Schumann F, Einhäuser-Treyer W, Vockeroth J, Bartl K, Schneider E, König P. Salient features in gaze-aligned recordings of human visual input during free exploration of natural environments. J Vis. 2008;8(14):12.1-7.
22. Richardson D, Spivey M. Eye-Tracking: Characteristics and Methods. 2008.
23. Płużyczka M. The First Hundred Years: a History of Eye Tracking as a Research Method. Applied Linguistics Papers. 2018;4/2018:101-16.

24. Blake C. Eye-Tracking: Grundlagen und Anwendungsfelder. Handbuch standardisierte Erhebungsverfahren in der Kommunikationswissenschaft 2013. p. 367-87.
25. Duchowski A. Eye Tracking Methodology: Theory and Practice: Springer Verlag; 2007.
26. Stewart EEM, Valsecchi M, Schütz AC. A review of interactions between peripheral and foveal vision. J Vis. 2020;20(12):2.
27. Schünke M, Schulte E, Voll M, Wesker K, Schumacher U. Kopf, Hals und Neuroanatomie. 6., vollständig überarbeitete Auflage ed. Stuttgart New York: Georg Thieme Verlag; 2022. XV, 600 Seiten p.
28. Zimmermann U. Eye Tracking Kompetenzzentrum der Schweiz, Eye Tracking Lexikon, Fixationen. [Stand: 04.04.2023]. Verfügbar unter: <https://eyetracking.ch/glossar-fixation/2014>.
29. Zimmermann U. Eye Tracking Kompetenzzentrum der Schweiz, Eye Tracking Lexikon, Sakkaden. [Stand: 04.04.2023]. Verfügbar unter: <https://eyetracking.ch/glossar-sakkade/2014>.
30. Shehu I, Wang Y, Mohamed A, Fu X. Remote Eye Gaze Tracking Research: A Comparative Evaluation on Past and Recent Progress. Electronics. 2021;10:3165.
31. Mulvey F, Villanueva A, Sliney DH, Lange R, Cotmore S, Donegan M, editors. Exploration of safety issues in Eyetracking 2008: Cogain Communication by Gaze Interaction.
32. Tobii Connect. What is dark and bright pupil tracking. [Stand: 07.05.2023]. Verfügbar unter: <https://connect.tobii.com/s/article/What-is-dark-and-bright-pupil-tracking2022>.
33. SR Research EyeLink. What is Eye Tracking, Pupil-Corneal Reflection (P-CR) Eye Tracking. [Stand: 07.05.2023] Verfügbar unter: <https://www.sr-research.com/about-eye-tracking/>.
34. Interface Consult. Anwendungsbeispiele von Eyetracking [Stand: 17.05.2023] Verfügbar unter: <https://www.usability.at/leistungen/eyetracking-anwendungen.html>
35. Cipia Vision. Driver Sense, Driver Monitoring System [Stand: 17.05.2023] Verfügbar unter: <https://cipia.com/driver-sense/>.
36. Tobii Technology. Training and skills assessment: Aerospace and tactical training [Stand: 17.05.2023] Verfügbar unter: <https://www.tobii.com/solutions/training-and-skills-assessment/aerospace-and-tactical-training>.

37. Ars Technica. Meta's next VR headset. [Stand: 17.05.2023] Verfügbar unter: <https://arstechnica.com/gadgets/2022/08/metas-next-vr-headset-will-launch-in-october/2022>.
38. Operation Auge. Eye-Tracking Systeme [Stand 17.05.2023] Verfügbar unter: <https://www.operationauge.de/wissenswertes/wissenswertes-uber-lasik/eye-tracking-systeme.html>.
39. Lee YC. Active eye-tracking improves LASIK results. *J Refract Surg.* 2007;23(6):581-5.
40. Mao Y, He Y, Liu L, Chen X. Disease Classification Based on Eye Movement Features With Decision Tree and Random Forest. *Front Neurosci.* 2020;14:798.
41. Archibald NK, Hutton SB, Clarke MP, Mosimann UP, Burn DJ. Visual exploration in Parkinson's disease and Parkinson's disease dementia. *Brain.* 2013;136(Pt 3):739-50.
42. Pavisic IM, Firth NC, Parsons S, Rego DM, Shakespeare TJ, Yong KXX, et al. Eyetracking Metrics in Young Onset Alzheimer's Disease: A Window into Cognitive Visual Functions. *Front Neurol.* 2017;8:377.
43. Lu S, Xu J, Li M, Xue J, Lu X, Feng L, et al. Attentional bias scores in patients with depression and effects of age: a controlled, eye-tracking study. *J Int Med Res.* 2017;45(5):1518-27.
44. Sunny MSH, Zarif MII, Rulik I, Sanjuan J, Rahman MH, Ahamed SI, et al. Eye-gaze control of a wheelchair mounted 6DOF assistive robot for activities of daily living. *J Neuroeng Rehabil.* 2021;18(1):173.
45. Gnanasekaran F, Nirmal L, P S, R B, Ms M, Cho VY, et al. Visual interpretation of panoramic radiographs in dental students using eye-tracking technology. *J Dent Educ.* 2022;86(7):887-92.
46. Vogel D, Schulze R. Viewing patterns regarding panoramic radiographs with different pathological lesions: an eye-tracking study. *Dentomaxillofac Radiol.* 2021;50(8):20210019.
47. Hermanson BP, Burgdorf GC, Hatton JF, Speegle DM, Woodmansey KF. Visual Fixation and Scan Patterns of Dentists Viewing Dental Periapical Radiographs: An Eye Tracking Pilot Study. *J Endod.* 2018;44(5):722-7.
48. Horiuchi H. [Influence of diagnostic information on visual action of interpretation]. *Nichidai Koko Kagaku.* 1990;16(2):261-73.

49. Arsiwala-Scheppach LT, Castner N, Rohrer C, Mertens S, Kasneci E, Cejudo Grano de Oro JE, et al. Gaze patterns of dentists while evaluating bitewing radiographs. *J Dent.* 2023;135:104585.
50. Corbet EF, Ho DK, Lai SM. Radiographs in periodontal disease diagnosis and management. *Aust Dent J.* 2009;54 Suppl 1:S27-43.
51. Botelho MG, Ekambaram M, Bhuyan SY, Yeung AWK, Tanaka R, Bornstein MM, et al. A comparison of visual identification of dental radiographic and nonradiographic images using eye tracking technology. *Clin Exp Dent Res.* 2020;6(1):59-68.
52. Paalvast O, Sevenster M, Hertgers O, de Bliet H, Wijn V, Buil V, et al. Radiology AI Lab: Evaluation of Radiology Applications with Clinical End-Users. *J Imaging Inform Med.* 2025.
53. Arsiwala-Scheppach LT, Castner NJ, Rohrer C, Mertens S, Kasneci E, Cejudo Grano de Oro JE, et al. Impact of artificial intelligence on dentists' gaze during caries detection: A randomized controlled trial. *J Dent.* 2024;140:104793.
54. Darici D, Reissner C, Missler M. Webcam-based eye-tracking to measure visual expertise of medical students during online histology training. *GMS J Med Educ.* 2023;40(5):Doc60.
55. Tahri Sqalli M, Al-Thani D, Elshazly MB, Al-Hijji M. Interpretation of a 12-Lead Electrocardiogram by Medical Students: Quantitative Eye-Tracking Approach. *JMIR Med Educ.* 2021;7(4):e26675.
56. Turgeon DP, Lam EW. Influence of Experience and Training on Dental Students' Examination Performance Regarding Panoramic Images. *J Dent Educ.* 2016;80(2):156-64.
57. LC Technologies I. Eyegaze Edge Systems Product Brochure. [Stand: 27.06.2023] Verfügbar unter: <https://eyegaze.com/wp-content/uploads/LCT-Product-Brochure.pdf>.
58. Madsack Bea. Abnahme und Konstanzprüfung an Bildwiedergabesystemen, *Radiopraxis* 2014: Thieme Verlag; 2014.
59. Statistik für Psychologie. Boxplot. [Stand: 29.09.2023] Verfügbar unter: <https://www.statistikpsychologie.de/boxplot/>.
60. Hilgers RD, Heussen N, Stanzel S. Korrelationskoeffizient nach Pearson. In: Gressner AM, Arndt T, editors. *Lexikon der Medizinischen Laboratoriumsdiagnostik.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2019. p. 1389-.

61. Davis SF, Palladino JJ. Psychology: Media and research update, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, US: Prentice Hall/Pearson Education; 2002. 807- p.
62. British Society of Peridontology. The good practitioners guide to periodontology, Verfügbar unter: https://www.bsperio.org.uk/assets/downloads/good_practitioners_guide2016.pdf 2016.
63. Goldman M, Pearson AH, Darzenta N. Endodontic success--who's reading the radiograph? Oral Surg Oral Med Oral Pathol. 1972;33(3):432-7.
64. Khalifa HM. The Effectiveness of Systematic Search Strategy Training for the Analysis of Panoramic Images: University of Toronto; 2013.
65. Kok EM, Jarodzka H, de Bruin AB, BinAmir HA, Robben SG, van Merriënboer JJ. Systematic viewing in radiology: seeing more, missing less? Adv Health Sci Educ Theory Pract. 2016;21(1):189-205.
66. Drew T, Vö ML, Wolfe JM. The invisible gorilla strikes again: sustained inattentive blindness in expert observers. Psychol Sci. 2013;24(9):1848-53.
67. Gruenheid T, Hollevoet D, Miller J, Larson B. Visual scan behavior of new and experienced clinicians assessing panoramic radiographs. Journal of the World Federation of Orthodontists. 2013.
68. Mark G. Attention Span: A Groundbreaking Way to Restore Balance, Happiness and Productivity: Hanover Square Press; 2023.
69. Becker-Carus C, Wendt M. Allgemeine Psychologie : Eine Einführung. 2nd ed. 2017 ed. Berlin, Heidelberg Cham: Springer Berlin Heidelberg; 2017. 1 Online-Ressource (XXV, 603 Seiten) p.
70. Bundesamt für Justiz. Verordnung zum Schutz vor der schädlichen Wirkung ionisierender Strahlung (StrlSchV)2018.

8 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Anfertigung dieser Doktorarbeit unterstützt haben und ohne deren Hilfe diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre:

Ich möchte mich bei meinem Doktorvater für die Bereitstellung des sehr interessanten Themas und die Unterstützung während der Bearbeitung meiner Dissertation bedanken.

Besonders danken möchte ich meiner Betreuerin für die Hilfsbereitschaft, das ständige Feedback und die förderlichen Denkanstöße, die mir sehr geholfen haben. Insbesondere der regelmäßige Austausch hat mich stets ermutigt.

Der Leiterin des Instituts für Medizinische Psychologie und Medizinische Soziologie an der Universitätsmedizin Mainz möchte ich für Ihre statistische Unterstützung und die freundliche Zusammenarbeit danken.

Mein herzlicher Dank gilt meiner Familie für die liebevolle, seelische und moralische Unterstützung. Insbesondere die Motivation und der bedingungslose Beistand waren ein wichtiger Faktor für den Erfolg dieser Arbeit.

Zu guter Letzt sei auch meinen Freunden und Kommilitonen gedankt, die durch Ihre Teilnahme als Probanden diese Studie möglich gemacht haben.

