

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

Forensisch klinische Bewertung von Frontzahnästhetik mit dem Eye-Tracker;
Experten und Laien im Vergleich

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Doktorgrades der
Zahnmedizin
der Universitätsmedizin
der Johannes Gutenberg-Universität Mainz

Vorgelegt von

Sofia Kaydanska
aus Zhytomyr (Ukraine)

Mainz, 2026

Wissenschaftlicher Vorstand: Univ.-Prof. Dr. med. Philipp Drees

1. Gutachter:

2. Gutachter:

Tag der Promotion: 12. Mai 2026

Nachnutzungslizenz: CC-BY-4.0

Meiner Familie

Inhaltsverzeichnis

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	6
ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	7
TABELLENVERZEICHNIS.....	8
1 EINLEITUNG	9
2 LITERATURDISKUSSION.....	11
2.1 ÄSTHETIK.....	11
2.1.1 Die Rolle der Ästhetik	11
2.1.2 Ästhetische Wahrnehmung.....	12
2.1.2.1 Einfluss von Geschlecht	13
2.1.2.2 Einfluss von Alter	13
2.1.2.3 Einfluss von Beruf	14
2.1.2.4 Einfluss von Bildung.....	15
2.1.2.5 Einfluss von Medien	15
2.1.2.6 Selbstwahrnehmung.....	16
2.1.3 Ästhetik aus der Patientensicht	17
2.2 ZAHNFARBE.....	19
2.2.1 Farbzusammensetzung	19
2.2.2 Zahnverfärbungen	20
2.2.2.1 Externe Zahnverfärbungen.....	21
2.2.2.2 Interne Zahnverfärbungen	21
2.2.3 Bleichen der Zähne	22
2.2.3.1 Bleichmittel.....	22
2.2.3.2 Bleichmethoden	23
2.3 SYMMETRIE.....	24
2.3.1 Die faziale Symmetrie.....	24
2.3.2 Die Harmonie der Zähne.....	26
2.3.3 Die Anwendung in der Zahnmedizin.....	27
2.4 EYE-TRACKING.....	28
2.4.1 Die Geschichte des Eye-Trackings.....	28
2.4.2 Aufzeichnungsverfahren im modernen Eye-Tracking	29
2.4.2.1 Elektrookulographie	29
2.4.2.2 Sklerale Kontaktlinsen	30
2.4.2.3 Videookulographie	30
2.4.3 Eye-Tracker Arten.....	32
2.4.4 Einsatzgebiete	33
2.4.5 Anwendung in Zahnmedizin	35
2.4.5.1 Ermittlung der Betrachtungsmuster.....	35
2.4.5.2 Studien mit ästhetischen Fragestellungen	35
3 MATERIAL UND METHODE.....	38
3.1 MATERIAL	38
3.1.1 Studienteilnehmer	38
3.1.2 Fotografie.....	39
3.1.3 Eye-Tracking-System	41
3.1.4 Software	42
3.2 METHODE	44
3.2.1 Versuchsablauf.....	44
3.2.2 Datenexport und Auswertung	46
4 ERGEBNISSE	48
4.1 BEWERTUNGEN	48
4.1.1 Vergleich zwischen den Gruppen.....	50
4.1.2 Vergleich zwischen den Geschlechtern.....	54
4.2 ZEIT BIS ZUR ERSTEN FIXATION (TIME TO FIRST FIXATION).....	55
4.2.1 Vergleich aller AOIs	55
4.2.2 Zeit bis zur ersten Fixation der verfärbten Zähne.....	56

4.2.3 Vergleich zwischen den Probandengruppen.....	58
4.3 GESAMTBlickDAUER (TOTAL GAZE DURATION)	60
4.3.1 Zusammenhang zwischen Zahnverfärbung und Blickdauer	61
4.3.2 Vergleich zwischen den Probandengruppen.....	64
5. ERGEBNISDISKUSSION	68
5.1 ZAHNFARBE.....	68
5.1.1 Einfluss des Bleachings	68
5.1.2 Einfluss der Verfärbung	70
5.2 SYMMETRIE.....	73
5.3 BLICKMUSTER	75
5.4 PROBANDENGRUPPEN	76
5.4.1 Ausbildungsstand	76
5.4.2 Geschlecht	79
5.5. LIMITATIONEN	81
5.5.1 Eye-Tracking-System	81
5.5.2 Bildauswahl	82
5.5.3 Probandenauswahl.....	82
5.5.4 Betrachtungsdauer.....	83
6. ZUSAMMENFASSUNG	85
7. LITERATURVERZEICHNIS.....	87
8. DANKSAGUNG	96
9. TABELLARISCHER LEBENSLAUF	97

Abkürzungsverzeichnis

AOI	Area of Interest
EOG	Elektrookulographie
RED	„recurring esthetic dental“ Proportion

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Visuelle Stimuli	40
Abbildung 2: Evaluationsbogen	46
Abbildung 3: Notenverteilung im Überblick	48
Abbildung 4: Bewertungen aller Probanden im Überblick	49
Abbildung 5: Notenverteilung der Experten im Überblick	50
Abbildung 6: Notenverteilung der Laien im Überblick	51
Abbildung 7: Bewertungen der Experten im Überblick	52
Abbildung 8: Bewertungen der Laien im Überblick	53
Abbildung 9: Erste Fixation aller Probanden	56
Abbildung 10: Zeit bis zur ersten Fixation, Originalzähne und verfärbte Zähne im Vergleich	58
Abbildung 11: Erste Fixationen der Experten und Laien im Vergleich	59
Abbildung 12: Gesamtblickdauer aller Probanden im Überblick	61
Abbildung 13: Gesamtblickdauer, Originalzähne und verfärbte Zähne im Vergleich	63
Abbildung 14: Gesamtblickdauer der Experten und Laien im Vergleich	65
Abbildung 15: Gesamtblickdauer der Experten und Laien, Originalzähne und verfärbte Zähne im Vergleich	66

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mittelwerte der Bewertungen, Experten und Laien im Vergleich	54
Tabelle 2: Mittelwerte der Bewertungen, Männer und Frauen im Vergleich	55
Tabelle 3: Zeit bis zur ersten Fixation, Experten und Laien im Vergleich	60
Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Verfärbung und Gesamtblickdauer.....	64
Tabelle 5: Gesamtblickdauer, Experten und Laien im Vergleich	67

1 Einleitung

Die ästhetische Zahnmedizin bewegt sich in einem faszinierenden Spannungsfeld zwischen Fachwissen und persönlicher Wahrnehmung. Während der Zahnarzt nach klaren, professionellen Maßstäben arbeitet, sieht der Patient oft mit ganz eigenen Augen auf seine dentale Ästhetik. Was der Zahnarzt als verbesserungswürdig erachtet, kann vom Patienten als vollkommen ausreichend empfunden werden – und umgekehrt. Ein aus fachlicher Sicht ästhetisch makellos geltendes Lächeln kann für den Patienten dennoch ein Gefühl der Unzufriedenheit hinterlassen, das seine Lebensqualität beeinflusst. Diese Unterschiede in der Wahrnehmung zeigen, wie wichtig es ist, die ästhetischen Erwartungen beider Seiten zu verstehen und miteinander in Einklang zu bringen.

Die ästhetische Wahrnehmung der Zahnärzte wird bereits im Studium durch die Vermittlung der Grundlagen der dentalen Ästhetik geschult und vertieft sich mit zunehmender Patientenerfahrung und der damit verbundenen Konfrontation mit diversen ästhetischen Fragestellungen. Die Sicht des Zahnarztes auf die dentale Ästhetik unterscheidet sich aufgrund dieser spezifischen Ausbildung von der Sicht des Patienten. Die individuellen Unterschiede in der ästhetischen Wahrnehmung werden darüber hinaus auch von Faktoren wie Geschlecht, Alter oder Bildungsniveau beeinflusst. Selbst innerhalb der Gruppe der Zahnärzte variieren die ästhetischen Ansichten, beispielsweise abhängig von der Fachrichtung. Insgesamt ist die ästhetische Wahrnehmung ein komplexes Konzept, das sowohl individuell geprägt als auch multifaktoriell beeinflusst wird.

Das Ziel der vorliegenden Studie besteht darin, anhand repräsentativer Probandengruppen Unterschiede in der ästhetischen Wahrnehmung zwischen Laien ohne zahnmedizinische Erfahrung und Experten mit fundierten Kenntnissen der dentalen Ästhetik zu untersuchen. Zum einen werden dabei die bewussten Entscheidungen der Probanden bei der Bewertung verschiedener ästhetischer Ausgangssituationen verglichen. Zum anderen sollen durch den Einsatz eines Eye-Tracking-Geräts und der Auswertung der Blickpfade unbewusste Faktoren ermittelt werden, die zur jeweiligen Entscheidung führen.

Die Nullhypothese wurde folgendermaßen formuliert: Es gibt keinen Unterschied in den Bewertungen der Ästhetik der Probandengruppen der „Laien“ und „Experten“. Die Alternativhypothese dazu lautete: Die Probandengruppen der „Laien“ und „Experten“ unterscheiden sich in ihren ästhetischen Bewertungen.

Zusätzlich ergaben sich folgende Nebenfragestellungen:

1. Welche Auswirkungen haben aufgehellte Zähne, verfärbte Zähne und symmetrische Zahnbögen auf die Bewertungen der Probanden verglichen mit der natürlichen Ausgangssituation? Existieren dabei Unterschiede zwischen den Probandengruppen?
2. Existieren bestimmte Blickmuster beim Betrachten der anterioren Bezahnung?
3. Unterscheiden sich die Laien und Experten hinsichtlich ihres Blickverhaltens, insbesondere beim Betrachten der Zahnreihe mit einem auffälligen unästhetischen Detail?
4. Welchen Einfluss hat die Verfärbung eines Zahns auf das Blickverhalten der Probanden?

2 Literaturdiskussion

2.1 Ästhetik

Der Begriff „Ästhetik“ leitet sich vom griechischen Wort „aisthesis“ ab, was „Wahrnehmung“ oder „Empfindung“ bedeutet. Die bekannte Redewendung „Schönheit liegt im Auge des Betrachters“ verdeutlicht die Herausforderung, ästhetische Wahrnehmung universell zu definieren. Was als schön gilt, ist stets subjektiv und stark von individuellen Erfahrungen und gesellschaftlichen Einflüssen abhängig.

Schon seit der Antike haben sich Philosophen und Künstler mit der Ästhetik und ästhetischer Wahrnehmung beschäftigt. So legte der griechische Bildhauer Polyklet erstmals mathematische Proportionen für den idealen menschlichen Körper fest, während Leonardo da Vinci in der Renaissance versuchte, harmonische Gesichtsproportionen zu definieren (1, 2). In der heutigen Zeit werden diese historischen Prinzipien angewendet und weiterentwickelt und finden beispielsweise in der ästhetischen Medizin Anwendung.

2.1.1 Die Rolle der Ästhetik

Das äußere Erscheinungsbild und speziell die Gesichtsästhetik spielen eine zentrale Rolle in sozialen Interaktionen (3). Die Attraktivität einer Person beeinflusst soziale Kontakte, Persönlichkeitsentwicklung, sowie den Erfolg bei der Arbeits- und Partnersuche. Ein attraktives Gesicht wird mit Charakterzügen wie Extraversion, Selbstsicherheit und Dominanz assoziiert (4). Die Gesichtsästhetik wird sowohl von den Männern als auch von den Frauen als wichtig empfunden (4). Das Bedürfnis, Schönheitsstandards zu entsprechen, kann die Lebensqualität und die Selbstsicherheit beeinflussen (5).

Die Augen und der Mund sind die Zonen im Gesicht, die eine verstärkte Aufmerksamkeit des Gegenübers erfahren bei sozialen Interaktionen (4). Dies sind auch die wichtigsten Punkte, anhand derer beurteilt wird, ob ein Gesicht als ästhetisch oder attraktiv erscheint oder nicht (3, 5, 6). Der Mund, insbesondere

das Lächeln, trägt maßgeblich zur Expression und Kommunikation bei (6). Da beim Lächeln die Zähne gut sichtbar sind, trägt die dentale Ästhetik einen großen Teil zum Gesamterscheinungsbild bei. Gute dentale Gesundheit und ein attraktives Lächeln können auch für einige Berufe vorausgesetzt werden, beispielsweise in der Medienwelt (3).

Zufriedenheit mit dem eigenen Lächeln hat einen großen Einfluss auf das Selbstwertgefühl (7, 8). Faktoren wie Lippenform und -farbe, Höhe der Lachlinie, faziale und dentale Symmetrie, die Form, Farbe und Proportionen der anterioren Zähne, die Okklusion, die Weite des Bukkal corridors und der Gingivaverlauf tragen zur Ästhetik des Lächelns bei (5, 8-11).

Der positive psychosoziale Effekt, der mit einem ästhetischen Gesicht und Lächeln einhergeht, ist der Hauptgrund für viele Patienten, zahnmedizinische ästhetische Leistungen in Anspruch zu nehmen (5). Die Menschen, die mit ihrer dentalen Ästhetik zufrieden sind, tendieren dazu, ihre Zähne mehr zu zeigen und schauen sich gerne ihr Lächeln an (12). Somit kann die negative Wahrnehmung der eigenen Zähne zu Unsicherheit, Unzufriedenheit, reduzierten sozialen Interaktionen und reduzierter Lebensqualität führen (5).

Das dentale Erscheinungsbild wird zudem mit bestimmten Persönlichkeitsmerkmalen assoziiert (13). Personen nach ästhetischer Zahnbehandlung werden als attraktiver, intelligenter und sozial erfolgreicher eingeschätzt (8, 13). Umgekehrt können die negativen Stereotypen die Personen mit zerstörten und verfärbten Zähnen betreffen (3).

2.1.2 Ästhetische Wahrnehmung

Die Wahrnehmung der fazialen und dentalen Ästhetik ist sehr subjektiv (14). Das, was eine Person als attraktiv betrachtet, muss nicht zwangsläufig von einer anderen Person als ebenso ästhetisch empfunden werden. Die individuellen Unterschiede werden dabei von verschiedenen Faktoren beeinflusst, wie z.B. durch das Geschlecht, den Beruf, das Alter und den Bildungsstand. Zudem existieren kulturelle und ethnische Unterschiede. Beispielsweise empfinden die

Vertreter der afrokaribischen Bevölkerung protrudierte Zähne als normal und akzeptabel, während dieselbe Normabweichung bei der kaukasischen Bevölkerung als unattraktiv angesehen wird (15). Im Folgenden werden die wichtigsten Einflussfaktoren wie Geschlecht, Alter, Beruf und Erfahrung auf die ästhetische Wahrnehmung beleuchtet.

2.1.2.1 Einfluss von Geschlecht

In einer Studie von Flores-Mir et al. zur Wahrnehmung unterschiedlicher anteriorer Okklusionssituationen wurde festgestellt, dass weibliche Probanden die dentale Ästhetik kritischer bewerten als männliche (16). Auch weitere Studien bestätigen die geschlechtsspezifischen Unterschiede in der ästhetischen Wahrnehmung (17, 18) sowie die kritischere Bewertung seitens weiblicher Probanden (19-22).

Es gibt jedoch ähnlich aufgebaute Studien, die diverse ästhetische Komponenten des Lächelns untersucht haben, wie die Zahnlänge, -breite und -farbe, Mittellinienverschiebung, Diastema und Gingivaverlauf, bei denen sich kein signifikanter Unterschied zwischen den Probanden des unterschiedlichen Geschlechts hinsichtlich ihrer Bewertungen herausstellte (23-27).

2.1.2.2 Einfluss von Alter

Durch den demographischen Wandel verändert sich die Bevölkerungsstruktur in Deutschland. Die Lebenserwartung ist in den letzten 70 Jahren gestiegen (28). Verbindet man dies mit den niedrigen Geburtenzahlen der letzten Jahre, so bedeutet es, dass der Anteil an Menschen über 65 Jahren in der Gesellschaft zunehmend steigt. Das Statistische Bundesamt gibt an, dass in Deutschland im Jahr 1950 etwa 10% der Menschen über 65 Jahre alt waren, während diese Zahl im Jahr 2021 auf 22% gestiegen ist (28). Für die Zahnmediziner ist der demographische Wandel von großer Bedeutung, da diese Alterung der Gesellschaft mit einer steigenden Anzahl an älteren Patienten verbunden ist. Es ist wichtig zu untersuchen, ob diese Patientengruppe eine andere Wahrnehmung der Ästhetik besitzt, um eine optimale Versorgung anzubieten.

Eine Vielzahl von Autoren untersuchte den Zusammenhang zwischen der ästhetischen Bewertung und dem Alter der bewertenden Person. Die Mehrheit der Studien kam zu dem Ergebnis, dass das Alter der Probanden eine signifikante Rolle spielt (21, 29-32). Dabei sind die älteren Probanden meist toleranter gegenüber den nicht idealen Gebissverhältnissen (21, 29, 30).

Betrachtet man die Wahrnehmung der Zahnfarbe, die als ästhetisch und attraktiv angesehen wird, dadurch unterscheiden sich die Ergebnisse ebenfalls je nach Altersgruppe. Die Präferenz der jüngeren Probanden liegt bei weißen Zähnen, während die älteren Probanden die Zahnfarbe als weniger wichtig betrachten und helle Zähne seltener bevorzugen (31, 32).

Andere Studien hingegen zeigten keinen signifikanten Unterschied bei der ästhetischen Wahrnehmung unterschiedlicher Altersgruppen (17, 26). Ein möglicher Grund für die inhomogenen Ergebnisse könnte die unterschiedliche Festlegung von Altersgruppen sein und folglich ein unzureichend großer Altersunterschied der Probanden.

2.1.2.3 Einfluss von Beruf

Bei den verschiedenen Berufsgruppen wird im Laufe ihrer Ausbildung die ästhetische Wahrnehmung unterschiedlich stark gefördert. Auch innerhalb der Zahnmedizin gibt es Unterschiede zwischen den Fachrichtungen.

Kieferorthopäden, die vor allem mit ästhetischen Fragestellungen konfrontiert werden, zeigen eine höhere Sensibilität für dentofaziale Ästhetik (15, 33). Zeigt man jedoch den beiden Berufsgruppen, den kieferorthopädischen Fachärzten und den Allgemeinzahnärzten, Bilder von unterschiedlich stark von Dekalzifizierung und White-Spot-Läsionen betroffenen Zähnen, so sind die Kieferorthopäden weniger kritisch in ihren Bewertungen (34). Dies hängt möglicherweise damit zusammen, dass die Kieferorthopäden im Verlauf der Behandlungen ihrer Patienten öfter mit den White-Spot-Läsionen konfrontiert sind und sie deswegen als weniger kritisch ansehen als die allgemeinen

Zahnärzte. Dies verdeutlicht nochmal, welchen Einfluss das häufige Betrachten bestimmter Patientenfälle auf die Bewertung der dentalen Ästhetik hat.

2.1.2.4 Einfluss von Bildung

In der Literatur wird darüber diskutiert, ob die Bewertung der orofazialen Ästhetik vom Bildungsniveau der bewertenden Person abhängt. Einige Studien bestätigten einen signifikanten Unterschied in den Bewertungen abhängig vom höchsten Bildungsabschluss (35, 36). Die Probanden in der Studie von Dindaroglu et al. bewerteten die Ästhetik einer lächelnden Person mit dem Ergebnis, dass die niedrigsten Wertungen von Probanden mit Hochschulabschluss stammten und die höchsten von denen mit einem niedrigeren Schulabschluss (35). Andere Studien hingegen, wie die von Flores-Mir et al., zeigen keinen Einfluss des Bildungsgrads auf die ästhetische Wahrnehmung (19, 37).

2.1.2.5 Einfluss von Medien

Durch die allgegenwärtigen Social Media in der modernen Welt werden die Schönheitsstandards verstärkt präsentiert, was zu Unsicherheit und Unzufriedenheit mit dem eigenen Körper führt (3). Dies betrifft auch die dentofaziale Ästhetik.

Auf diversen Plattformen werden vermeintlich perfekte Gesichter und attraktive Lächeln präsentiert, oft in Verbindung mit Werbung für dentale Produkte oder Behandlungen, insbesondere um Zähne aufzuhellen (38). Dabei wird auf der anderen Seite die schlechte orale Gesundheit stigmatisiert. Es wird dargestellt, dass perfekte Zähne ein Teil vom perfekten Körper sind und so unabdingbar für sozialen Erfolg sind (13).

Sampson et al. untersuchten die Auswirkungen von Social Media auf die Zufriedenheit mit dem eigenen Aussehen: Probanden, die idealisierte Lächeln sahen, waren danach unzufriedener mit ihrem Gesicht und ihren Zähnen,

während Bilder von natürlichem Lächeln in der Kontrollgruppe die Zufriedenheit steigerten (39).

Solche Beeinflussung durch Social Media verstärkt die Unzufriedenheit mit dem eigenen Aussehen und führt dazu, dass eine Vielzahl an Patienten elektive ästhetische Behandlungen beansprucht, um einem idealisierten Schönheitsbild näherzukommen.

2.1.2.6 Selbstwahrnehmung

Bei der Wahl der optimalen Therapie ist es nicht nur wichtig zu beachten, was die Patienten bei ihren Gegenübern als ästhetisch und attraktiv betrachten, sondern auch, wie sie ihre eigene dentofaziale Ästhetik wahrnehmen und ob sie mit ihr zufrieden sind. Auch wenn aus zahnärztlicher Sicht eine Verbesserung möglich wäre, besteht kein ästhetischer Behandlungsbedarf, wenn der Patient die eigene Ästhetik als zufriedenstellend empfindet. Diese Wahrnehmung unterliegt verschiedenen Einflüssen.

So zeigen weibliche Probanden eine kritischere Haltung gegenüber ästhetischen Komponenten des dentofazialen Systems (7, 32) und der eigenen Zahnästhetik (5, 40). Auch das Bildungsniveau spielt eine Rolle. Probanden mit einem höheren Bildungsniveau tendieren dazu, die eigene orofaziale Ästhetik besser zu bewerten (40). Alhajj et al. erklären diese Feststellung in ihrer Studie so, dass gebildete Personen meist über eine bessere orale Hygiene und Gesundheit verfügen, was zur höheren Zufriedenheit mit der eigenen Ästhetik führt (40). Auch eine andere Studie bestätigt diesen Zusammenhang (20).

Festzustellen ist ebenfalls eine Korrelation mit dem Alter. Patienten der Altersgruppe über 50 Jahre haben oft weniger Zweifel an ihrer dentalen und fazialen Ästhetik als Patienten im Alter von 18 bis 35 Jahren (32, 40). Vallittu et al. erklärten dies damit, dass die Selbstsicherheit aufgrund der Ausbildung und Reifung der eigenen Persönlichkeit tendenziell mit dem Alter steigt (32). Dadurch sind die älteren Erwachsenen eher weniger auf ihr Aussehen und Auftreten fixiert. Jüngere Erwachsene werden zudem stärker durch Medien beeinflusst und

achten vermehrt auf ihr äußeres Erscheinungsbild, da dieses ihre Karrierechancen und die Partnersuche beeinflussen kann. Dies führt zu kritischeren Bewertungen sowohl der eigenen als auch der fremden Ästhetik.

2.1.3 Ästhetik aus der Patientensicht

Wie bereits beleuchtet, unterscheidet sich die ästhetische Wahrnehmung intraindividuell und wird durch die soziale Umgebung, den Beruf und die Erfahrung einer Person beeinflusst. Die Wahrnehmung der Gesichts- und speziell der Zahnästhetik der zahnmedizinisch tätigen Personen und der Laien kann sich unterscheiden. Zahnärzte bewerten Ästhetik meist aus der intraoralen Sicht, Laien hingegen aus der frontalen Sicht im Spiegel als Teil des gesamten fazialen Erscheinungsbildes (19). Da Patienten überwiegend Laien sind, würde diese Diskrepanz bei der Interaktion zwischen dem Zahnarzt und dem Patienten eine entscheidende Rolle spielen.

Die ästhetischen Standards des Zahnarztes müssen nicht zwangsläufig als solche von den Patienten wahrgenommen werden. Für eine optimale Therapie, die die Patienten nicht nur funktionell, sondern auch ästhetisch zufriedenstellt, ist es essenziell zu erforschen, welche Abweichungen von den ästhetischen Normen von den Patienten toleriert oder gar nicht wahrgenommen werden und welche einen Behandlungsbedarf darstellen.

Es gibt zahlreiche Studien, die die Unterschiede zwischen den „Experten“, den Zahnärzten, und den „Laien“, den Patienten, in diversen ästhetischen Fragestellungen untersucht haben. Die Annahme, dass die ästhetische Wahrnehmung der beiden Gruppen sich unterscheidet, wurde von der Mehrheit der Studien bestätigt (15, 18, 41-44). Dabei wurden beispielsweise die Abweichungen in der Symmetrie (42, 43), die Verschiebung der Mittellinie (15), die Höhe der Lachlinie (44) oder die Weite des Bukkal corridors (45) untersucht.

Pasukdee et al. erklären diese Unterschiede damit, dass die Zahnmediziner durch ihre Ausbildung geschult werden, Abweichungen von ästhetischen Normen sensibler zu erkennen (18). Zahnärzte nehmen bereits geringere Abweichungen

von ästhetischen Standards wahr (10, 41, 42), während die Toleranzgrenze bei Laien im höheren Bereich liegt (46). Die Wertungen der Zahnmediziner werden außerdem weniger von den demographischen Kriterien beeinflusst, da sie eine ähnliche Ausbildung erfahren (18).

Einige Autoren verglichen die Studenten der Zahnmedizin in unterschiedlichen Ausbildungsphasen. Die Studierenden im 1. Semester haben noch kein trainiertes ästhetisches Urteilsvermögen und ähneln in ihrer Wahrnehmung den Laien. Die Studierenden aus dem letzten Studienabschnitt hingegen können mit Zahnärzten, also Experten, gleichgesetzt werden. Die Abhängigkeit der ästhetischen Wahrnehmung von der zahnmedizinischen Erfahrung wurde in einigen Studien bestätigt (5, 47, 48).

Aljefri & Williams zeigten, dass die Studenten höherer Fachsemester am stärksten ein idealisiertes Lächeln bevorzugen (47). El Mourad et al. stellten fest, dass Studierende am Anfang der Ausbildung hellere gebleichte Zähne bevorzugen, während Studierende am Ende der Ausbildung natürliche Zahnfarben als ästhetischer empfinden und mit ihrer eigenen Zahnfarbe zufriedener sind (5). Ellakany et al. hingegen fanden heraus, dass Studierende des klinischen Abschnitts unzufriedener mit ihrer eigenen dentalen Ästhetik sind, da sie möglicherweise durch ihr angeeignetes ästhetisches Fachwissen kritischer in ihren Wertungen sind (48).

Werden die Ergebnisse dieser Studien auf die Personengruppen der Zahnmediziner und der Patienten übertragen, so würde dies bedeuten, dass die Unterschiede zwischen ihnen ebenso signifikant sind. Es ist wichtig, diesen Zusammenhang genauer zu untersuchen, damit man eine Therapie gewährleistet, die möglichst den Präferenzen des Patienten und nicht den ästhetischen Vorstellungen des Zahnarztes entspricht.

2.2 Zahnfarbe

Der Wunsch nach einem ästhetischen Lächeln ist einer der Hauptgründe, weswegen die Patienten einen Zahnarzt aufsuchen. Um ihre Erwartungen zu erfüllen, muss ein Zahnarzt über ausreichendes Wissen über die Ansprüche und Präferenzen der Patienten bezüglich der Ästhetik und der Attraktivität verfügen (49).

Untersucht man, anhand welcher Faktoren die Patienten ein Lächeln als attraktiv wahrnehmen, so kommt man zum Ergebnis, dass die Zahnfarbe neben der Zahnform zu den Hauptparametern zählt (4, 6). Die Zahnfarbe ist auch der häufigste Grund, weswegen die Patienten mit dem eigenen Lächeln unzufrieden sind (6, 49). Unabhängig davon, was man als natürliche oder ästhetische Zahnfarbe definiert, sind viele Menschen mit der Farbe ihrer Zähne unzufrieden (13). In einer amerikanischen Studie von 2004 waren es rund ein Drittel der Erwachsenen (50). In anderen Studien geben mehr als die Hälfte der Probanden an, mit ihrer Zahnfarbe unzufrieden zu sein (8).

2.2.1 Farbzusammensetzung

Die Zahnfarbe setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Zum einen sind die Grundeigenschaften der Farbe zu nennen: der Farbton (Hue), die Farbhelligkeit (Value) und die Farbsättigung (Chroma) (51). Zum anderen hängt speziell bei den Zähnen die optische Wahrnehmung der Farbe von der Opazität bzw. der Transluzenz der Zahnhartsubstanzen ab.

Die drei Grundeigenschaften der Farbe wurden durch den Künstler Albert Henry Munsell im Jahr 1905 zum ersten Mal beschrieben. Das sogenannte Munsell-Farbsystem wird in der Zahnmedizin heutzutage verwendet, um die Zahnfarbe zu definieren. Darauf basieren die meisten Farbschlüssel, wie zum Beispiel der klassische Vita-Farbschlüssel, die zur analogen Bestimmung der Zahnfarbe dienen.

Hue definiert den Farbton und entsteht bei einem Zahn hauptsächlich aufgrund der gelben Eigenfarbe des Dentins. Im Vita-Farbschlüssel entspricht der Farbton

den Buchstaben A-D. Value beschreibt die Helligkeit einer Farbe, die von weiß bis schwarz über die Zwischentöne wie hellgelb oder dunkelgelb reicht. Im Farbschlüssel wird dies mithilfe von Zahlen 1-4 dargestellt. Die Farbsättigung (Chroma) beschreibt die Intensität einer Farbe. Eine dickere Schmelzschicht reduziert die Farbsättigung, wohingegen eine freiliegende Dentinschicht eine intensivere Farbe besitzt.

Der Zahnschmelz besitzt die Eigenschaft, die Lichtstrahlen zum Teil durch die Schicht hindurchzuleiten und zum Teil zu reflektieren. Dies ist auf die Schmelzprismen zurückzuführen, die das Licht brechen und reflektieren und somit für die Transluzenz sorgen. Zähne mit einer dickeren Schmelzschicht erscheinen aufgrund dieses Effekts heller und weißer. Dentin hingegen besitzt die Eigenschaft, die man als Opazität beschreibt. Opake Strukturen sind lichtundurchlässig, die Lichtstrahlen werden aufgrund der höheren Dichte des Materials vermehrt reflektiert. Zähne mit einer freiliegenden Dentinschicht besitzen deswegen eine gesättigte gelbe Farbe (51).

2.2.2 Zahnverfärbungen

Die Zahnfarbe verändert sich im Laufe des Lebens. Dies liegt an der unterschiedlichen Beschaffenheit von Schmelz und Dentin und an dem Verhältnis ihrer Schichtdicken zueinander. Die jugendlichen Zähne haben eine dicke Schmelzschicht und erscheinen deswegen heller und transparenter. Im Laufe der Jahre wird die Schmelzschicht stetig durch die abrasiven und erosiven Vorgänge reduziert und die Dentinschicht zunehmend freigelegt. Dadurch verändert sich die Zahnfarbe, die Zähne wirken gelb und opak. Die gelbliche Farbe ist außerdem noch auf das kleinere Pulpenkavum zurückzuführen. Im Jugendalter ist die Pulpa ausgedehnt. Im fortschreitenden Alter verkleinert sich das Pulpenkavum und es kommt zunehmend zur Sklerosierung des Dentins, was eine gelbe lichtundurchlässige Farbe zur Folge hat (51).

Neben den dargestellten physiologischen Veränderungen gibt es außerdem Zahnverfärbungen, die auf eine externe oder interne Ursache zurückzuführen sind.

2.2.2.1 Externe Zahnverfärbungen

Die externen Zahnverfärbungen entstehen durch die Anlagerung von langkettigen chromogenen Molekülen an die Zahnoberfläche. Die chromogenen Substanzen finden sich in den Genussmitteln wie Kaffee, schwarzen oder grünen Teesorten oder Rotwein (51). Eine schlechte Mundhygiene, die mit harten und weichen Belägen an der Zahnoberfläche assoziiert ist, begünstigt die Entstehung solcher Verfärbungen (51). Das Rauchen oder der Konsum von Kautabak tragen ebenfalls dazu bei.

Oft sind die externen Verfärbungen bereits durch professionelle Zahnreinigung unter Einsatz von Pulverstrahl-, Ultraschallgeräten und Politurpasten zu entfernen. Sind diese Maßnahmen nicht ausreichend, lassen sich die Verfärbungen gut durch Bleichen entfernen.

2.2.2.2 Interne Zahnverfärbungen

Im Gegensatz zu den externen Zahnverfärbungen, die im Pellikel an der Zahnoberfläche entstehen, sind die internen Zahnverfärbungen auf die Farbeinlagerungen in die Schmelz- oder Dentinschicht zurückzuführen (51). Verantwortlich dafür sind diverse Ursachen.

Die genetischen Defekte, wie Amelogenesis imperfecta oder Dentinogenesis imperfecta, führen zu einer gestörten Zahnhartsubstanzbildung und resultieren in unterschiedlich stark ausgeprägten Zahndefekten und Verfärbungen. Die Einnahme von Antibiotika aus der Gruppe der Tetracycline während der Schwangerschaft kann zu Fehlbildungen der Zahnhartsubstanz des Fötus führen. Tetracyclin bildet Chelatkomplexe mit den Calciumionen, die während der Odontogenese in Schmelz und Dentin eingebaut werden, und so zu irreversiblen bräunlichen oder gräulichen Zahnverfärbungen führen (51). Fluorose ist ebenfalls eine Ursache für interne Zahnverfärbungen. Eine Fluoridüberdosierung während der Zahnentwicklung hat Hypoplasie des Zahnschmelzes mit variabler klinischer Ausprägung von weißen Flecken bis hin zu gelbbraunen Verfärbungen zur Folge (51). White-spot-Läsionen sind ebenfalls eine häufige Art der Zahnverfärbung.

Eine der Ursachen dafür ist eine vorliegende Karies im frühen Stadium mit einer einhergehenden Demineralisation des Schmelzes.

Im Gegensatz zu den externen Verfärbungen sprechen die internen Verfärbungen schlechter auf das Bleichen an. Für die Behandlung solcher Verfärbungen sind oft mehrere Bleichsitzungen oder andere ästhetische Eingriffe wie mikroinvasive Kariesinfiltration oder Einsatz von Kompositen notwendig.

2.2.3 Bleichen der Zähne

Das Bleichen der Zähne ist eine minimalinvasive ästhetische Methode, um die natürliche Farbe der Zahnhartsubstanz durch Applikation von chemischen Substanzen aufzuhellen.

Die Zahnfarbe ist die häufigste Ursache der Unzufriedenheit mit den Zähnen und dem Lächeln (6, 8, 49). Diese Tendenz zeichnet sich vor allem bei den Frauen und jüngeren Erwachsenen ab (52), die sich statt ihrer natürlichen Zahnfarbe eine deutlich hellere Zahnfarbe wünschen (53). Den Menschen mit gebleichten Zähnen werden auch häufiger positive Charakterzüge zugeschrieben (3). Eine Erklärung dafür könnte der starke Einfluss der Social Media sein, wo weiße Zähne und ein perfektes Lächeln als ein Teil vom Schönheitsideal suggeriert werden (3).

Vergleicht man die ästhetischen Behandlungsmethoden untereinander, so haben mehrere Studien festgestellt, dass das Bleichen der Zähne eine von den Patienten am meisten gewünschte Prozedur ist (8, 52). Es ist auch die Behandlung, nach der die Patienten direkt die größte Zufriedenheit verspüren und weniger Zweifel an ihrer dentalen Ästhetik besitzen (12).

2.2.3.1 Bleichmittel

Die dunklen Farbpigmente der sichtbaren Zahnverfärbungen können aus großen organischen Molekülen mit Doppelbindungen oder aus Metallverbindungen

bestehen. Die Chemie des Bleichens beruht auf dem Aufbrechen der Doppelbindungen dieser Moleküle, was zu deren Farbverlust führt.

Als Bleichmittel werden unterschiedliche Lösungen eingesetzt, die jedoch alle Peroxide enthalten. Die am häufigsten verwendeten Bleichmittel sind Wasserstoffperoxid, Carbamidperoxid und Natriumperborat (51). Das Wasserstoffperoxid ist aufgrund seiner Eigenschaften als starker Radikalbildner der aktive Bestandteil des Bleichprozesses. Zerfällt Wasserstoffperoxid in instabile reaktionsfreudige freie Sauerstoffradikale, können diese nach der Penetration der Zahnhartsubstanz mit den organischen Farbstoffmolekülen reagieren, sie oxidieren und deren Doppelbindungen aufspalten. So kommt es zu einer Farbveränderung und Farbverlust.

2.2.3.2 Bleichmethoden

Bei den Bleichmethoden unterscheidet man das externe und das interne Bleichen.

Beim externen Bleichen handelt es sich um das Bleichen vitaler Zähne. Das Reaktions-Agens wird auf die Zahnoberfläche aufgetragen, penetriert den Schmelz bis zum Dentin und entfärbt die Farbmoleküle (51). Grundsätzlich unterscheidet man beim Bleichen vitaler Zähne zwei unterschiedliche Techniken: das sogenannte „In-Office-“ oder „Power-Bleaching“ und das „Home-Bleaching“.

Beim In-Office-Bleaching erfolgt die Therapie in einer Sitzung. Dabei wird ein höher konzentriertes Bleich-Agens verwendet, welches auf die facialen Flächen der Zähne aufgetragen und in Folge mit Hitze oder Licht aktiviert wird, um die Behandlungszeit zu verkürzen (54).

Die Home-Bleaching-Technik wird mit Hilfe einer individuell angefertigten Bleaching-Schiene durchgeführt. Das Bleichmittel, in Form eines Gels einer geringeren Konzentration, wird vom Patienten eigenständig in die Schiene appliziert und an mehreren Nächten hintereinander in den Mund eingebracht. Der

Fortschritt der Behandlung wird regelmäßig durch den Zahnarzt kontrolliert, bis der gewünschte Effekt eingetreten ist.

Beim internen Bleichen handelt es sich um das Bleichen devitaler Zähne. Es gibt verschiedene Gründe für die Verfärbung devitaler Zähne. Nach einem Trauma oder einer iatrogenen Exstirpation der Pulpa kann es zu Einblutungen kommen und die in Folge entstehenden eisenhaltigen Abbauprodukte können zu einer gräulichen Verfärbung des Zahns führen (55). Ebenfalls können die Reste der nekrotischen Pulpa mit ihren Abbauprodukten, Bakterien oder die verwendeten Wurzelkanalfüllmaterialien ursächlich für die Verfärbung von devitalen Zähnen sein (55).

Die devitalen Zähne werden mit Hilfe der sogenannten Walking-Bleach-Technik gebleicht (51). Es wird zunächst eine Kavität präpariert, um Zugang zum Pulpenkavum zu ermöglichen. Die bestehende Wurzelkanalfüllung wird abgedeckt und ein Medikament, meist Carbamidperoxid oder Natriumperborat, appliziert. Die Kavität wird provisorisch verschlossen und das Medikament verbleibt einige Tage im Pulpenkavum, bis der gewünschte Bleicheffekt eintritt.

2.3 Symmetrie

2.3.1 Die faziale Symmetrie

Die Symmetrie ist essenziell für die ästhetische Wahrnehmung eines Gesichts (27, 56). Unter Gesichtssymmetrie versteht man die Balance zwischen der rechten und der linken Gesichtshälfte (2). Trennt man das Gesicht entlang der sagittalen Ebene, so sollten die fazialen Strukturen der beiden Hälften einander in Größe, Lage, Form und Anordnung gleichen (56). Eine Asymmetrie im Gesicht kann auf Formvariationen der kraniofazialen Knochen oder der Weichgewebsstrukturen zurückzuführen sein (57). Dabei handelt es sich bei der perfekten bilateralen Symmetrie eher um ein theoretisches Konzept, das bei Lebewesen sehr selten vorkommt (27, 57).

Eine leichte Asymmetrie im Gesicht ist vollkommen natürlich. Nichtsdestotrotz ist die Wahrnehmung des eigenen Gesichts als asymmetrisch einer der am häufigsten genannten Gründe für die Unzufriedenheit mit dem eigenen fazialen Erscheinungsbild (56). Der Punkt, an dem eine „normale“ Asymmetrie zu einer „abnormalen“ wird, ist nicht leicht zu bestimmen und hängt von der Wahrnehmung des Zahnarztes und des Patienten ab (57). Um eine entsprechende ästhetische Therapie zu empfehlen und durchzuführen, ist es wichtig, die Unterschiede in den Präferenzen und Wahrnehmungen der beiden Personengruppen zu kennen.

Es gibt einige Studien, die sich mit der Fragestellung beschäftigten, ob die Asymmetrie der Zähne für die Betrachter als unästhetisch erscheint (10, 27). Kokich et al. kamen zum Ergebnis, dass asymmetrisch veränderte Zähne sowohl von Zahnmedizinern als auch von Laien als unattraktiv angesehen werden (10). Treten die Variationen der Zahnform bilateral symmetrisch auf, so empfinden die Zahnmediziner es als unästhetisch, während dies für die Gruppe der Laien oft unbemerkt bleibt (10). Diese Erkenntnis könnte bei der ästhetischen Planung von Zahnrestorationen nützlich sein.

Auch wurde untersucht, ob das Vorliegen von symmetrischen Gesichtszügen mit positiveren ästhetischen Bewertungen verbunden ist (56). Laut der Studie von Choi et al. kann eine leichte Asymmetrie ein Gesicht natürlicher wirken lassen und wird nicht als unattraktiv gesehen (56). Die von den Studienteilnehmern bevorzugten Gesichter waren leicht asymmetrisch. Darüber hinaus wurde ein natürliches Gesichtprofil besser bewertet als ein gespiegeltes Profil.

Einige Studien beschäftigten sich mit der Fragestellung, welche Asymmetrien von Zahnmedizinern oder Laien als solche überhaupt wahrgenommen werden und ab welcher Diskrepanz eine Asymmetrie als unästhetisch gilt (2, 10, 27). Alrbata et al. zeigten, dass die Kieferorthopäden beim Betrachten fazialer Asymmetrien empfindlicher sind (2). Weitere Studien bestätigen, dass Kieferorthopäden sensibler auf uni- und bilaterale dentale Asymmetrien sowie Mittellinienverschiebungen reagieren, während Laien die Asymmetrie der Mittellinie seltener wahrnehmen (10, 27).

2.3.2 Die Harmonie der Zähne

Die ästhetische Zahnmedizin beschäftigt sich mit den geometrischen und mathematischen Proportionen, mit denen man die Breite der anterioren Zähne beschreiben kann (58). Im Folgenden werden Konzepte wie die goldene Proportion, die „recurring esthetic dental“ (RED) Proportion sowie „golden percentage“ beschrieben, die die Relationen der Zahnbreiten der Frontzähne zueinander bestimmen.

Der goldene Schnitt oder die goldenen Proportionen stellen ein mathematisches Verhältnis von 1,618:1 dar (59). Der goldene Schnitt ist seit der Antike bekannt. Es wurde versucht, diese Verhältnisse in der Architektur und Kunst sowie bei der Beschreibung der perfekten menschlichen Körperproportionen abzubilden (60). Lombardi schlug in seiner Publikation von 1973 erstmals vor, den goldenen Schnitt auch in der Zahnmedizin zu verwenden (61). Levin beschrieb in seinem Artikel von 1978 den goldenen Schnitt als das Verhältnis der Zahnbreiten der Frontzähne, von labial betrachtet (60). Die Breite des lateralen Inzisivus sollte dabei im Verhältnis von 1:1,618 zur Breite des mittleren Inzisivus stehen. Im selben Verhältnis sollte die Breite des Eckzahns aus der frontalen Sicht zur Breite des seitlichen Schneidezahns stehen (58, 60).

Ward sah das Vorliegen des goldenen Schnitts beim natürlichen Lächeln als kritisch und stimmte den Autoren zu, die diese Proportionen in ihren Studien als nicht dominierend fanden (62). Der Vorschlag von Ward lag darin, dass das Verhältnis der Zahnbreiten jeweils von dem distalen zu dem mesialen Zahn konstant bleibt (62). Dies beschrieb er als „recurring esthetic dental“ (RED) Proportion. Dabei sollte das Verhältnis zwischen 62% und 80% betragen (62). Darunter würde laut Ward auch die goldene Proportion fallen, die er somit als 62% RED Proportion bezeichnete. Sie ist jedoch nicht die einzige ideale Proportion, sondern eine von den mehreren, die in die Definition von der „RED“ Proportion fallen.

Das „golden percentage“ Verhältnis wurde von Snow vorgestellt als eine Weiterentwicklung von den goldenen Proportionen (63). Betrachtet man die Gesamtbreite des anterioren Segments, vom Eckzahn zum Eckzahn gemessen,

und teilt die einzelnen Zahnbreiten durch die Gesamtbreite, so sollten die Zahnbreiten von den mittleren Inzisivi jeweils 25% betragen, die von den seitlichen Inzisivi jeweils 15% und die von den Eckzähnen jeweils 10%.

2.3.3 Die Anwendung in der Zahnmedizin

Heutzutage findet der goldene Schnitt in der Zahnmedizin vielseitige Anwendung, beispielsweise bei der Herstellung von anterioren Restaurationen, herausnehmbarem Zahnersatz oder der Implantatplanung. Ziel der ästhetischen Zahnmedizin ist ein natürliches, harmonisches Lächeln. Dabei spielen das Verhältnis von Zahnlänge zu Zahnbreite, der ersetzten Zähne zu den natürlichen Zähnen sowie der Zähne zu den Gesichtszügen eine zentrale Rolle. Es wird angenommen, dass die Anwendung goldener Proportionen zu harmonischen Verhältnissen führt (59).

Doch das Konzept der goldenen Proportionen ist umstritten. Mehrere Studien untersuchten, ob der goldene Schnitt bei den Frontzähnen in einem natürlichen Lächeln vorkommt (64-68). Da die ethnische Herkunft die fazialen und die dentalen Proportionen beeinflusst (64, 69), wurden in den unterschiedlichen Studien diverse ethnische Gruppen ausgewertet. George & Bhat vertraten in ihrer Studie die Meinung, dass die goldenen Proportionen im Gesicht zu finden sind und die Wahrnehmung der Schönheit beeinflussen (69). Ausgewertet wurden dabei die Probanden indischer Herkunft.

Andere Autoren hingegen stellten fest, dass in einer natürlichen Dentition die goldenen Proportionen zum größten Teil fehlten (64-68). So zeigten Untersuchungen bei saudi-arabischen (65), iranischen (68) und malaysischen Probanden (64), dass die Zahnbreiten der Frontzähne im Oberkiefer nicht den goldenen Proportionen entsprachen. Bei lediglich der Hälfte der Probanden der Studie von Baghiana et al. entsprachen die Frontzähne den goldenen Proportionen (66). Rodriguez-Lopez et al. stellten fest, dass weder goldene Proportionen noch „RED“ Proportionen noch „golden percentage“ auf die Verhältnisse der Frontzähne der spanischen Probanden anwendbar waren (67).

Mehrere Autoren beschäftigten sich mit der Fragestellung, ob die dentalen bzw. fazialen Verhältnisse, die den goldenen Proportionen entsprechen, als ästhetischer angesehen werden.

Shah et al. fanden heraus, dass die von den Laien als attraktiv bezeichneten Gesichter zwar nicht exakt den goldenen Proportionen entsprachen, jedoch von allen Gesichtern diejenigen mit den besten Bewertungen dem goldenen Schnitt am nächsten waren (70). Saha et al. zeigten den Probanden in ihrer Studie Bilder von unterschiedlichen lächelnden Personen, um herauszufinden, welches Lächeln als ästhetisch angesehen wird (71). Untersuchte man die als ästhetisch bewerteten Lächeln, so wiesen nur 11,4% von ihnen goldene Proportionen auf. Die Autoren schlussfolgerten somit, dass ein ästhetisches Lächeln in Harmonie zu den Gesichtszügen stehen sollte, anstatt mathematisch bestimmten Proportionen zu entsprechen.

2.4 Eye-Tracking

2.4.1 Die Geschichte des Eye-Trackings

Die ersten Versuche, die Augenbewegungen mit einem Gerät zu detektieren und zu verfolgen, wurden Ende des 19. Jahrhunderts in den Studien der Autoren Hering (1879), Delabarre (1898) und Dodge (1898) dokumentiert (72).

Einer der ersten Forscher, die in ihren Versuchen das Eye-Tracking-System erfolgreich nutzten, war E.B. Delabarre (73). Seine Idee bestand darin, dass ein festes Objekt entweder an der Augenoberfläche oder an den Augenmuskeln befestigt werden musste, um eine relativ genaue und reproduzierbare Aufzeichnung der Augenbewegungen zu ermöglichen. Er verwendete dafür einen Gipsabdruck der Kornea eines künstlichen Auges, der später in linsenähnliche Form geformt und an die Größe und Oberfläche der Kornea eines Probanden angepasst wurde. Auf der Höhe der Pupille wurde ein Loch in die Gipslinse geformt und dort ein Zeiger befestigt, der korrespondierend auf einer vorbereiteten Oberfläche die Augenbewegung aufzeichnen sollte. Zum Einsetzen der Konstruktion mussten die Augen des Probanden mit einer 2-3%

Kokainlösung betäubt werden. Mit der Methode konnten sowohl horizontale als auch vertikale Augenbewegungen reproduzierbar aufgezeichnet werden.

Die anfangs invasiven Eye-Tracking-Methoden wurden zunehmend weiterentwickelt, bis Dodge und Cline am Anfang des 20. Jahrhunderts eine non-invasive Methode vorgestellt haben, die auf den kornealen Reflexionen beruhte (72). 1948 erfanden Hartridge und Thompson den ersten Head-mounted Eye-Tracker und seit dem Jahr 2000 sind portable leichte kabellose Eye-Tracker auf dem Markt erhältlich, die für zahlreiche Studien verwendet werden (72).

Heutzutage werden hauptsächlich folgende Techniken für die Aufzeichnung der Augenbewegungen und Blickpunkte verwendet: Elektrookulographie, Einsatz von Kontaktlinsen sowie die Videookulographie.

2.4.2 Aufzeichnungsverfahren im modernen Eye-Tracking

2.4.2.1 Elektrookulographie

Eins der ersten Aufzeichnungsverfahren ist die Elektrookulographie (EOG), die 1922 erstmals von Schott beschrieben wurde.

Die Methode beruht auf der Potenzialdifferenz, die durch um die Augen platzierte Elektroden aufgezeichnet wird (74). Das Auge wird hierbei als Dipol betrachtet (75). Dabei bildet die Hornhaut (Cornea) den positiven Pol, der 0,4 bis 1 mV Potenzialunterschied zum negativen Pol, der Netzhaut (Retina), aufweist (74). Grund für diese Differenz ist die höhere metabolische Rate der Retina. Diese Potenzialdifferenz wird auch als corneo-retinales Potential bezeichnet. Bewegen sich die Augen von der zentralen Position zur Peripherie, nähert sich die Hornhaut einer Elektrode, während sich die Retina der gegenüberliegenden Elektrode nähert (76). Aus der veränderten Ausrichtung des Dipols entsteht das aufgezeichnete EOG-Signal (76).

Eine größere Fehlerquelle dieser Methode liegt in den Schwankungen des corneo-retinalen Potenzials. Es unterliegt circadianen Fluktuationen und ist

abhängig von der Wachsamkeit des Probanden und seiner Adaptation an die vorliegenden Lichtverhältnisse (74).

2.4.2.2 Sklerale Kontaktlinsen

Ein weiteres Aufzeichnungsverfahren beruht auf dem Einsatz von skleralen Kontaktlinsen. Dieses Vorgehen ähnelt der bereits beschriebenen Methode von Delabarre, die in den ersten Studien zur Registrierung von Augenbewegungen angewendet wurde.

Dem Probanden werden Kontaktlinsen eingesetzt, die mit optischen oder mechanischen Geräten verbunden sein können (77). Die Ermittlung der Blickrichtung erfolgt entweder optisch durch das Messen der Lichtreflexion durch die Kontaktlinsen (72) oder durch die Aufzeichnung von Spannungen, die durch eine magnetisch induzierte Spule in einem Magnetfeld entstehen (78). Die Augenbewegungen verursachen eine Bewegung der Spule im elektromagnetischen Feld. Die dadurch generierten Spannungen können aufgezeichnet werden und geben Aufschluss über die Orientierung der Bewegungen (78).

Young und Sheena bezeichneten diese Messmethode als eine der genauesten (74). Es ist jedoch die am meisten intrusive Methode und die Insertion der Kontaktlinsen erfordert besondere Vorsicht und Übung (77).

2.4.2.3. Videookulographie

Die Videookulographie wird bei den modernen Eye-Tracking-Systemen am häufigsten verwendet (79). Die video-basierten Eye-Tracker bestehen aus einer Kamera und der zugehörigen Hardware, die die Blickrichtung in Echtzeit ausrechnet (77).

Es gibt eine Vielzahl an Methoden, mit deren Hilfe man die Augenposition bestimmen kann. Am häufigsten kommt das sogenannte reflexionsbasierte Verfahren zum Einsatz. Das Auge des Probanden wird mit einer

Infrarotlichtquelle ausgeleuchtet und die Blickrichtung durch bestimmte Geometrie der Reflexionspunkte errechnet (78). Das Verfahren wird im Folgenden genauer beleuchtet.

Die kornealen Reflexe, auf denen die Methode des reflexionsbasierten Eye-Trackings beruht, werden auch als „Purkinje-Reflexe“ oder „Purkinje-Bilder“ bezeichnet (77). Purkinje-Bilder entstehen grundsätzlich bei der Reflexion des einfallenden Lichts an den vier optischen Grenzflächen des Auges (80). Der erste Reflex, welcher auch der hellste ist, erfolgt an der Vorderseite der Cornea. Die weiteren Grenzflächen sind die Hornhaut-Rückseite, die Linsen-Vorderseite und die Linsen-Rückseite.

Es sind zwei Referenzpunkte am Auge erforderlich, damit das System Augenbewegungen von eventuellen Kopfbewegungen unterscheiden kann (77). Es wird der Abstand zwischen der Pupillenmitte und der kornealen Reflexion gemessen, der sich durch die Augenbewegungen verändert, bei kleineren Kopfbewegungen jedoch konstant bleibt (77). Dadurch, dass die Infrarotlichtquelle ihre Position zum Auge nicht verändert, bleibt der dadurch entstehende Purkinje-Reflex stabil, während sich die Pupille zusammen mit dem Augapfel bewegt (77). Die meisten Eye-Tracking-Systeme erkennen typischerweise den ersten Purkinje-Reflex, da dieser am hellsten und dadurch einfacher zu erkennen ist.

Der Vorteil der Videookulographie, und speziell der reflexionsbasierten Verfahren, ist ihre hohe Genauigkeit. Da diese Methode nicht invasiv ist, kann sie bei Studien mit großer Probandenanzahl unkompliziert angewendet werden. Auch eine interaktive Anwendung ist möglich. Die reflexionsbasierten Eye-Tracker sind aus diesen Gründen weit auf dem Markt verbreitet und werden in einer Vielzahl von Studien verwendet.

2.4.3 Eye-Tracker Arten

Es gibt verschiedene Arten von Eye-Tracking-Geräten, die sich grundsätzlich in zwei Gruppen unterteilen lassen: die mobilen Eye-Tracker und die Remote-Eye-Tracker.

Die mobilen Eye-Tracker werden am Kopf des Probanden befestigt. Normalerweise sehen sie wie eine Brille aus, die mit einer Kamera zur Aufzeichnung von Blickpunkten ausgestattet ist (81). Bewegt der Proband seinen Kopf, so bewegt sich das Koordinatensystem mit den Blickkoordinaten mit (81). Daraus resultiert ein großer Vorteil der Bewegungsfreiheit, der in Studien verwendet werden kann, in denen eine freie Interaktion mit der Umgebung erforderlich ist. Der Nachteil dieser Methode liegt in weniger zuverlässigen und präzisen Daten.

Die Remote-Eye-Tracker zeichnen die Augenbewegungen aus einiger Entfernung auf und erfordern keinen physischen Kontakt mit dem Probanden. Die Kamera befindet sich in einem festen Abstand vor dem Probanden und ist beispielsweise am unteren Rand des Monitors befestigt, auf dem die visuellen Stimuli ablaufen. Durch die Infrarotlichtquelle werden die kornealen Reflexe erzeugt, die von der Kamera aufgezeichnet und von der Software analysiert werden. Das Koordinatensystem, anhand dessen die Blickpunkte errechnet werden, ist auf den visuellen Stimulus auf dem Monitor bezogen. Bewegt der Proband seinen Kopf, so sollte der ausgerechnete Blickpunkt trotzdem konstant bleiben (81). Der Vorteil liegt in der höheren Genauigkeit von Daten. Der Nachteil ist, dass, obwohl der Proband seinen Kopf bewegen kann, die Bewegungen nur in einem vom Eye-Tracking-System vorgegebenen Rahmen stattfinden dürfen, was wiederum die Bewegungsfreiheit einschränkt (81).

Es existiert zusätzlich eine Variante der Remote-Eye-Tracker-Systeme, bei der der Kopf des Probanden fixiert wird. Dies geschieht mittels einer Kinnstütze, oft in Kombination mit einer Stütze für die Stirn. Damit wird die Qualität der gewonnenen Daten gesteigert. Die Wahrscheinlichkeit, die kornealen Reflexionen und somit das Signal durch die Kopfbewegungen zu verlieren, wird reduziert, und es können feinere Details im Blickmuster aufgezeichnet werden

(81). Das System ist für die Studien optimal, die keine Bewegungen, Interaktionen oder Sprechen vom Probanden erfordern.

Zusätzlich zur Art der Positionierung und der Befestigung von Eye-Trackern unterscheidet man die monokularen von den binokularen Systemen. Bei monokularen Eye-Trackern werden die Daten nur von einem Auge aufgezeichnet und daraus die Blickrichtung errechnet, während bei den binokularen Systemen entsprechend die Position beider Augen aufgezeichnet wird.

Es werden auch die sogenannten „Single-“ von den „Dual-Eye-Tracking-Setups“ unterschieden. Beim Single-Setup werden Daten von lediglich einem Probanden in einer interaktiven Situation aufgezeichnet, während das duale Setup die Blickaufzeichnung von zwei Probanden gleichzeitig, beispielsweise während der Interaktion miteinander, ermöglicht (81).

2.4.4 Einsatzgebiete

Die Eye-Tracking-Technologie wird heutzutage vielfältig eingesetzt.

Wird ein visueller Stimulus fixiert, so wird ein detailliertes Bild davon auf der Fovea des Auges abgebildet. Diese visuelle Information wird zum zentralen Nervensystem über Thalamus, Okzipitallappen und weitere Regionen weitergeleitet und in Folge verarbeitet und interpretiert (82). Während der Fixation bewegt sich das Auge typischerweise für 200 bis 500 Millisekunden nicht (83), wobei die genaue Dauer von der Art des visuellen Stimulus und der dem Probanden gestellten Aufgabe abhängig ist (82). Zwischen den einzelnen Fixationen kommt es zu sakkadischen Augenbewegungen, bei denen keine visuellen Informationen weitergeleitet werden (82). Da die Fixationen zum Großteil unbewusst erfolgen, können die Probanden sich nicht exakt daran erinnern, auf welche Details ihr Blick gerichtet war (82). Die Analyse der Blickpfade liefert folglich Informationen über die Punkte oder Stimuli, die die Aufmerksamkeit des Probanden, ob bewusst oder unbewusst, erregt haben. Das macht das Eye-Tracking zu einer geeigneten Methode, um Fragestellungen zu mentalen Prozessen zu beleuchten (82).

Die klinische Lehre ist ein großes Gebiet, auf dem die Eye-Tracking-Systeme vielfältig verwendet werden. In der Ausbildung kann ein gezieltes Blicktraining erfolgen, um die Aneignung bestimmter Betrachtungsmuster oder eine schnellere Fixierung der kritischen Punkte zu ermöglichen. In mehreren Studien erwies sich ein gezieltes Blicktraining gegenüber dem konventionellen Training als überlegen, weil so die Blickpfade von Experten schneller von den Novizen übernommen werden (84). Beispielsweise beim chirurgischen Training kann die Aufzeichnung von Augenbewegungen und Blickmustern des erfahrenen Chirurgen bei der Ausbildung von künftigen Chirurgen helfen (85, 86).

Außerdem kann die Auswertung der Betrachtungsmuster von Experten während der Interpretation von Röntgenbildern, histopathologischen Bildern oder Elektrokardiogrammen neue Erkenntnisse zur Fragestellung liefern, wie die Experten zur Diagnosestellung kommen (84, 87). Die Analyse der Blickpfade kann darüber hinaus bei der Verbesserung computerbasierter Diagnostik behilflich sein (84).

Eine weitere medizinische Anwendung liegt im Hinzuziehen von Eye-Trackern zur Unterstützung bei der Diagnostik neurologischer Erkrankungen. Bei Krankheiten wie Morbus Alzheimer, Morbus Parkinson oder Multipler Sklerose kann die Analyse von Augenbewegungen und die Feststellung von leichten Normabweichungen wichtige Erkenntnisse liefern, was im besten Fall zum Diagnostizieren der Krankheit bereits im Frühstadium führt (79).

Auch in den Marketingstudien erweisen sich die Systeme zur Blickverfolgung als nützlich (79). Nimmt man das Einkaufen als Beispiel, so werden die Personen dabei einer Vielzahl von visuellen Stimuli ausgesetzt, von denen einige ihre Aufmerksamkeit erregen und möglicherweise zur Entscheidungsfindung beitragen. Eye-Tracking kann verwendet werden, um die visuelle Verarbeitung der Konsumenten von diversen Stimuli zu analysieren (83).

2.4.5 Anwendung in Zahnmedizin

2.4.5.1 Ermittlung der Betrachtungsmuster

Auch in der Zahnmedizin erlauben die Eye-Tracker neue Erkenntnisse über die Betrachtungsmuster der Zahnmediziner während der Interpretation von Röntgenbildern zu gewinnen.

Die Studie von Borchers et al. untersuchte die Betrachtungsmuster der Studierenden der Zahnmedizin in unterschiedlichen Semestern während der Interpretation eines Orthopantomogramms (88). Es wurde folgende Suchstrategie ermittelt: Im ersten Drittel der vorgegebenen Zeit wird das Röntgenbild global betrachtet, während in Folge die Anomalien genauer fixiert und am Ende einige davon erneut betrachtet werden. Eine ähnliche Studie untersuchte das Betrachtungsmuster der Zahnärzte während der Interpretation eines intraoralen Zahnfilms (89).

Weiterhin wurden die Unterschiede in den Betrachtungsstrategien abhängig vom Ausbildungsstand der Probanden untersucht (90, 91). Die Studie von Richter et al. konzentrierte sich auf die Unterschiede in der Betrachtungsweise der Studenten vor und nach einem radiologischen Kurs, bei dem sie mit einer Vielzahl an Orthopantomogrammen konfrontiert und über eine effektive Suchstrategie informiert wurden (91). Nach dem Kurs wurde eine Veränderung der Betrachtungsmuster festgestellt, die mit einer verbesserten Detektion von Anomalien einherging. Jedoch wurden nach dem Kurs auch mehrere falsch-positive Diagnosen gestellt.

Informationen aus solchen Studien können genutzt werden, um die klinische Lehre zu optimieren und die aufgedeckten Lücken zu schließen.

2.4.5.2 Studien mit ästhetischen Fragestellungen

Die Attraktivität eines Gesichts wird innerhalb der ersten Sekunden der Betrachtung festgelegt (92). Eye-Tracking ist eine objektive Methode, um festzustellen, welche visuellen Stimuli Aufmerksamkeit erregen. Es erlaubt

sofortige Änderungen im visuellen Verhalten festzustellen und herauszufinden, was zur ästhetischen Wahrnehmung beiträgt (92).

Viele Studien mit ästhetischen Fragestellungen laufen wie folgt ab: Die Probanden betrachten mehrere Bilder von Personen, die je nach untersuchten Kriterien leichte Unterschiede aufweisen, und bewerten diese in Folge mit Hilfe einer visuellen Analogskala. Dabei erfolgt die Bewertung sehr subjektiv und kann von diversen Faktoren beeinflusst werden, die dem Probanden oft unbewusst sind. Die Kombination aus der Bewertung und der Anwendung von Eye-Tracking-Geräten in solchen Studien bietet neue Möglichkeiten der Analyse. Die Auswertung der Blickpfade der Probanden lässt darauf schließen, welche Regionen der Bilder länger oder häufiger betrachtet wurden. Werden diese in Kombination mit den Bewertungen analysiert, so können Faktoren erkannt werden, die die ästhetische Wahrnehmung der Probanden beeinflussen.

So können Faktoren ermittelt werden, die die Attraktivität des Lächelns beeinflussen. Beispielsweise führt eine höhere Lachlinie in Portraits zu längeren Betrachtungszeiten der Mundregion und niedrigeren Bewertungen (93). Auch ausgeprägte schwarze Interdentaldreiecke haben eine ähnliche Auswirkung (94). Generell kann das Vorhandensein eines Lächelns die Aufmerksamkeit positiv beeinflussen (92). Weitere Studien beschäftigten sich mit Malokklusionen und ihren Auswirkungen auf die Attraktivität (14, 95, 96).

Die Studie von Richards et al. zeigte, dass der Mund, nach den Augen, die am häufigsten fixierte Region beim Betrachten eines Gesichts ist (97). Dies unterstreicht die Wichtigkeit und den hohen Einfluss dieser beiden Zonen bei der ästhetischen Wahrnehmung. Auch haben die Autoren der Studie herausgefunden, dass die Mundregion häufiger fixiert wird, je weniger ästhetisch die dentalen Gegebenheiten erscheinen. Allerdings ist dies nur bei den als attraktiv bewerteten Gesichtern der Fall. Je attraktiver ein Gesicht ist, umso geringer müssen Abweichungen von der idealen dentalen Ästhetik sein, um die Aufmerksamkeit auf die Mundpartie zu lenken.

Die Studie von Yamamoto et al. zeigte, dass die Probanden die Mundpartie für eine längere Zeit fixieren, wenn die abgebildete Person lächelt (98). In der Studie

wurden Bilder von Personen mit geschlossenem Mund mit denen mit einem Lächeln verglichen. Dies unterstreicht in den Augen der Autoren die Notwendigkeit ästhetischer Behandlungen der Zähne, da diese bei einem Lächeln sichtbar werden.

In einer weiteren Studie haben Yamamoto et al. das Blickverhalten von Probanden untersucht, die dentale Fotografien mit unästhetischen Restaurationen betrachteten (99). Bei den Probanden handelte es sich um nicht zahnmedizinisch tätige Personen. Die Bilder wurden so bearbeitet, dass sich eine unästhetische Restauration in Form von metallischer oder verfärbter Krone im Gebiss befand und auf der gegenüberliegenden Seite davon derselbe Zahn keine Auffälligkeiten aufwies. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Probanden jeweils die Seite des Gebisses, wo sich die Restauration befand, zuerst fixierten und länger fixierten. Es gab jedoch keine großen Unterschiede in der Fixationsdauer abhängig von der Art der Restauration.

Die beispielhaft ausgewählten Studien zeigen eine breite Palette an Anwendungsmöglichkeiten von Eye-Trackern in der Zahnmedizin. Bei den Forschungen auf dem Gebiet der ästhetischen Zahnmedizin können durch zusätzliches Hinzuziehen von Eye-Tracking-Daten die Informationen über das unbewusste Blickverhalten der Probanden vervollständigt werden. So können die Aspekte ermittelt werden, welche die Aufmerksamkeit des Betrachters, ob bewusst oder unbewusst, erregen und folglich die ästhetische Wahrnehmung beeinflussen. Diese Erkenntnisse können sich bei der Therapieplanung von ästhetischen Eingriffen als nützlich erweisen.

3 Material und Methode

3.1 Material

3.1.1 Studienteilnehmer

Insgesamt bestand das Probandenkollektiv aus 60 Teilnehmern, die dem Studiengang der Zahnmedizin angehörten. Die Probanden wurden zwei Gruppen mit je 30 Personen zugeordnet, den sogenannten „Laien“ und „Experten“. Die Zuordnung erfolgte basierend auf dem zahnmedizinischen Wissensstand der Teilnehmer. Alle Probanden wurden in der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz rekrutiert.

Die Studierenden, die sich im 1. vorklinischen Fachsemester befanden, repräsentierten die Gruppe der Laien, da sie noch nicht über das spezifische zahnmedizinische Wissen über die dentale Ästhetik verfügten und ihr Blickverhalten beim Betrachten von Zahnreihen noch nicht geschult war. Die Expertengruppe bestand aus Studierenden der klinischen Fachsemester, die bereits Patientenkontakt über mindestens ein Semester hatten. So wurde sichergestellt, dass die Probanden bereits über die erforderlichen Kenntnisse der dentalen Ästhetik verfügten, ihre ästhetische Wahrnehmung entsprechend geschult wurde und sie bereits ihr Wissen bei der Patientenbehandlung und Therapieplanung einsetzen konnten. Aus diesen Gründen wurden lediglich Studierende des 3., 4. und 5. klinischen Semesters zur Studie zugelassen.

Probanden, die der Teilnahme an der Studie sowie der Datenerhebung und -speicherung nicht zustimmten, wurden ausgeschlossen. Weiterhin wurden Probanden ausgeschlossen, die Sehhilfen in Form von Kontaktlinsen trugen oder eine Laseroperation am Auge erlitten hatten. Diese Eingrenzung war notwendig, da während des Versuchsablaufs eine Aufzeichnung der Augenbewegungen mittels Eye-Tracking-System erfolgte. Die oben genannten Aspekte hätten die Funktionsweise des Geräts eingeschränkt, die Aufzeichnung verhindert und zu Fehlmessungen geführt.

3.1.2 Fotografie

Von vier Probanden, die ihre Einwilligung zum Verwenden ihrer Fotografien in der Studie erteilten, wurden jeweils Frontzahaufnahmen erstellt. Dafür wurde die Kamera Nikon D5200, Micro Nikkor Lens 105mm, Nikon®, Tokyo, Japan mit einem Makroblitz Nikon R1C1 Wireless Close-Up Speedlight System, Nikon®, Tokyo, Japan verwendet.

Die gewählten vier Probanden entsprachen folgenden Einschlusskriterien. Sie sollten über eine vollständige anteriore Bezahnung (14 bis 24) verfügen, wobei auf das Fehlen auffälliger oder unästhetischer Restaurationen in der Front geachtet wurde. Schiefstände oder Asymmetrien stellten kein Ausschlusskriterium dar, da die Studie eine möglichst natürliche Bezahnung untersuchen sollte. Bei der Aufnahme wurden die Wangen und Lippen der Probanden mit einem Retraktor abgehalten. Auf die Verwendung eines Kontrastors wurde verzichtet, um die natürlichen Licht- und Farbverhältnisse der Mundhöhle beizubehalten. Die Aufnahmen zeigten die anteriore Bezahnung, einschließlich der Zähne 14 bis 24 und der Gingiva, in scharfer Abbildung.

Von den vier Originalaufnahmen wurden jeweils vier Kopien erstellt und jede davon im Anschluss modifiziert, um unterschiedliche Ästhetik zu simulieren. Die Bildbearbeitung erfolgte mit dem webbasierten Bildbearbeitungsprogramm Photopea (Version 5.6, 2024, <https://photopea.com>). Daraus resultierten jeweils vier Bilder, die entweder ein ästhetisch mangelhaftes Detail, eine hellere Zahnfarbe, eine symmetrische Zahnreihe oder eine Kombination aus den letzten beiden Eigenschaften zeigten.



Abbildung 1: Visuelle Stimuli

a-d: Originalbilder; **e-h:** aufgehellte Versionen der Originalbilder; **i-l:** gespiegelte Versionen der Originalbilder; **m-p:** gespiegelte und aufgehellte Versionen der Originalbilder; **q-t:** Originalbilder mit unästhetischen Details

Die erste Veränderung betraf ausschließlich die Zahnfarbe. Die auf dem Originalbild sichtbaren Zähne des Oberkiefers wurden durch gezielte Modifikation des Farbtons, der Sättigung und der Helligkeit des Originalbildes aufgehellt. Dazu wurde der gelbe Farbton der Zähne folgendermaßen verändert: Anpassen des Farbtons (-8°), Reduzierung der Sättigung (-100) und Erhöhung der Helligkeit ($+100$). Es resultierten Bilder, die das Ergebnis einer erfolgten Bleaching-Therapie simulierten (Abb. 1 e-h).

Die nächste Veränderung betraf die Symmetrie der Zahnreihe. Bei den Originalaufnahmen wurden die Zähne eines Quadranten vertikal gespiegelt. Dabei wurde darauf geachtet, dass derjenige Quadrant gespiegelt wurde, der über eine bessere Ästhetik verfügte und beispielsweise keine Drehstände oder auffällige Formalterationen der Zähne aufwies. Die daraus entstandenen Bilder

einer symmetrischen und harmonischen Zahnreihe sind auf den folgenden Abbildungen zu sehen (Abb. 1 i-l).

Anschließend wurden die beiden oben beschriebenen Modifikationen kombiniert auf die vier Originalaufnahmen angewendet. Dies hatte zur Folge, dass die Zahnreihe des Oberkiefers aufgehellte und symmetrisch erschien (Abb. 1 m-p).

Als Letztes wurde auf die Originalaufnahmen ein ästhetisch mangelhaftes Detail eingefügt. In drei der vier Originale wurde eine verfärbte Zahnkrone (Abb. 1 q-s) und im letzten Originalbild eine ästhetisch insuffiziente indirekte Restauration (Abb. 1 t) simuliert. Die Verfärbungen der Zahnkronen wurden durch eine selektive Farbkorrektur, Erhöhung der Sättigung der Gelbtöne und Reduzierung der Helligkeit erreicht. Sie betrafen in Abb. 1q den Zahn 11, in Abb. 1r den Zahn 13 und in Abb. 1s den Zahn 21. In Abb. 1t wurde eine insuffiziente Verblend-Metall-Keramik-Krone am Zahn 13 hinzugefügt. Um die ästhetische Insuffizienz der Versorgung zu simulieren, wurden die Farben so modifiziert, dass die keramische Verblendung deutlich bräunlich verfärbt erschien und ein metallisch grauer Kronenrand zu sehen war. Zusätzlich wurde die Farbe des Zahnhalses verändert, um ihn dunkler erscheinen zu lassen.

Anschließend wurde die Reihenfolge der Bilddarstellung festgelegt. Die Originalbilder wurden den Probanden als Erstes eingeblendet. Im Anschluss folgten die Computer-bearbeiteten Bilder in zufälliger Reihenfolge. Die zufällige Sortierung der Bilder wurde mit Hilfe von Microsoft Excel durchgeführt. Die dadurch entstandene Reihenfolge wurde festgehalten und bei jedem Versuchsdurchlauf beibehalten, um die spätere Auswertung zu vereinfachen.

3.1.3 Eye-Tracking-System

Für die Studie wurde das Eye-Tracking-System EAS Monocular (LC Technologies, Inc., Fairfax, Virginia, USA) verwendet.

Bei dem verwendeten System handelt es sich um einen monokularen berührungsfreien Remote-Eye-Tracker mit einer Abtastrate von 60 Hz. Die

Messgenauigkeit der Aufzeichnung beträgt laut Herstellerangaben $<0,4^\circ$. Die Berechnung der Blickposition erfolgt reflexionsbasiert durch den sogenannten Bright-Pupil-Effekt. Dabei wird die Infrarotlichtquelle in der Nähe der optischen Achse der Kamera positioniert. Die Pupille wird so ausgeleuchtet, dass eine Reflexion an der Retina entsteht und dadurch die Pupille heller als die Iris erscheint (72). Diese Reflexion kann durch die Kamera aufgezeichnet werden. Laut Herstellerangaben können durch den Einsatz dieser Methode Messungenauigkeiten vermieden werden, die durch einen geringen Kontrast zwischen der dunklen Pupille und einer dunklen Iris, Make-up, Brillengestellen oder dunklen Gesichtsbereichen entstehen.

Vor der Datenaufzeichnung erfolgte zunächst eine automatische Kalibrierung, bei der 9 Punkte nacheinander in verschiedenen Ecken auf dem Monitor eingeblendet wurden, die die Testperson mit den Augen fixieren musste. Das System prüfte dabei, ob jeder Punkt genau fixiert werden konnte. Sollte bei manchen Punkten der Fixationsort vom Kalibrierungspunkt zu stark abweichen, wurden diese Punkte erneut präsentiert. Der Vorgang wurde, falls notwendig, so lange wiederholt, bis die gewünschte Genauigkeit erreicht war.

Obwohl die Hersteller angeben, dass selbst bei absoluter Bewegungsfreiheit des Probanden zuverlässige Messungen entstehen können, wurde im Versuchsaufbau eine Kinnstütze verwendet, um die Messgenauigkeit zusätzlich zu erhöhen. Sie garantierte eine stabile Kopfposition des Probanden in 60 cm Entfernung zum LED-Monitor (Fujitsu B22W-6, Fujitsu Technology Solutions, Tokyo, Japan), auf dem die visuellen Stimuli präsentiert wurden.

3.1.4 Software

Das in der Studie verwendete Eye-Tracking-System wurde mit der Software Nyan v.2.0 Eyetracking Analysis Suite (Interactive Minds, Dresden, Deutschland) betrieben.

Die Software bietet verschiedene Möglichkeiten zur Präsentation der Stimuli, Datenerhebung, -visualisierung, -analyse und Export. Bilder, Texte, Bildschirminhalte, Videos oder Webseiten können die möglichen präsentierbaren Stimuli darstellen. Die aufgezeichneten Daten können die Blickorte, 3D-Augapfelpositionen, Fixationen und Sakkaden, Tastendrucke oder Interaktionen mit Webseiten umfassen (100).

Die Software ermöglicht dem Benutzer bestimmte „Areas of Interest“ (AOI) bei den Stimuli festzulegen. Die AOIs können beliebig geformte statische oder dynamische Elemente eines Stimulus sein, wie zum Beispiel bestimmte Bereiche eines Bildes oder Elemente einer Webseite. Durch die Festlegung von AOIs kann bei der anschließenden Blickaufzeichnung die Anzahl an Fixationen auf die einzelnen AOIs sowie die Zeit bis zur ersten Fixation, die Gesamtblickdauer und die mittlere Fixationsdauer berechnet werden. Zusätzlich können die AOIs zu Gruppen zusammengefasst werden, um Vergleiche für die Auswertung zu ermöglichen. Bei der Datenanalyse stehen dem Benutzer eine Vielzahl von Visualisierungen zur Verfügung, darunter Blickzeitdiagramme (gaze time plot), Blickpfade, Attention Maps sowie Gruppenvergleichsanalysen und die Analyse von statischen oder dynamischen AOIs (100).

Für das vorliegende Studienprojekt wurden 20 visuelle Stimuli in Form von Frontzahnaufnahmen in der festgelegten Reihenfolge präsentiert. Diese wurden für jeweils 5 Sekunden auf dem Monitor angezeigt, gefolgt von einem 5-sekündigen Black Screen zwischen den Bildern. In jedem der 20 Bilder wurden jeweils die sogenannten „Areas of interest“ (AOIs) festgelegt. Es handelte sich hierbei um statische AOIs, die in zwei Gruppen unterteilt wurden: die Zähne und die Gingiva. Jeder Zahn in der Zahnreihe von 14 bis 24 wurde als AOI markiert, und für die AOI „Gingiva“ war nur die sichtbare Schleimhaut des Oberkiefers relevant. Es resultierten folglich 9 AOIs pro Bild.

3.2 Methode

3.2.1 Versuchsablauf

Alle Probanden wurden vor Versuchsbeginn über den Ablauf, das Ziel der Studie sowie die damit verbundene Erfassung der Blickdaten aufgeklärt. Jeder Teilnehmer erhielt eine Informationsschrift, in der auf die Freiwilligkeit der Studienteilnahme, die Erfassung und Speicherung von Daten sowie die Möglichkeit hingewiesen wurde, jederzeit die Zustimmung zu widerrufen. Nach der Aufklärung wurden die persönlichen Daten der Teilnehmenden erhoben. Die Angabe des Namens, Geschlechts, Geburtsdatums und des Fachsemesters war dabei erforderlich. Jedem Probanden wurde eine eindeutige Identifikationsnummer zugeordnet, die der Anonymisierung der Daten bei der späteren Speicherung und Analyse diene.

Während der Testdurchläufe wurde festgestellt, dass Tageslicht oder sonstige Lichtquellen den Kalibrierungsvorgang des Eye-Tracking-Systems störten und dieser oft nicht durchführbar war. Dieses Problem kam gehäuft bei den Brillenträgern vor, vermutlich aufgrund von zusätzlichen Reflexionen der Brillengläser. Aus diesem Grund wurde die Studie in einem abgedunkelten Raum ohne Tageslichteinflüsse durchgeführt. Der Raum entsprach einem zahnärztlichen Bildarbeitsplatz der Raumklasse 5, mit einer Raumhelligkeit von maximal 100 Lux und einem Befundungsmonitor von 250 cd/m² Displaydichte, was über der geforderten Leuchtdichte von 200 cd/m² für Raumklasse 5 liegt (101).

Den Probanden wurde eine kurze Eingewöhnungszeit gewährleistet, damit sie sich an die Lichtverhältnisse adaptieren konnten. Die Abdunkelung des Raumes hatte zusätzlich den Vorteil, dass die Probanden sich lediglich auf den Monitor konzentrieren konnten, ohne von der Umgebung abgelenkt zu werden.

Die Versuchsteilnehmer erhielten die Anweisung, die eingeblendeten Bilder in Hinblick auf die anschließende Evaluation der Ästhetik zu betrachten. Spezifische ästhetische Kriterien, nach denen die Bewertung erfolgen sollte, wurden jedoch nicht benannt. Die Bewertung erfolgte auf einer Likert-Skala von 1 bis 5, wobei 1 „sehr gute Ästhetik“ und 5 „sehr schlechte Ästhetik“ bedeutete.

Nach der Einweisung wurde der Proband individuell positioniert. Dabei wurde der Kopf in 60 cm Abstand vom Bildschirm mit einer Kinnstütze fixiert, um mögliche störende Bewegungen während der Aufzeichnung zu reduzieren. Zu Übungs- und Testzwecken erfolgte zunächst eine Kalibrierung des Eye-Tracking-Systems. Der Proband wurde darauf hingewiesen, jegliche Bewegungen möglichst zu vermeiden und die eingeblendeten Punkte lediglich mit den Augen zu verfolgen, um eine hohe Erfassungsgenauigkeit sicherzustellen. Danach wurde die Kopfposition gegebenenfalls erneut angepasst, sodass die Pupillenreflexionen von der Kamera optimal erkannt werden konnten.

Die Aufzeichnung startete mit der automatischen Kalibrierung des Systems, bei der 9 Punkte an unterschiedlichen Ecken des Bildschirms nacheinander eingeblendet wurden. Im Anschluss erfolgte die Präsentation der 20 Bilder in der festgelegten Reihenfolge. Jedes Bild erschien für jeweils 5 Sekunden auf dem Bildschirm, dazwischen folgte ein 5-sekündiger schwarzer Hintergrund. Nach einem vollständigen Durchlauf wurde die Aufzeichnung gestoppt und es erfolgte ein zweiter Durchlauf, um die Evaluation der einzelnen Bilder zu dokumentieren. Es wurde bewusst darauf verzichtet, die Bewertung der Ästhetik während der Blickaufzeichnung zu erheben, da dies den Probanden abgelenkt und zu Bewegungen des Kopfes beim Sprechen hätte führen können. Für den Bewertungsdurchlauf war keine Aufzeichnung der Augenbewegungen erforderlich. Die Frontzahaufnahmen wurden in derselben Reihenfolge als Bildpräsentation eingeblendet, wobei jedes einzelne Bild für jeweils 10 Sekunden sichtbar war, um den Probanden ausreichend Zeit für eine Entscheidung zu gewährleisten. Der Versuchsteilnehmende wurde aufgefordert, die Bewertung mündlich zu übermitteln, damit die Aufmerksamkeit weiterhin auf den Bildern lag. Die Dokumentation auf dem Evaluationsbogen erfolgte durch die Doktorandin (**Abbildung 2**).

Evaluationsbogen

Informationen

Probanden-ID:

Datum:

Bewerten Sie die Ästhetik des Gebisses auf den folgenden Bildern:

	(1) ausgezeichnet	(2) gut	(3) mäßig	(4) ausreichend	(5) mangelhaft
Bild 1	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 2	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 3	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 4	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 5	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 6	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 7	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 8	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 9	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 10	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 11	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 12	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 13	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 14	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 15	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 16	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 17	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 18	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 19	☐	☐	☐	☐	☐
Bild 20	☐	☐	☐	☐	☐

Abbildung 2: Evaluationsbogen

3.2.2 Datenexport und Auswertung

Anschließend an die Versuchsdurchläufe wurden die aufgenommenen Eye-Tracking-Daten in Form von Excel-Tabellen des .xls-Formats exportiert (Microsoft Excel 2003, Version 11.0 für Microsoft Windows, Chicago, Illinois, USA). Der Datenexport erfolgte manuell für jedes Bild für jeden Probanden. Es entstanden so zunächst einzelne Excel-Tabellen, die die Eye-Tracking-Daten Time To First Fixation, Total Fixation Count, Total Gaze Duration und Total Mean Fixation Duration für alle 9 zuvor definierten AOIs sowie für die Fläche außerhalb aller AOIs beinhalteten. Die Tabellen wurden in .xlsx-Format konvertiert und die weitere Bearbeitung erfolgte mit Microsoft Excel Version 16.89.1 für Mac, Chicago, Illinois, USA. Die Daten wurden manuell zusammengeführt und für

jeden Probanden je eine Tabelle mit den Eye-Tracking-Daten aller 20 Bilder angelegt.

Die statistische Auswertung wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Medizinische Biometrie, Epidemiologie und Informatik der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz durchgeführt.

Die statistische Analyse der Daten wurde mit dem Programm SPSS (IBM® SPSS® Statistics for Windows, Version 23.0.0.3, Armonk, NY, USA) durchgeführt.

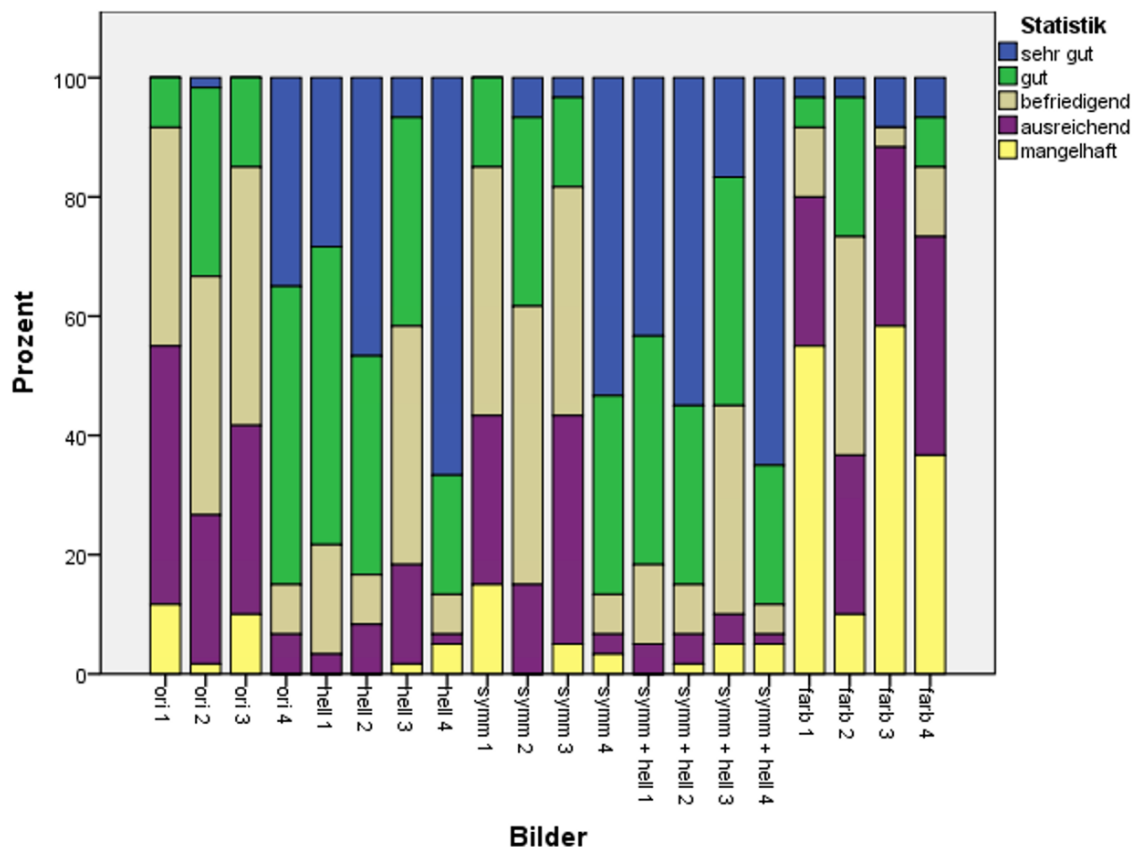
Die deskriptive statistische Analyse beinhaltete Lage- und Streuungsmaße wie Mittelwert, Median, Standardabweichung, Minimum, Maximum, sowie die relativen und absoluten Häufigkeiten der Merkmalsausprägungen. Um die Datenverteilung und Vergleiche zwischen verschiedenen Probandengruppen zu visualisieren, wurden Stapeldiagramme und Boxplots erstellt. Die Stapeldiagramme eigneten sich für die Darstellung der Notenverteilung, während Boxplots die Verteilung der Eye-Tracking-Daten und Vergleiche sowohl zwischen den Probandengruppen als auch zwischen den einzelnen Bildarten bzw. den AOIs veranschaulichten.

Um die Unterschiede zwischen zwei Gruppen festzustellen, wurde der Mann-Whitney-U-Test als nicht-parametrischer Test für unabhängige Stichproben auf einem Signifikanzniveau von $p=0,05$ durchgeführt. Um die Variablen „Verfärbung“ und „höchste Blickdauer“ auf Abhängigkeit zu prüfen, wurde der Chi-Quadrat-Test durchgeführt, wobei auch hier ein Signifikanzniveau von $p=0,05$ galt.

4 Ergebnisse

4.1 Bewertungen

Insgesamt haben $N = 60$ Probanden bezüglich der 20 Frontzahaufnahmen 1200 Bewertungen getroffen. Die Note 2 „gut“ wurde am häufigsten vergeben und machte 309 Bewertungen aus, was 26% aller Bewertungen entspricht. An zweiter Stelle folgte die Note 1 „sehr gut“ mit 279 bzw. 23% aller Bewertungen. Danach folgten Note 3 „befriedigend“ mit 279 Bewertungen bzw. 23%, Note 4 „ausreichend“ mit 212 bzw. 18% und Note 5 „mangelhaft“ mit 130 bzw. 11% (Abbildung 3).

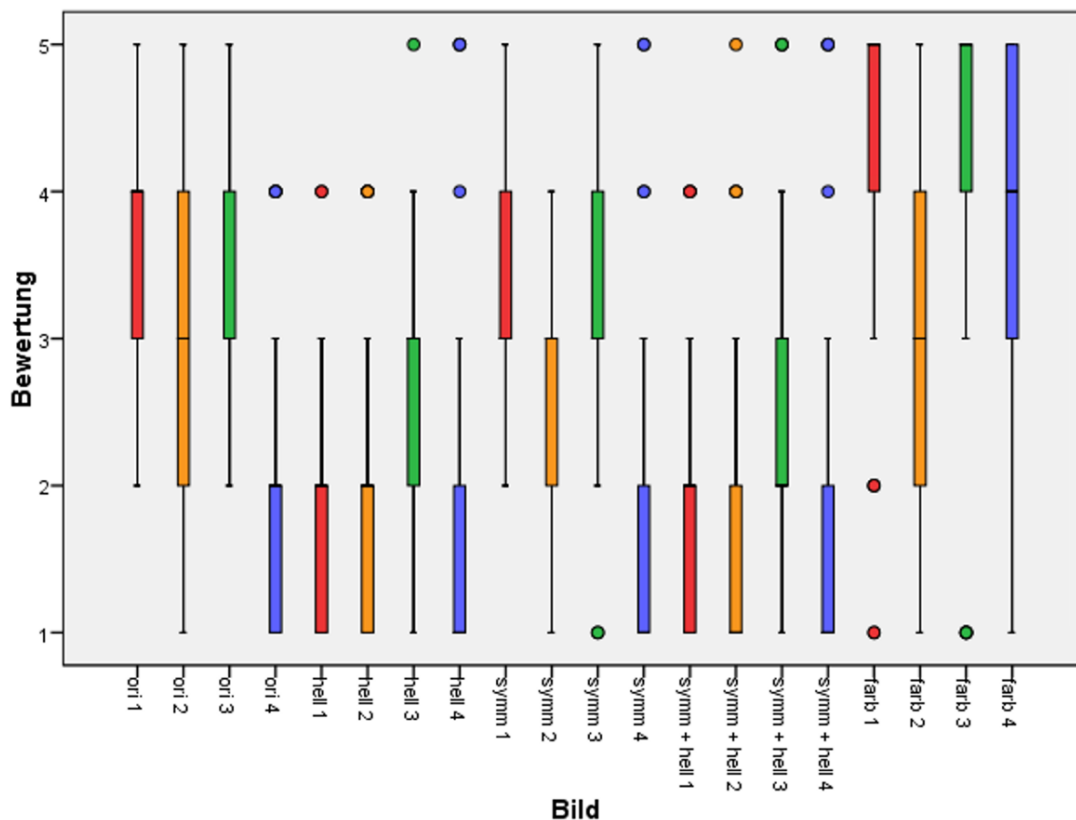


Abkürzungen: ori = Original, hell = aufgehellt, symm = symmetrisch, symm + hell = symmetrisch und aufgehellt, farb = verfärbt

Abbildung 3: Notenverteilung im Überblick

Die Bildarten „original“, „aufgehellt“, „symmetrisch“, „aufgehellt und symmetrisch“ und „verfärbt“ wurden bezüglich ihrer Mittelwerte verglichen (Abbildung 4). Die Originalaufnahmen der Frontzähne erzielten eine Durchschnittsbewertung von M

= 2,94 ($SD = 0,56$). Am besten wurden die Bilder bewertet, bei denen die Frontzähne sowohl aufgehellte als auch symmetrisch dargestellt wurden, mit einem durchschnittlichen Bewertungswert von $M = 1,88$ ($SD = 0,78$). Danach folgten die aufgehellten Bilder, die den Zustand nach einer Bleaching-Therapie simulierten, mit einem Mittelwert von $M = 2,01$ ($SD = 0,70$). Die Bilder, bei denen die Frontzähne lediglich gespiegelt wurden, um eine symmetrische Situation zu erzielen, wurden etwas schlechter bewertet als diejenigen, bei denen die Zähne aufgehellte wurden. Trotzdem lag der Durchschnitt der Bewertungen bei $M = 2,78$ ($SD = 0,60$) und somit über dem der unbearbeiteten Originalbilder. Die am schlechtesten bewerteten Bilder stellte die Zahnreihe mit einem verfärbten Zahn dar. Der Mittelwert der Bewertungen dieser Bilder lag mit $M = 3,9$ ($SD = 0,89$) deutlich unter dem der Originalbilder.



Abkürzungen: ori = Original, hell = aufgehellte, symm = symmetrisch, symm + hell = symmetrisch und aufgehellte, farb = verfärbte

Abbildung 4: Bewertungen aller Probanden im Überblick

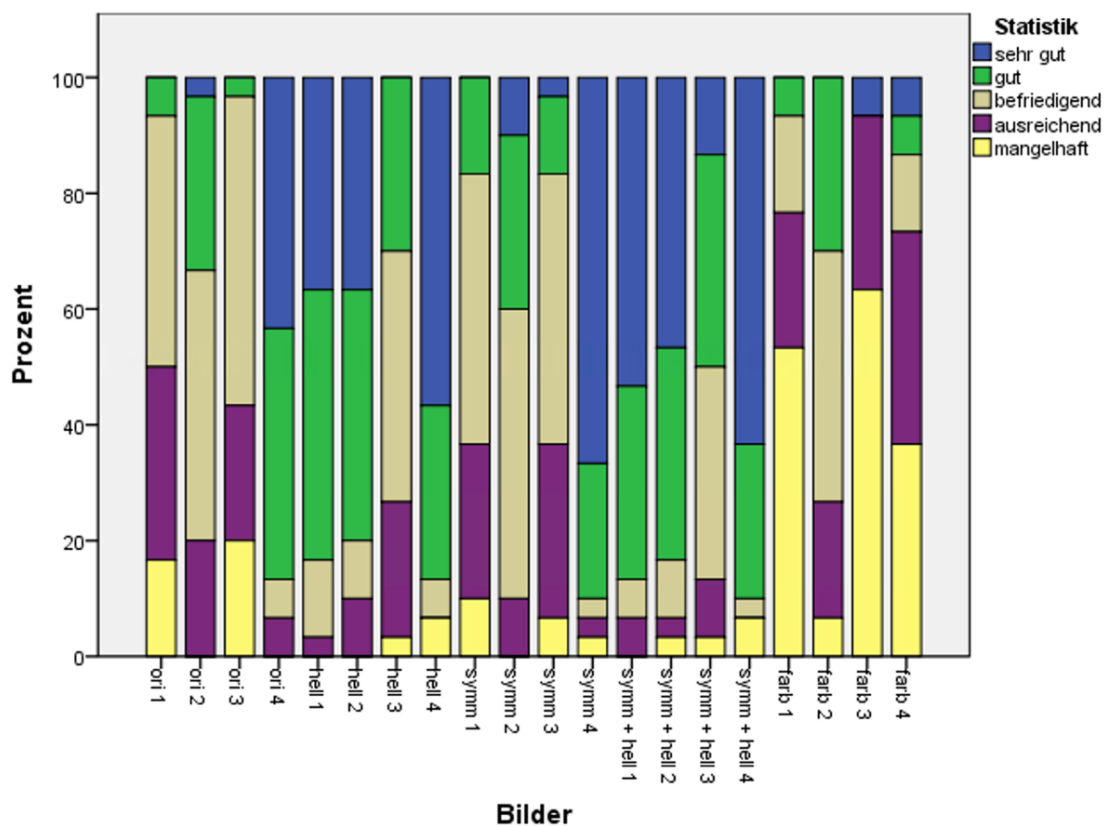
Zusammenfassend wurden somit die Bildarten folgendermaßen bewertet: In absteigender Reihenfolge erzielten die symmetrischen und aufgehellten Frontzähne die besten Bewertungen, gefolgt von rein aufgehellten, rein

symmetrischen, unbearbeiteten Originalbildern und schließlich von den Bildern unästhetisch verfärbter Zähne.

4.1.1 Vergleich zwischen den Gruppen

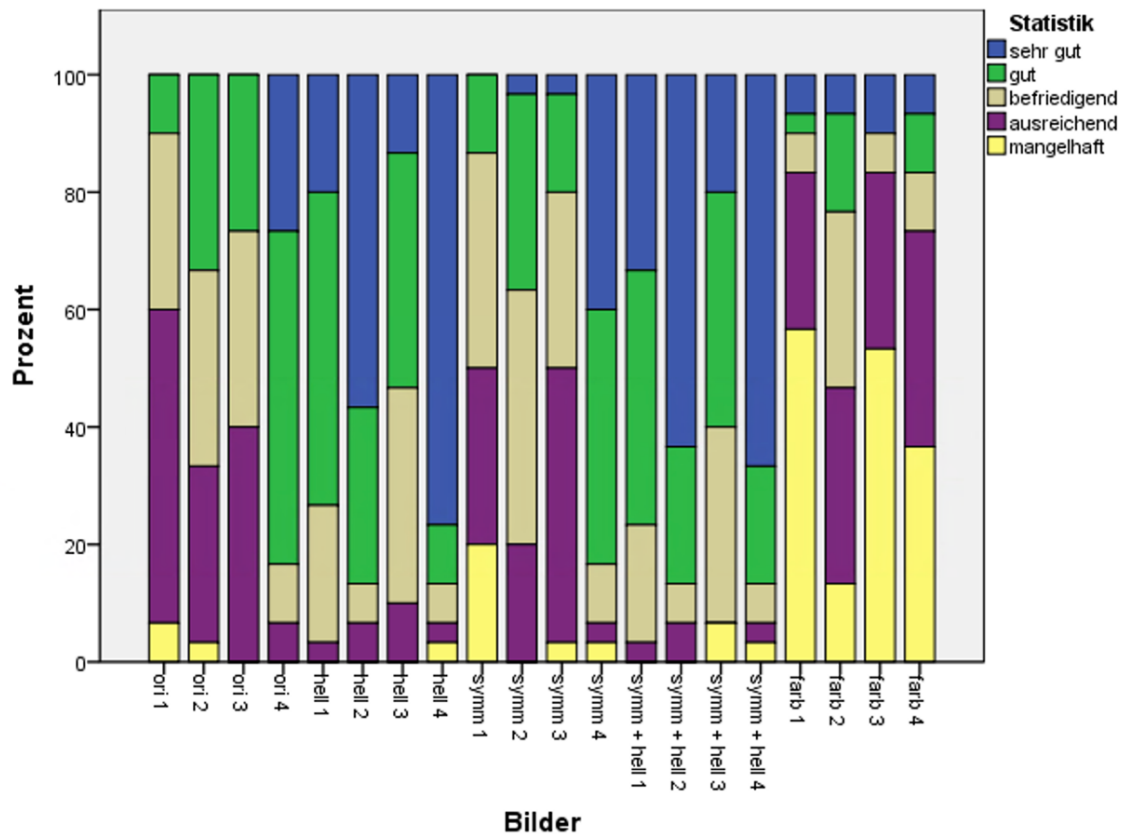
Die von den Experten am häufigsten verteilte Note war mit 25 % die Note „gut“, gefolgt von „sehr gut“ und „befriedigend“ mit jeweils 24% (**Abbildung 5**). Bei den Laien haben 26% der Probanden die Note „gut“ verteilt. Wie auch bei den Experten, war „gut“ die am häufigsten vergebene Note, gefolgt von der Note „sehr gut“ mit 23% (**Abbildung 6**).

Insgesamt wurden die beste Note „sehr gut“ und die schlechteste Note „mangelhaft“ von den Experten häufiger vergeben als von den Laien. Von insgesamt 600 Bewertungen haben die Experten 143 Mal „sehr gut“ und 67 Mal „mangelhaft“ verteilt. Im Vergleich dazu haben die Laien 136 Mal „sehr gut“ und 63 Mal „mangelhaft“ bei ihren Bewertungen festgehalten.



Abkürzungen: ori = Original, hell = aufgehellt, symm = symmetrisch, symm + hell = symmetrisch und aufgehellt, farb = verfärbt

Abbildung 5: Notenverteilung der Experten im Überblick



Abkürzungen: ori = Original, hell = aufgehellt, symm = symmetrisch, symm + hell = symmetrisch und aufgehellt, farb = verfärbt

Abbildung 6: Notenverteilung der Laien im Überblick

Der Mittelwert aller Bewertungen betrug $M = 2,70$ ($SD = 0,40$). Beim Vergleich der Durchschnittswerte der beiden Probandengruppen bewerteten die Experten mit einem Mittelwert von $M = 2,71$ ($SD = 0,39$) geringfügig strenger als die Laien, deren Mittelwert bei $M = 2,69$ ($SD = 0,42$) lag.

Beim Vergleich der Mittelwerte der Bewertungen einzelner Bildkategorien konnten keine Unterschiede zwischen den Experten und den Laien in Bezug auf die Reihenfolge der Bildkategorien nach der Höhe der Bewertung festgestellt werden. Beide Gruppen bewerteten die symmetrischen und aufgehellten Frontzähne am höchsten. Der Mittelwert lag dabei bei $M = 1,90$ ($SD = 0,79$) bei Experten und bei $M = 1,85$ ($SD = 0,77$) bei Laien. Danach folgten die rein aufgehellten Frontzähne mit Durchschnittsbewertungen von $M = 2,12$ ($SD = 0,69$) bei Experten und $M = 1,90$ ($SD = 0,70$) bei Laien. Am dritten Platz lagen bei beiden Gruppen die symmetrischen Frontzähne mit Mittelwerten von $M = 2,67$

($SD = 0,53$) bei Experten und $M = 2,89$ ($SD = 0,65$) bei Laien. Die unbearbeiteten Originale lagen bei beiden Gruppen auf dem vorletzten Platz mit Bewertungen von $M = 2,95$ ($SD = 0,58$) bei Experten und $M = 2,93$ ($SD = 0,55$) bei Laien. Die unästhetisch verfärbten Bilder erzielten die schlechtesten Bewertungen, der Mittelwert beider Gruppen lag bei $M = 3,9$ ($SD = 0,76$ bei Experten; $SD = 1,01$ bei Laien).

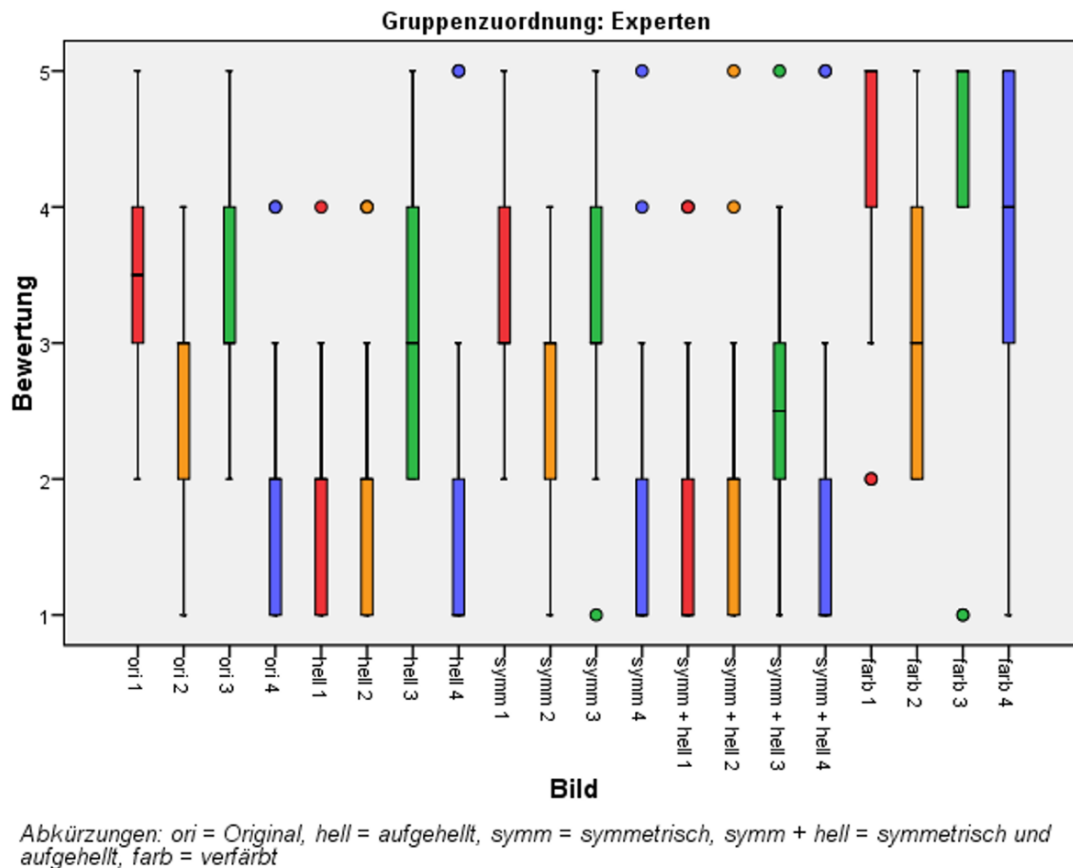


Abbildung 7: Bewertungen der Experten im Überblick

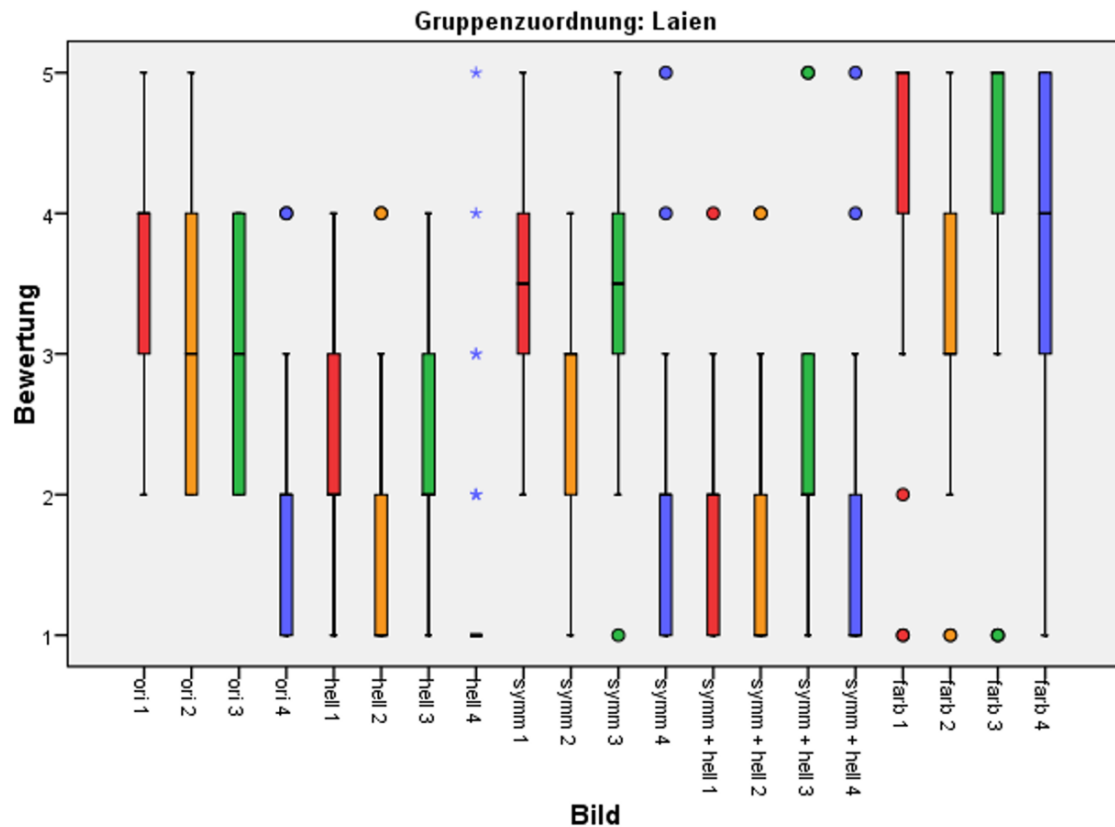


Abbildung 8: Bewertungen der Laien im Überblick

Die Nullhypothese, dass die Verteilung von Mittelwerten der Bewertungen von der Gruppenzugehörigkeit unabhängig ist, wurde mittels Mann-Whitney-U-Test untersucht (**Tabelle 1**). Auf einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ konnte keine ausreichende Evidenz festgestellt werden, um diese Hypothese abzulehnen. Der Test wurde anschließend für jede der fünf Bildkategorien wiederholt, mit demselben Ergebnis, dass die Nullhypothese nicht abgelehnt werden konnte (**Tabelle 1**). Folglich gibt es keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Bewertungen der Experten und der Laien.

Tabelle 1: Mittelwerte der Bewertungen, Experten und Laien im Vergleich

	<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Alle Bewertungen	442	-0,118	0,906	0,015
Original	430	-0,301	0,764	0,039
Aufgehellte	351,5	-1,472	0,141	0,190
Symmetrisch	374,5	-1,131	0,258	0,146
Symmetrisch und aufgehellte	431	-0,284	0,776	0,037
Verfärbt	414	-0,536	0,592	0,069

4.1.2 Vergleich zwischen den Geschlechtern

Insgesamt nahmen an der Studie $n = 36$ Frauen und $n = 24$ Männer teil. Dies entspricht einem Anteil von 60% und 40%. Sowohl in der Gruppe der Experten als auch in der Gruppe der Laien waren 60% der Probanden weiblich und 40% männlich. Die Geschlechterverteilung ergab sich zufällig nach der Rekrutierung der Probanden.

Beim Vergleich der Mittelwerte aller Bewertungen der männlichen und der weiblichen Probanden stellte sich heraus, dass die Frauen mit einem durchschnittlichen Wert von $M = 2,67$ ($SD = 0,41$) weniger streng bewerteten als die Männer mit einem Durchschnitt von $M = 2,75$ ($SD = 0,39$). Die Reihenfolge der Bildkategorien in Bezug auf die Höhe der Bewertungen unterschied sich bei den Frauen und den Männern nicht. Es konnten jedoch Abweichungen in den durchschnittlichen Bewertungen der beiden Gruppen festgestellt werden. Für die Bilder mit den höchsten Bewertungen von symmetrischen und aufgehellten Frontzähnen vergaben die Frauen etwas bessere Noten ($M = 1,76$; $SD = 0,72$) als die Männer ($M = 2,05$; $SD = 0,84$). Diese Tendenz zeichnete sich weiterhin bei den Bildkategorien „aufgehellte“, „symmetrisch“ und „original“ ab. Lediglich für die weniger ästhetischen verfärbten Zähne vergaben die Frauen durchschnittlich schlechtere Noten ($M = 3,99$; $SD = 0,88$) als Männer ($M = 3,76$; $SD = 0,90$).

Die Fragestellung, ob sich die Verteilung der Mittelwerte aller Bewertungen zwischen den beiden Geschlechtern signifikant unterscheidet, wurde mithilfe eines nichtparametrischen Tests (Mann-Whitney-U-Test) überprüft (**Tabelle 2**). Auf einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Geschlechtern. In Folge wurden die Mittelwerte der Bewertungen einzelner Bildkategorien (aufgehellte, symmetrisch, aufgehellte und symmetrisch, verfärbt) überprüft, mit demselben Ergebnis (**Tabelle 2**). Insgesamt lässt sich darauf schließen, dass kein statistisch signifikanter Zusammenhang zwischen dem Geschlecht des Probanden und der abgegebenen Bewertung existiert.

Tabelle 2: Mittelwerte der Bewertungen, Männer und Frauen im Vergleich

	<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Alle Bewertungen	351,5	-1,216	0,224	0,157
Original	374,5	-0,882	0,378	0,114
Aufgehellte	356,5	-1,152	0,249	0,149
Symmetrisch	428	-0,061	0,951	0,008
Symmetrisch und aufgehellte	322	-1,679	0,093	0,217
Verfärbt	361	-1,078	0,281	0,139

4.2 Zeit bis zur ersten Fixation (time to first fixation)

4.2.1 Vergleich aller AOIs

Die Mittelwerte der Zeiten bis zur ersten Fixation wurden bei allen zentralen Inzisivi, seitlichen Inzisivi, Eckzähnen und Prämolaren auf allen Bildern verglichen. Die Probanden fixierten zuallererst die zentralen Inzisivi (**Abbildung 9**). Dabei betrug die Zeit bis zur Fixation im Durchschnitt weniger als eine Sekunde ($M = 0,96$ s, $SD = 0,20$). Danach folgten die lateralen Inzisivi ($M = 2,12$ s; $SD = 0,36$), die Eckzähne ($M = 2,19$ s, $SD = 0,41$) und zuletzt die Prämolaren ($M = 2,81$ s, $SD = 0,62$).

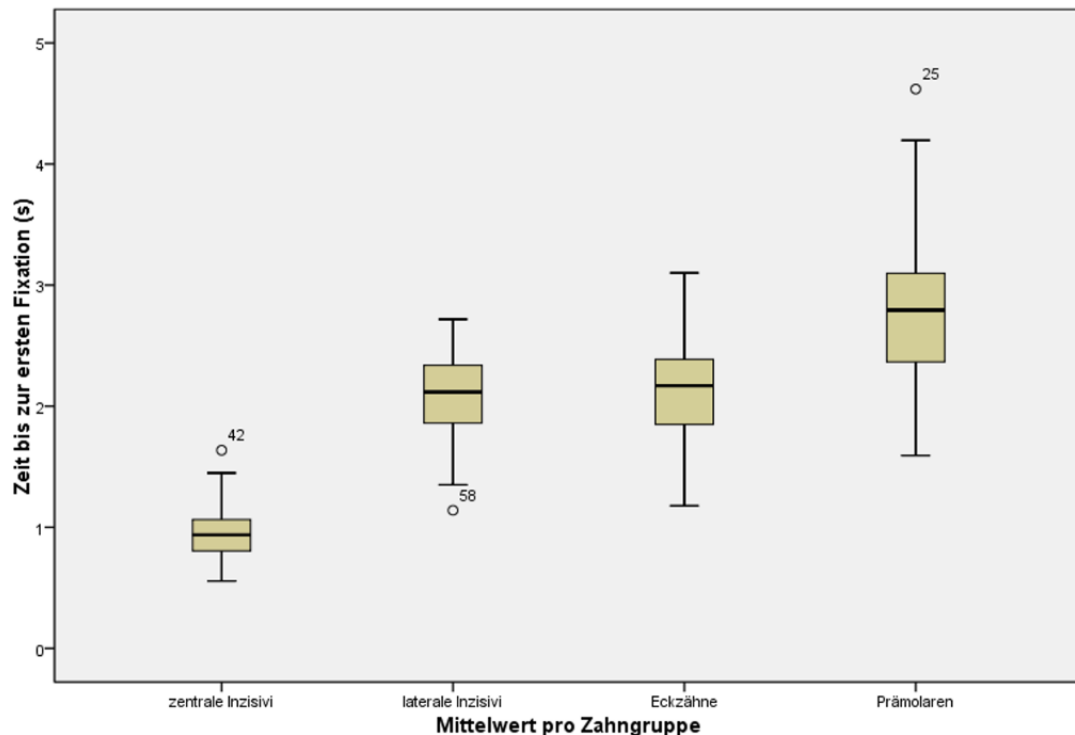


Abbildung 9: Erste Fixation aller Probanden

4.2.2 Zeit bis zur ersten Fixation der verfärbten Zähne

Ein besonderes Augenmerk lag bei der Auswertung der Zeiten der Bilder, in die ein unästhetisches Detail in Form einer Zahnverfärbung oder einer ästhetisch insuffizient aussehenden Restauration eingefügt wurde.

In Abbildung (Abb.) 1a (**Abbildung 1**), einem unbearbeiteten Original, war die zuerst betrachtete Region der Zahn 11, welcher mit einer Durchschnittszeit von $M = 0,46$ s ($SD = 0,31$) fixiert wurde. In Abb. 1q wurde das Originalbild 1 mit einer Verfärbung am Zahn 11 bearbeitet. Dieser Zahn stellte wie beim Originalbild die zuerst fixierte Region dar, jedoch wurde er von den Probanden mit einer Durchschnittszeit von $M = 0,29$ s ($SD = 0,15$) schneller fixiert.

Eine ähnliche Beobachtung wurde beim Vergleich zwischen Abb. 1b (Original) und Abb. 1r, bei der der Zahn 13 unästhetisch verfärbt wurde, gemacht. Beim Originalbild fixierten die Probanden nach $M = 0,64$ s ($SD = 0,88$) zuerst den Zahn 11. Der Zahn 13 wurde nach $M = 1,91$ s ($SD = 1,18$) fixiert. Vergleichend dazu war die zuerst betrachtete Region in Abb. 1r ebenfalls der Zahn 11 ($M = 0,60$ s,

$SD = 0,82$). Der verfärbte Zahn 13 wurde jedoch mit einer Durchschnittszeit von $M = 1,66$ s ($SD = 1,12$) früher fixiert.

In Abb. 1c (Original) wurde als Erstes der Zahn 11 betrachtet ($M = 0,62$ s, $SD = 0,80$), gefolgt vom Zahn 21 ($M = 0,95$ s, $SD = 0,95$). Beim Betrachten von Abb. 1s wurden die Probanden zuerst auf den verfärbten Zahn 21 aufmerksam ($M = 0,41$ s, $SD = 0,17$), was im Vergleich zu Abb. 1c ebenfalls eine frühere Fixationszeit darstellt.

In Abb. 1t wurde am Zahn 13 eine auffällige verfärbte indirekte Restauration simuliert. Im korrespondierenden Originalbild (Abb. 1d) fixierten die Probanden nach $M = 0,75$ s ($SD = 0,94$) den Zahn 11 und der Zahn 13 wurde nach einer Durchschnittszeit von $M = 2,27$ s ($SD = 1,07$) betrachtet. Bei Abb. 1t stellte der überkronte Zahn 13 die als Erstes betrachtete Region dar, die Probanden fixierten ihn durchschnittlich nach $M = 0,68$ s ($SD = 0,37$).

Zusammenfassend wurden die verfärbten Zähne im Vergleich zu den korrespondierenden Zähnen im Originalbild von den Probanden früher betrachtet, unabhängig von ihrer Position im Bild (**Abbildung 10**).

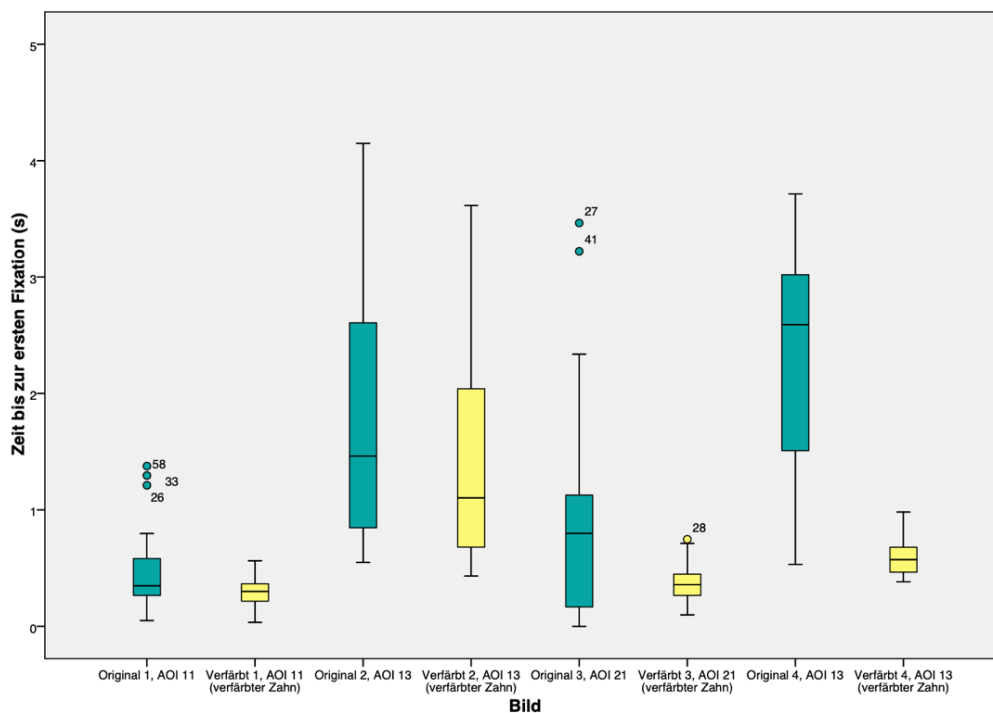


Abbildung 10: Zeit bis zur ersten Fixation, Originalzähne und verfärbte Zähne im Vergleich

4.2.3 Vergleich zwischen den Probandengruppen

Die Zeiten bis zur ersten Fixierung der einzelnen Zahngruppen aller Bilder wurden bei beiden Probandengruppen verglichen. Hinsichtlich der Mittelwerte der Zeiten in aufsteigender Reihenfolge ergaben sich keine Unterschiede zwischen den Experten und den Laien. Beide Gruppen fixierten zuerst die zentralen Schneidezähne, danach die seitlichen Schneidezähne, die Eckzähne und die Prämolaren (**Abbildung 11**).

Die Laien fixierten die zentralen Inzisivi mit einer Durchschnittszeit von $M = 0,98$ s ($SD = 0,23$) später als die Experten, die $M = 0,94$ s ($SD = 0,17$) bis zur ersten Fixierung brauchten. Die lateralen Inzisivi wurden jedoch von den Laien ($M = 2,01$ s, $SD = 0,39$) früher als von den Experten ($M = 2,24$ s, $SD = 0,28$) betrachtet. Eine ähnliche Tendenz zeichnete sich bei den Eckzähnen und den Prämolaren ab. Die Laien fixierten die Eckzähne durchschnittlich nach $M = 2,1$ s ($SD = 0,41$), während die Experten sie nach $M = 2,28$ s ($SD = 0,39$) betrachteten. Die

Prämolaren wurden von den Laien nach $M = 2,78$ s ($SD = 0,64$) und von den Experten nach $M = 2,84$ s ($SD = 0,60$) fixiert.

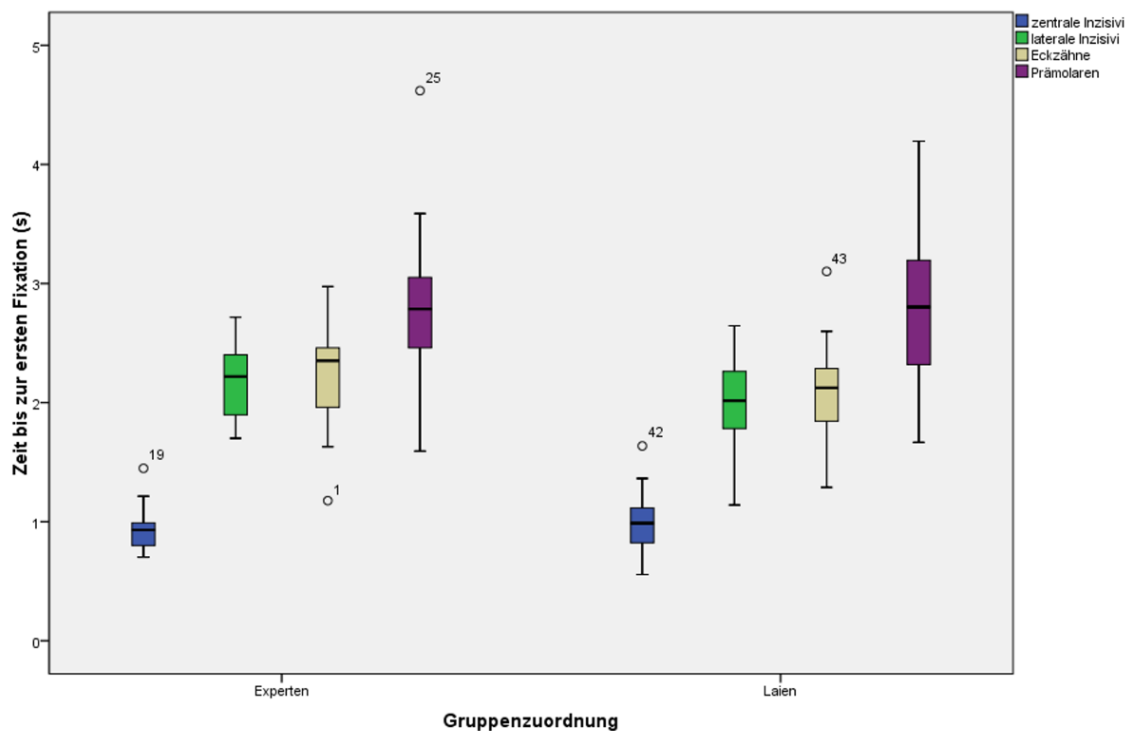


Abbildung 11: Erste Fixationen der Experten und Laien im Vergleich

Zur Überprüfung, ob ein statistisch signifikanter Unterschied bei der ersten Augenfixierung zwischen den Experten und den Laien existiert, wurde die Verteilung der Durchschnittszeiten bis zur ersten Fixierung der vier Zahngruppen mittels Mann-Whitney-U-Test untersucht (**Tabelle 3**). Das Signifikanzniveau betrug $p = 0,05$. Die Nullhypothese, dass die Verteilung über die Kategorien der Gruppenzuordnung identisch ist, konnte für die zentralen Schneidezähne und die Prämolaren beibehalten werden. Für die seitlichen Schneidezähne und die Eckzähne wurde die Nullhypothese abgelehnt. Folglich ist die bereits beschriebene frühere Fixierung der Zahngruppen der seitlichen Schneidezähne und der Eckzähne durch Laien nicht auf zufällige Variationen zurückzuführen, sondern auf eine statistisch signifikante Diskrepanz zwischen den beiden Probandengruppen.

Der Mittelwert der Zeiten bis zur ersten Augenfixierung auf die verfärbten Zähne wurde ebenfalls auf Unterschiede zwischen den Experten und den Laien mittels

Mann-Whitney-U-Test auf einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ untersucht (**Tabelle 3**). Die Nullhypothese über eine identische Verteilung der Werte über die beiden Probandengruppen konnte beibehalten werden. Es konnten folglich keine statistisch signifikanten Unterschiede festgestellt werden.

Tabelle 3: Zeit bis zur ersten Fixation, Experten und Laien im Vergleich

	<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Zentrale Inzisivi	396	-0,798	0,425	0,103
Laterale Inzisivi	280	-2,513	0,012*	0,324
Eckzähne	291	-2,351	0,019*	0,304
Prämolaren	314	-0,404	0,686	0,052
Verfärbte Zähne	410	-0,379	0,705	0,049

* $p < 0,05$

4.3 Gesamtblickdauer (total gaze duration)

Insgesamt wurden die Bilder den Probanden für jeweils 5 s eingeblendet. Die Gesamtzeit, während der eine bestimmte Region fixiert wurde, wurde als Variable „total gaze duration“ (Gesamtblickdauer) erfasst.

Insgesamt wurde bei 16 von 20 Bildern die längste Gesamtblickdauer bei einem der beiden zentralen Inzisivi verzeichnet. Folglich wurde bei einer Mehrheit der präsentierten Bilder ein zentraler Schneidezahn von den Probanden am längsten fixiert.

Der Vergleich der jeweiligen Mittelwerte für die Gesamtblickdauer der vier Zahngruppen lieferte das Ergebnis, dass die Probanden die zentralen Inzisivi 11 und 21 mit einer durchschnittlichen Dauer von $M = 0,82$ s ($SD = 0,20$) am längsten betrachteten (**Abbildung 12**). Die zweitlängste Gesamtblickdauer erzielten die Eckzähne mit $M = 0,5$ s ($SD = 0,10$). Die lateralen Inzisivi wurden im Durchschnitt $M = 0,38$ s ($SD = 0,08$) und die Prämolaren $M = 0,3$ s ($SD = 0,13$) lang betrachtet.

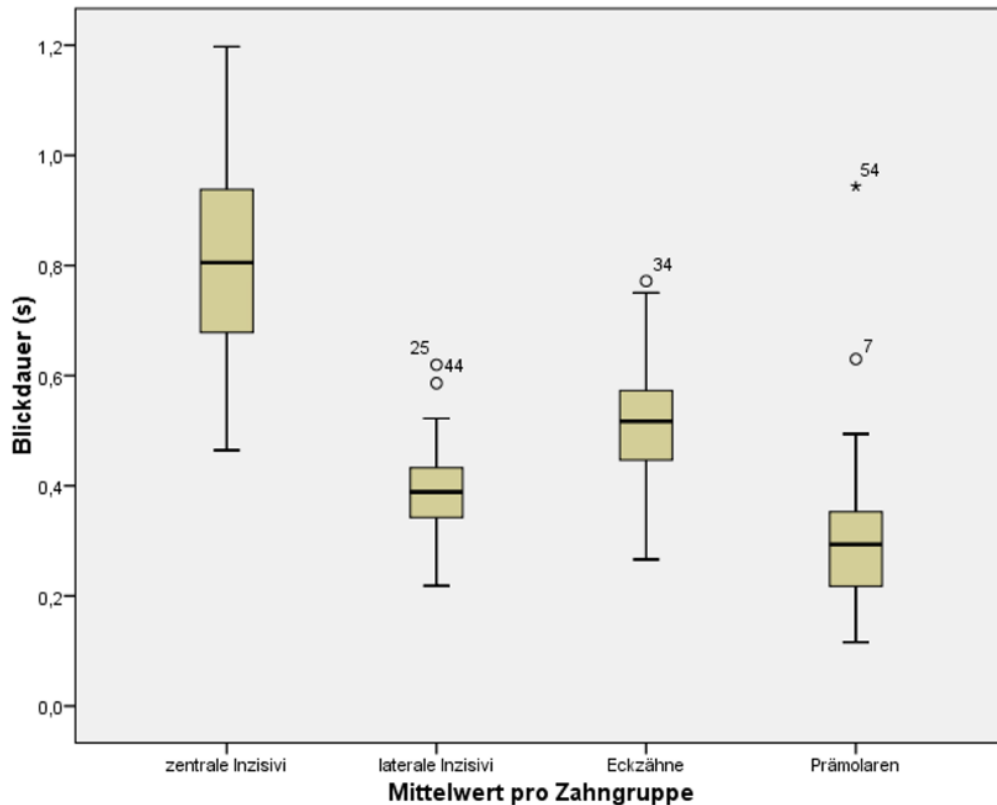


Abbildung 12: Gesamtblickdauer aller Probanden im Überblick

4.3.1 Zusammenhang zwischen Zahnverfärbung und Blickdauer

Beim Vergleich aller AOIs bezüglich der durchschnittlichen Gesamtblickdauer wurden die längsten Zeiten bei den verfärbten Zähnen festgestellt. Der verfärbte Zahn 11 in Abb. 1q (**Abbildung 1**) wurde mit $M = 1,93$ s ($SD = 0,67$) von allen Regionen auf allen Bildern am längsten betrachtet. Ihm folgten der verfärbte Zahn 21 in Abb. 1s ($M = 1,63$ s, $SD = 0,67$) und der unästhetisch überkronte Zahn 13 in Abb. 1t. ($M = 1,63$ s, $SD = 0,60$).

Die Gesamtblickdauer auf die verfärbten Zähne in Abb. 1q - 1t wurde mit der Gesamtblickdauer auf die korrespondierenden Zähne in den Originalbildern (Abb. 1a – 1d) verglichen (**Abbildung 13**).

In Abb. 1q (**Abbildung 1**) wurde die Zahnverfärbung in Regio 11 im Durchschnitt $M = 1,93$ s ($SD = 0,67$) lang betrachtet, während der Zahn 11 im Originalbild (Abb.

1a) $M = 1,29$ s ($SD = 0,63$) lang fixiert wurde. Außerdem war der verfärbte Zahn die von den Probanden am längsten fixierte Region in Abb. 1q.

Der Mittelwert der Gesamtblickdauer auf den unbearbeiteten Zahn 13 in Abb. 1b betrug $M = 0,45$ s ($SD = 0,27$). Am längsten wurde bei diesem Bild der Zahn 11 mit $M = 0,83$ s ($SD = 0,52$) betrachtet. Der Wert für den verfärbten Zahn 13 in Abb. 1r lag bei $M = 1,09$ s ($SD = 0,67$), was für das Bild die längste Gesamtblickdauer bedeutete.

Eine ähnliche Tendenz zeichnete sich beim Originalbild (Abb. 1c) und dem korrespondierenden Bild (Abb. 1s) ab. In Abb. 1c wurde der Zahn 11 am längsten fixiert ($M = 0,87$ s, $SD = 0,47$). Der verfärbte Zahn 21 wurde in Abb. 1s durchschnittlich länger betrachtet ($M = 1,63$ s, $SD = 0,67$) als der unbearbeitete Zahn 21 im Originalbild ($M = 0,86$ s, $SD = 0,47$), wobei von allen AOIs der verfärbte Zahn die längste Gesamtblickdauer aufwies.

Ein deutlicher Unterschied bestand bei den Mittelwerten der Gesamtblickdauer auf die AOI 13 in Abb. 1t, wo die verfärbte Restauration zu sehen war, und auf den korrespondierenden Zahn 13 im Originalbild (Abb. 1d). Während im Originalbild der Eckzahn durchschnittlich $M = 0,39$ s ($SD = 0,23$) lang fixiert wurde, betrug die Gesamtblickdauer auf die verfärbte Krone $M = 1,63$ s ($SD = 0,60$). Am längsten wurde in Abb. 1d der Zahn 11 betrachtet ($M = 0,82$ s, $SD = 0,50$), während der verfärbte Zahn in Abb. 1t die am längsten fixierte Region war.

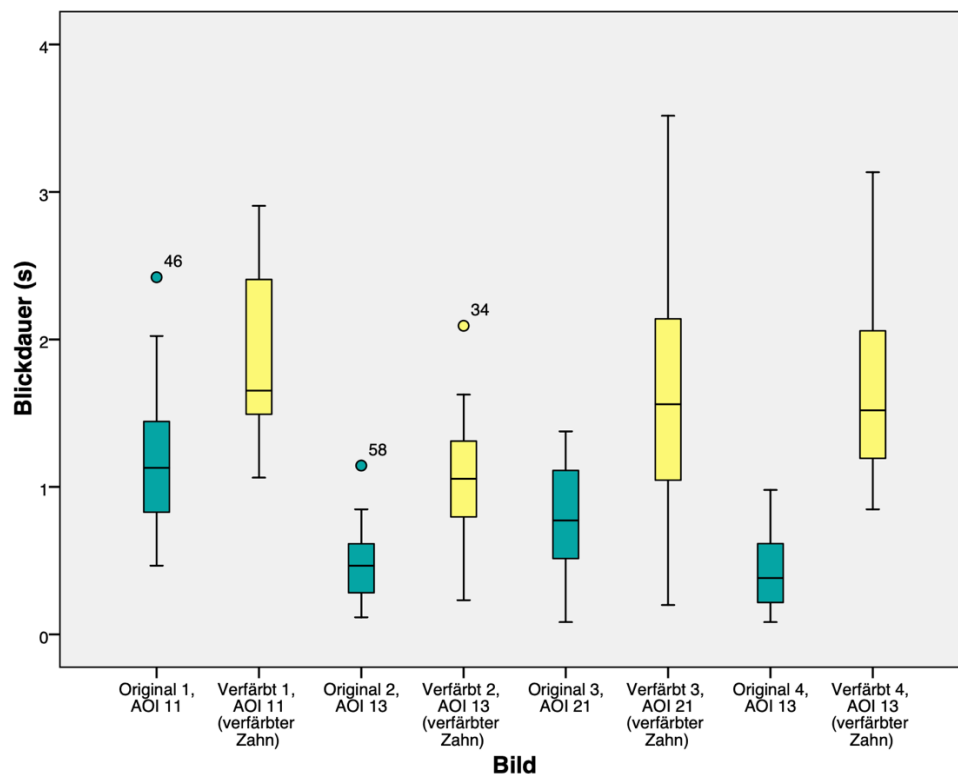


Abbildung 13: Gesamtblickdauer, Originalzähne und verfärbte Zähne im Vergleich

Die beobachteten Daten zeigen, dass die verfärbten Zähne im Vergleich zu den nicht verfärbten für eine längere Zeit die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich lenken. Der Zusammenhang zwischen der Verfärbung eines Zahns und der längsten Gesamtblickdauer wurde auf Signifikanz untersucht. Dafür wurde ein Chi-Quadrat-Test durchgeführt, mit den binären Kategorien „höchste Blickdauer“ und „Verfärbung“ und einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$. Die Analyse ergab einen sehr niedrigen p-Wert ($p < 0,001$) (**Tabelle 4**). Dies bedeutet, dass ein verfärbter Zahn signifikant häufiger mit der höchsten Gesamtblickdauer verbunden ist als ein nicht verfärbter Zahn. Allerdings ist aufgrund der festen Verteilung von verfärbten und nicht verfärbten Zähnen pro Bild die Annahme unabhängiger Beobachtungen eingeschränkt, sodass der Chi-Quadrat-Test lediglich explorativen Charakter hat.

Tabelle 4: Zusammenhang zwischen Verfärbung und Gesamtblickdauer

	χ^2	Freiheitsgrade <i>df</i>	Asymptotische Signifikanz <i>p</i>	Effektstärke φ
Pearson- Chi- Quadrat	1235	1	< 0,001	0,76

4.3.2 Vergleich zwischen den Probandengruppen

Die Gesamtblickdauer der Experten- und Laiengruppe wurde auf mögliche Unterschiede untersucht. Die Analyse der Mittelwerte der Gesamtblickdauer auf die einzelnen Zahngruppen auf allen Bildern ergab insgesamt keine Unterschiede in Bezug auf die Reihenfolge der am längsten fixierten Zahngruppen (**Abbildung 14**).

Die längste Gesamtblickdauer verzeichneten die zentralen Inzisivi, wobei die Experten durchschnittlich etwas längere Zeiten ($M = 0,82$ s, $SD = 0,19$) aufwiesen als die Laien ($M = 0,81$ s, $SD = 0,21$). Danach folgten die Eckzähne mit einem Durchschnittswert von $M = 0,47$ s ($SD = 0,11$) bei Experten und $M = 0,52$ s ($SD = 0,84$) bei Laien. Die seitlichen Inzisivi wurden von den Laien länger betrachtet ($M = 0,39$ s, $SD = 0,08$) als von den Experten ($M = 0,38$ s, $SD = 0,09$). Am kürzesten wurden die Prämolaren betrachtet, wobei bei den Laien eine kürzere Gesamtblickdauer ($M = 0,29$ s, $SD = 0,15$) als bei den Experten ($M = 0,32$ s, $SD = 0,12$) verzeichnet wurde.

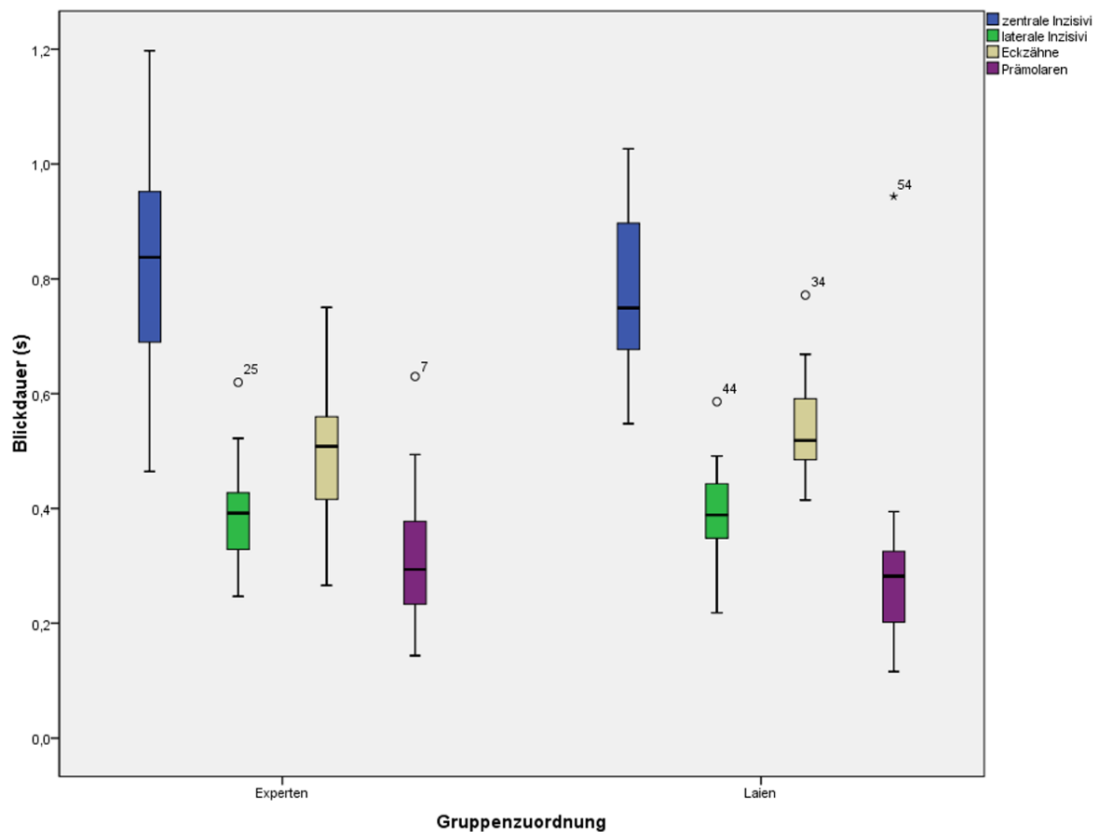


Abbildung 14: Gesamtblickdauer der Experten und Laien im Vergleich

Die Verteilung der beschriebenen Mittelwerte über die beiden Probandengruppen wurde mittels Mann-Whitney-U-Test mit einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ untersucht (**Tabelle 5**). Die Nullhypothese konnte dabei nicht abgelehnt werden. Für alle vier Zahngruppen resultierten folglich keine signifikanten Unterschiede in der Gesamtblickdauer der Laien und der Experten.

Die verfärbten Zähne auf Abb. 1q bis 1t (**Abbildung 1**) stellten bei der Analyse ein besonderes Augenmerk dar. Im Durchschnitt fixierten die Experten einen verfärbten Zahn $M = 1,42$ s ($SD = 0,42$) lang. Die Gesamtblickdauer der Laien hingegen war länger als die der Experten und lag bei $M = 1,77$ s ($SD = 0,45$).

In Folge wurde die Gesamtblickdauer auf die einzelnen verfärbten Zähne verglichen (**Abbildung 15**). Die Experten verweilten länger auf dem verfärbten Zahn 11 in Abb. 1q ($M = 1,96$ s, $SD = 0,72$) im Vergleich zu den Laien ($M = 1,89$ s, $SD = 0,63$). Die Laien hingegen betrachteten den Zahn 13 in Abb. 1r mit $M = 1,34$ s ($SD = 0,74$) länger als die Experten ($M = 0,83$ s, $SD = 0,47$). Eine ähnliche

Tendenz zeichnete sich in Abb. 1s und 1t ab. Die durchschnittliche Gesamtblickdauer auf den Zahn 21 in Abb. 1s betrug bei den Laien $M = 1,86$ s ($SD = 0,60$) und bei den Experten $M = 1,41$ s ($SD = 0,57$). In Abb. 1t fixierten die Laien den überkronten Zahn 13 mit $M = 1,91$ s ($SD = 0,59$) ebenfalls länger als die Experten mit $M = 1,36$ s ($SD = 0,48$).

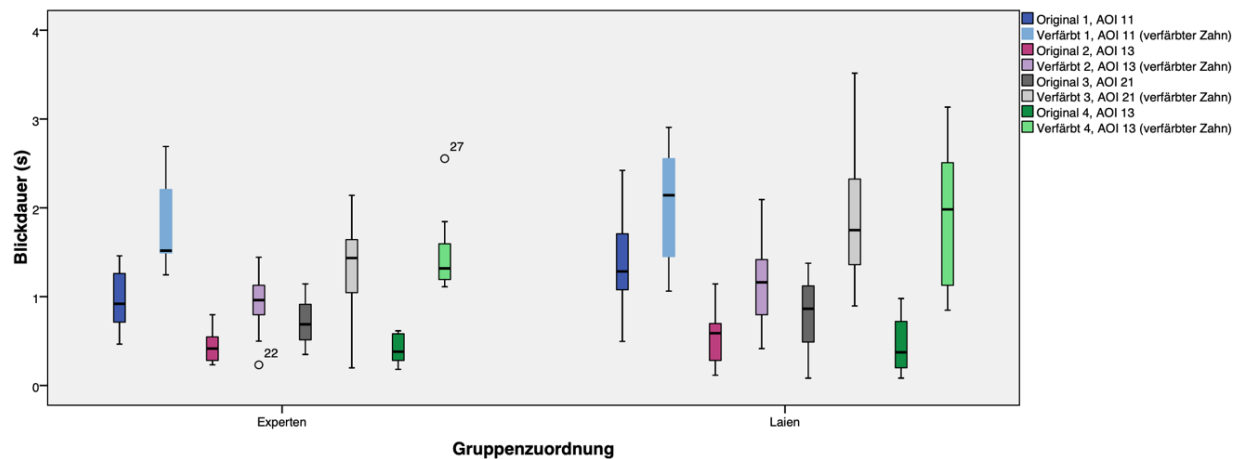


Abbildung 15: Gesamtblickdauer der Experten und Laien, Originalzähne und verfärbte Zähne im Vergleich

Um die Hypothese zu testen, ob die beschriebenen Unterschiede signifikant sind, wurde die Verteilung der Mittelwerte der Gesamtblickdauer auf die vier verfärbten Zähne mittels Mann-Whitney-U-Test auf einem Signifikanzniveau von $p = 0,05$ untersucht (**Tabelle 5**). Als Ergebnis konnte die Nullhypothese abgelehnt werden ($p = 0,0004$). Weiterführend wurden die Verteilungen der Gesamtblickdauer bei jedem der vier verfärbten Zähne der Abb. 1q bis 1t (**Abbildung 1**) ebenfalls mit Mann-Whitney-U-Test analysiert. Mit Ausnahme von Abb. 1q wurde die Hypothese bei Abb. 1r ($p = 0,0006$), Abb. 1s ($p = 0,0018$) und Abb. 1t ($p = 0,0001$) abgelehnt.

Die Unterschiede in der Gesamtblickdauer zwischen den Laien und Experten mit überwiegend längeren Fixationszeiten in der Gruppe der Laien sind folglich nicht auf zufällige Diskrepanzen zurückzuführen, sondern sind statistisch signifikant.

Tabelle 5: Gesamtblickdauer, Experten und Laien im Vergleich

	<i>U</i>	<i>Z</i>	<i>p</i>	<i>r</i>
Zentrale Inzisivi	402	-0,710	0,478	0,092
Laterale Inzisivi	418	-0,473	0,636	0,061
Eckzähne	322	-1,892	0,058	0,244
Prämolaren	275,5	-1,111	0,267	0,143
Verfärbte Zähne	245,5	-2,873	0,004*	0,371

* $p < 0,05$

5. Ergebnisdiskussion

5.1 Zahnfarbe

5.1.1 Einfluss des Bleachings

Die Bilder, bei denen die Zähne lediglich aufgehellt wurden, erzielten bessere Bewertungen als die natürlichen Zähne auf den Originalaufnahmen. Auch die rein symmetrisch bearbeiteten Zahnbögen waren den aufgehellten Zähnen unterlegen. Am besten bewerteten sowohl die Experten als auch die Laien die aufgehellten und symmetrischen Zähne. Dies zeigt, dass unabhängig von der Erfahrung auf dem Gebiet der Zahnmedizin und der Kenntnis über die Ästhetik, die helleren Zähne als ästhetischer angesehen werden.

Diese Erkenntnis gleicht der aus der Studie von Almufler et al., in der die meisten Probanden die hellste Zahnfarbe bevorzugten (49). Vor allem die Teilnehmer, die jünger als 25 Jahre alt waren und die Zufriedenheit mit ihrem eigenen Lächeln angaben, tendierten zu einer helleren Zahnfarbe, verglichen mit der Gruppe der älteren Probanden über 45 Jahre.

Dies könnte eine mögliche Erklärung für die Beobachtungen der vorliegenden Studie darstellen, da 75% und somit die Mehrheit der Probanden im Alter von 25 oder jünger war. Dabei waren in der Gruppe der Laien 93% der Teilnehmer 25 Jahre alt oder jünger, und in der Gruppe der Experten 57%.

Vergleicht man die Altersverteilung in der vorliegenden Studie mit anderen Studien, die sich mit den Unterschieden in der ästhetischen Wahrnehmung zwischen verschiedenen Altersgruppen beschäftigten, so erkennt man, dass die Altersverteilung zu unausgewogen war, um signifikante Unterschiede festzustellen.

So wurden beispielsweise in der Studie von Sriphadungporn et al. Unterschiede zwischen den Probandengruppen im Alter von 15-29 Jahren und 36-52 Jahren aufgezeigt (29). Pithon et al. teilten die Probanden ihrer Studie in drei Gruppen ein: 15-19 Jahre, 35-44 Jahre und 65-74 Jahre. Dabei wurde festgestellt, dass das Vorhandensein schwarzer Interdentaldreiecke vor allem von den beiden

jüngeren Altersgruppen wahrgenommen und negativ bewertet wurde, während die Bewertungen der ältesten Probandengruppe davon nicht beeinflusst wurden (30). Auch Bolas-Colvee et al. stellten fest, dass Probanden über 40 Jahre in ihren ästhetischen Bewertungen weniger kritisch waren, während die Gruppen der 15-25-Jährigen und der 26-39-Jährigen das Vorliegen von Diastema mediale oder schwarzen Interdentaldreiecken negativer bewerteten (21).

Diese Studien verdeutlichen, dass altersbedingte Unterschiede in der ästhetischen Wahrnehmung eher bei älteren Probandengruppen auftreten. Da in der vorliegenden Studie jedoch keine Probanden über 40 Jahre teilgenommen haben, könnten altersabhängige Unterschiede zu gering ausgeprägt gewesen sein. Eine weiterführende Analyse des Einflusses des Alters auf die ästhetische Wahrnehmung der Zahnfarbe war daher nicht möglich.

Auch andere Studien bestätigen, dass die Zahnfarbe ein wichtiger Faktor bei der Bewertung der dentalen Ästhetik ist (37) und dass Personen mit aufgehellten Zähnen bessere Bewertungen erlangen als die mit einer natürlichen Zahnfarbe (3). Eine weiße Zahnfarbe wird als signifikant schöner empfunden (102).

Im Gegensatz zur vorliegenden Studie, bei der sowohl Laien als auch Experten von der helleren Zahnfarbe am meisten überzeugt waren, stehen die Ergebnisse der Studie von Krajangta et al., in der ebenfalls der Einfluss der Zahnfarbe auf die Attraktivität des Lächelns untersucht und dabei die Gruppen der Zahnärzte, Zahnmedizinstudenten, Laien und Studenten anderer Fakultäten verglichen wurden (103). Die hellste Zahnfarbe wurde lediglich von den Laien und den Studenten anderer Fakultäten als am attraktivsten empfunden, während die Variationen in der Zahnfarbe keinen Einfluss auf die Bewertungen der Zahnärzte und Zahnmedizinstudenten hatten.

Auch Magne et al. hielten fest, dass die Laien häufiger Gefallen an der hellsten Zahnfarbe finden als die zahnmedizinisch tätigen Personen, und erklärten es mit dem Einfluss der Werbung der Modeindustrie, in der häufig künstlich aufgehellte Zähne vorkommen (104).

5.1.2 Einfluss der Verfärbung

Es existieren zahlreiche Studien, bei denen die Komponenten des Lächelns geringfügig variiert werden und die Probanden in Folge gebeten werden, die so entstehenden Fotografien hinsichtlich der Ästhetik zu bewerten.

So wurde beispielsweise in der Studie von Machado et al. die Abrasion eines der Inzisivi simuliert, indem die Schneidekante in 0,5-mm-Schritten verkürzt und dadurch eine Asymmetrie erzeugt wurde (43). Je stärker die Abrasion dargestellt war, desto negativer wurden die Bilder bewertet. Besonders die Abrasion der mittleren Inzisivi empfanden die Probanden als unästhetischer im Vergleich zu den seitlichen Inzisivi.

Auch Kokich et al. befassten sich in ihrer Studie mit Symmetrie und kamen zu dem Ergebnis, dass Asymmetrien in der Kronenlänge oder -breite der Inzisivi zu schlechteren Bewertungen führen (10). Die Breite des Bukkalkorridors wurde in der Studie von Moore et al. variiert, mit dem Ergebnis, dass ein breiter Bukkalkorridor als unästhetisch wahrgenommen wird (45).

Die Auswertung subjektiver Bewertungen der Probanden ermöglicht Rückschlüsse darauf, wie stark ästhetische Abweichungen die empfundene Attraktivität beeinflussen. Gleichzeitig erlauben solche Studien den Vergleich zwischen den Gruppen unterschiedlichen Geschlechts, Alters oder beruflichen Hintergrunds (15, 17, 18, 22).

Es kann jedoch bei solchem Studiendesign nicht untersucht werden, ob und inwiefern die Probanden die ästhetischen Deviationen überhaupt wahrnehmen.

In der vorliegenden Studie wurde aus diesem Grund ein Eye-Tracking-Gerät verwendet, um die Blickpfade der Probanden während der Betrachtung visueller Stimuli aufzuzeichnen. So wurde die Analyse von Parametern wie Blickdauer oder Zeit bis zur ersten Fixierung ermöglicht, also wie schnell beispielsweise die Veränderung der Farbe einzelner Zähne den Probanden auffiel oder wie lange sie einen verfärbten Zahn insgesamt betrachteten. Dies ergänzte die subjektive Bewertung der Ästhetik.

Bei den Bildern mit einer vollständig aufgehellten Zahnreihe hatten die Werte für die Blickdauer auf die einzelnen Zähne oder die Zeit bis zur ersten Fixierung wenig Aussagekraft bezüglich des Einflusses des Bleachings auf die Ästhetik, da alle Zähne die gleiche helle Zahnfarbe hatten und es keine auffälligen Regionen im Bild gab. Im Gegensatz dazu stellten dieselben aufgezeichneten Parameter bei den Bildern mit nur einem unästhetisch verfärbten Zahn sinnvolle Ergänzungen zu den Bewertungen der Probanden dar.

Die niedrigsten Bewertungen, sowohl der Experten als auch der Laien, erzielten die Bilder mit einem eingefügten verfärbten Zahn. Dies steht im Einklang mit der vorhandenen Studienlage (105).

Laut Ntovas et al. scheint eine Veränderung in der Helligkeit nur eines Zahns die gesamte faciale Ästhetik zu verschlechtern (105). Dies galt in der von ihnen durchgeführten Studie sowohl für die Laien als auch für die Experten und sowohl für Veränderungen der Helligkeit in die hellere als auch in die dunklere Richtung.

Um die Veränderungen der Zahnfarbe standardisiert vorzunehmen, wurde von den Autoren der Studie der CIELAB-Farbraum verwendet und die Helligkeit L der einzelnen Zähne stufenweise in 1 Unit Abständen in die negative (-7) und in die positive Richtung (+7) verändert. Wie auch in der vorliegenden Studie haben Ntovas et al. unterschiedliche Zähne im Zahnbogen verändert, um Auswirkungen auf die Ästhetik zu untersuchen. Bereits Abweichungen in der Helligkeit von $\Delta L \geq 1$ eines der beiden mittleren Inzisivi hatten einen negativen Einfluss auf die Attraktivität. Daraus folgerten die Autoren, dass bei einer Restauration am mittleren Schneidezahn auf akkurat passende Zahnfarbe geachtet werden sollte, was die vorliegende Studie ebenfalls bestätigen kann. Für Eckzähne hatten dunklere Farbnuancen im Vergleich zu den helleren weniger Einfluss auf die Ästhetik. Schlechtere Bewertungen der helleren Farbe erklärten die Autoren der Studie damit, dass die Menschen an eine gelblichere Farbe der Eckzähne im Vergleich zu den restlichen Frontzähnen gewöhnt sind und deswegen eine hellere Farbe eher auffällig ist.

Um zu überprüfen, ob eine Verfärbung immer die Aufmerksamkeit des Betrachters auf sich lenkt, wurden in der vorliegenden Studie in vier Bildern unterschiedliche Zähne verfärbt. Bei zwei davon handelte es sich um die mittleren Schneidezähne, in zwei weiteren Bildern war jeweils ein Eckzahn verfärbt.

Sobald ein Zahn im Bild eine Verfärbung aufwies, wurde dieser unabhängig von seiner Position in der Zahnreihe schneller fixiert als der korrespondierende Zahn im unbearbeiteten Originalbild. Beim Bild mit einer nachgeahmten auffälligen Krone am Eckzahn mit einem sichtbaren dunklen metallischen Rand und einem bräunlich verfärbten Zahnhals wurde eine Änderung des Blickmusters festgestellt. Die Aufmerksamkeit des Probanden wurde in erster Linie auf den verfärbten Eckzahn gelenkt und nicht mehr zuerst auf die mittleren Schneidezähne.

Bei den Zähnen, die ähnlich einer externen Zahnverfärbung in Form von grünlichen oder gelblichen Belägen bearbeitet wurden, änderte sich das Blickmuster der Probanden beim Betrachten des Bildes nicht und sie fixierten die mittleren Inzisivi zuerst.

In der Studie von Ntovas et al. wurde festgestellt, dass je weiter weg von der Mittellinie der verfärbte Zahn lag, desto weniger auffällig die Verfärbung war (105). Die Autoren erklärten dies damit, dass die Distanz vom verfärbten Eckzahn zum Eckzahn der Gegenseite länger ist und der direkte Vergleich beider Zähne somit erschwert ist.

Dies könnte eine mögliche Erklärung für die Beobachtungen der vorliegenden Studie darstellen. Bei Abb. 1r (**Abbildung 1**) mit einem verfärbten Eckzahn schauten die Probanden diesen zwar früher und länger an im Vergleich zum unbearbeiteten Eckzahn auf dem Originalbild, jedoch wurden als Erstes die mittleren Inzisivi und nicht der Eckzahn betrachtet. Die Verfärbung war somit für die Probanden erkennbar, jedoch nicht auffällig genug, um den Blick als Erstes auf den Eckzahn zu richten, da die Entfernung der beiden Eckzähne für einen direkten Vergleich größer war.

Von allen AOIs wurden die längsten Zeiten bei den verfärbten Zähnen gemessen. Diese haben nicht nur am längsten die Aufmerksamkeit der Probanden auf sich gelenkt, sondern wurden auch im Vergleich zu den korrespondierenden Zähnen in den Originalbildern, unabhängig von ihrer Position im Zahnbogen länger fixiert. Dieser Effekt war bei der auffälligen eingefügten Krone am deutlichsten.

Es wurde außerdem ein Zusammenhang zwischen der Verfärbung eines Zahns und der längsten Blickdauer festgestellt. Ein verfärbter Zahn war signifikant häufiger die am längsten betrachtete Region im Bild als die nicht verfärbten Zähne.

Diese Ergebnisse befinden sich im Einklang mit der vorhandenen Studienlage. Yamamoto et al. untersuchten in ihrer Eye-Tracking-Studie, ob die Laien auf eine unästhetische Restauration aufmerksam wurden (99). Als visuelle Stimuli galten die Fotografien einer Zahnreihe, auf denen jeweils auf der rechten oder linken Seite eine ästhetisch insuffiziente Krone eingefügt wurde, die entweder eine metallische Farbe oder verfärbte Verblendung besaß. Lag eine solche auffällige Restauration vor, so fixierten die Probanden die unästhetische Seite als Erstes. Auch wurde die Seite mit der Restauration für eine signifikant längere Zeit als die Gegenseite betrachtet. Eine Visualisierung in Form von Heatmaps zeigte außerdem, dass die Probanden explizit die Restauration länger fixierten.

Die Ergebnisse gleichen also denen der vorliegenden Studie und bestätigen, dass ein auffälliges unästhetisches Detail im Zahnbogen die Aufmerksamkeit schneller und für eine längere Zeit auf sich zieht.

5.2 Symmetrie

Eine der Fragestellungen der Studie bestand darin, ob die Symmetrie der Zahnreihe ein Einflussfaktor auf die ästhetischen Bewertungen darstellt. Insgesamt wurden die rein symmetrisch bearbeiteten Bilder sowohl von Experten als auch von den Laien besser bewertet als die Originale, was sich im Einklang mit der vorhandenen Studienlage befindet (43, 104, 106, 107). Dabei ist erwähnenswert, dass bei der Bearbeitung keine goldene Proportion zwischen

den Frontzähnen hergestellt wurde, sondern es sich rein um eine Spiegelung handelte, sodass die rechte und die linke Seite der Zahnreihe identisch waren.

Es wurde bereits beleuchtet, dass die mittleren Schneidezähne in den meisten Fällen die primär betrachtete Region darstellen. Existieren dabei Abweichungen in Farbe, Form oder Stellung, so fällt dies dem Betrachter bereits zu Beginn auf und kann einen negativen Einfluss darstellen. Möglicherweise ist dies eine Erklärung dafür, weshalb die Probanden symmetrisch gespiegelte Bilder besser bewerten, da dort die mittleren Schneidezähne aneinander angeglichen erscheinen und somit ein harmonisches Bild ergeben, selbst wenn ihre Farbe oder Form nicht ideal ist.

Einige Studien untersuchten den Einfluss der Asymmetrien der Inzisalkanten auf die Ästhetik (43, 106). Betrine Ribeiro et al. simulierten unterschiedlich verkürzte Schneidekanten der mittleren und seitlichen Inzisivi und ließen Kieferorthopäden und Laien die entstandenen Bilder beurteilen (106). Die am besten bewerteten Bilder waren die Bilder ohne Asymmetrien oder mit geringfügiger Asymmetrie der seitlichen Schneidezähne. Sowohl die Zahnärzte als auch die Laien erkannten bereits geringe Asymmetrien von 0,5 mm der zentralen Inzisivi. Die Autoren unterstützen die Hypothese, dass Symmetrie nahe der Mittellinie essenziell für die Ästhetik ist, während leichte Asymmetrie in größerer Entfernung von der Mittellinie akzeptabel ist.

Auch andere Autoren betonen die Wichtigkeit der Symmetrie der zentralen Inzisivi für ein harmonisches ästhetisches Bild (10, 43, 104). Die symmetrischen bilateralen Abweichungen hingegen können laut Kokich et al. zwar für Zahnmediziner sichtbar sein, bleiben von den Laien jedoch häufiger unerkannt als asymmetrische Situationen (10).

Generell wurde in einigen Studien gezeigt, dass die Laien Asymmetrien in einem geringeren Maße erkannten und toleranter bezüglich bestimmter Abweichungen waren als die Experten, die bereits bei kleinen Veränderungen sensibel erschienen (2, 27, 107).

5.3 Blickmuster

Die Aufzeichnung der Blickdaten mittels Eye-Tracker lieferte Einblicke über die Blickmuster der Probanden beim Betrachten einer Zahnreihe. Da die Bilder in einzelne Regionen unterteilt wurden, bei denen jeder Zahn eine AOI darstellte, konnten bei der Auswertung der Zeiten bis zur ersten Fixierung die Zähne ermittelt werden, die als erstes die Aufmerksamkeit der Probanden erregten.

Beim Betrachten der Frontzahnbilder wurden zuerst die Zähne 11 und 21 fixiert. Das Blickmuster der Probanden zeigt, dass nach den mittleren Inzisivi an zweiter Stelle die seitlichen Inzisivi anvisiert werden, danach die Eckzähne und schließlich die Prämolaren.

Aus den Daten für die gesamte Blickdauer konnte ermittelt werden, welche Zähne am längsten von den Probanden betrachtet wurden. Dabei wurde „total gaze duration“ aus der Summe der Zeiten der einzelnen Fixationen auf eine Region während der gesamten Betrachtungszeit von 5 Sekunden berechnet. Vergleicht man alle Zahngruppen untereinander, so wurden von allen Probanden die mittleren Schneidezähne am längsten betrachtet. Ihnen folgen die Eckzähne, die seitlichen Schneidezähne und schließlich die Prämolaren.

Bereits 1973 beschrieb Lombardi in seinem Artikel über die Prinzipien der visuellen Wahrnehmung und deren klinische Anwendung das Konzept der Dominanz, laut dem ein Zahn dominieren sollte, um eine harmonische Frontzahnkomposition zu erreichen (61). Die mittleren Inzisivi sind aufgrund ihrer Größe und Lage dafür prädestiniert.

Magne et al. führten in ihrer Studie Befragungen durch, bei denen die Probanden aus mehreren Modifikationen eines Lächelns, das am meisten ästhetische Bild aussuchen mussten (104). Dabei stellte sich heraus, dass die Probanden am meisten durch Alterationen der mittleren Inzisivi und an zweiter Stelle der Eckzähne beeinflusst wurden. Daraus schlossen die Autoren, dass der Fokus des Betrachters zuerst auf die zentralen Inzisivi und als Nächstes auf die Eckzähne fällt, während die lateralen Inzisivi scheinbar eine geringere Rolle spielen.

Auch Autoren einer anderen Eye-Tracking-Studie beschrieben, dass die Probanden die mittleren Inzisivi auf Bildern, auf denen ein offener Mund oder ein Lächeln dargestellt wurde, am häufigsten betrachteten (99).

5.4 Probandengruppen

5.4.1 Ausbildungsstand

Eine der zentralen Fragestellungen der Studie bestand darin, ob sich Personen mit und ohne zahnmedizinische Kenntnisse in ihrer ästhetischen Wahrnehmung unterscheiden. Dafür wurden die Probanden aus der Gruppe der Experten und der Laien hinsichtlich ihrer Bewertungen der unterschiedlichen Frontzahnsituationen verglichen. Bei dieser Analyse wurden keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Bewertungen von Experten und Laien festgestellt.

Dieses Ergebnis steht im Einklang mit dem der Studie von Bjelopavlovic et al. (102). Beim Vergleich der Bewertungen der Zahnärzte, Zahnmedizinstudenten, Laien und geschulten Laien ergab sich ebenfalls kein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen.

Roden-Johnson et al. verglichen die ästhetische Wahrnehmung der Kieferorthopäden, allgemein praktizierenden Zahnärzte und Laien und zeigten, dass, abgesehen von den Kieferorthopäden, sich die beiden letzten Gruppen in ihren Bewertungen nicht voneinander unterschieden (108). Die Autoren erklärten dies mit der verstärkten Sensibilisierung der Kieferorthopäden auf die dentale Ästhetik. Dies würde mit den Ergebnissen der vorliegenden Studie übereinstimmen, da hier die Gruppe der Experten die gleiche allgemeine zahnmedizinische Ausbildung erfuhr und nicht speziell auf Ästhetik, wie die Fachärzte der Kieferorthopädie, trainiert wurde.

Zu gegensätzlichen Ergebnissen kam die Studie von Pasukdee et al., die einen Einfluss von zahnmedizinischer Ausbildung auf die Präferenzen bezüglich dentaler Ästhetik feststellte (18). Ähnlich wie in der vorliegenden Studie untersuchten Aljefri et al. Zahnmedizinstudenten des vorklinischen und klinischen Abschnittes und fanden heraus, dass Unterschiede in der ästhetischen Wahrnehmung zwischen den beiden Gruppen existieren (47).

Machado et al. zeigten in ihrer Studie, dass obwohl Experten und Laien gleichermaßen ein ideales Lächeln als am meisten ästhetisch empfinden, es jedoch Unterschiede in den Bewertungen gibt, sobald leichte Abweichungen vom Ideal vorhanden sind (43). Auch Geevarghese et al. beschrieben, dass Laien größere Abweichungen akzeptierten im Vergleich zu Experten, die in dieser Hinsicht sensibler waren (42).

Bei der Auswertung der Blickpfade wurde festgestellt, dass sowohl die Experten als auch die Laien gleichermaßen die mittleren Schneidezähne beim Betrachten der Frontzähne zuerst fixieren. Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden Probandengruppen wurde jedoch bei weiteren Betrachtungsregionen festgestellt. Die Laien fixierten die seitlichen Schneidezähne und die Eckzähne signifikant früher als die Experten. Gleichzeitig ergab der Vergleich der Blickdauer der Experten und der Laien auf die einzelnen Zähne keinen signifikanten Unterschied in der gesamten Betrachtungsdauer dieser Regionen. Folglich haben die Experten die mittleren Schneidezähne nicht länger betrachtet als die Laien, jedoch haben sie die Eckzähne und die seitlichen Schneidezähne später fixiert. Möglicherweise fixierten die Experten häufiger die Areale im Bild, die nicht zu den definierten „Areas of Interest“ gehörten.

Eine genaue Analyse, welche Faktoren oder Bildareale außerhalb des Zahnbogens die Aufmerksamkeit der Experten erweckt haben, war nicht möglich, da die Festlegung der AOIs auf den Bildern sich lediglich auf den Oberkiefer beschränkt hat.

Eine der Nebenfragestellungen der Studie beschäftigte sich mit den Unterschieden im Blickverhalten der Laien und Experten beim Betrachten der Zahnreihe mit einem unästhetischen Detail. Die Auswertung der Zeiten bis zur

ersten Fixierung zeigte keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Probandengruppen. Sowohl die Laien als auch die Experten fixierten eine auffällige Region früher im Vergleich zur korrespondierenden Region im unbearbeiteten Originalbild.

Ein ähnliches Ergebnis findet sich in einer anderen Studie, bei der die Hypothese, dass die Experten in erster Linie auf die Problemzone achten und die Laien primär die mittleren Inzisivi betrachten, ebenfalls verworfen werden musste (102). Auch die Studie von Yamamoto et al. zeigte, dass die Mehrheit der Probanden die Bildhälfte mit einer unästhetischen Restauration früher und länger betrachtete als die Gegenseite (99). Als Probanden wurden jedoch nur Laien gewählt, weswegen kein Vergleich zur Wahrnehmung der Zahnmediziner möglich war.

Hinsichtlich der Blickdauer wurde in der vorliegenden Studie festgestellt, dass die Laien die verfärbten Zähne für eine signifikant längere Zeit fixieren als die Experten. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Studenten am Ende ihres Zahnmedizinstudiums durch mehr Erfahrung mit diversen Patientenfällen über umfangreiche Kenntnisse über mögliche ästhetische Alterationen verfügen und somit eine Auffälligkeit im Gebiss schneller verarbeiten und klassifizieren können. Für die Laien hingegen stellt sich eine Verfärbung etwas Ungewöhnliches dar, das sie deswegen länger betrachten.

Beim Vergleich der beiden Probandengruppen ist anzumerken, dass die Studienteilnehmer aus der Gruppe der Laien als Zahnmedizinstudierende ebenfalls ein gewisses zahnmedizinisches Interesse aufwiesen. Studierende im ersten vorklinischen Semester verfügen zwar weder über das notwendige Fachwissen, insbesondere im Bereich der dentalen Ästhetik, noch über praktische Patientenerfahrung. Dennoch könnte ihr vorhandenes Interesse an Zahnmedizin und mögliche Vorerfahrungen wie bspw. ein berufsorientierendes Praktikum in einer Zahnarztpraxis, zu einer erhöhten Sensibilisierung für dentale Ästhetik beitragen und ihre Wahrnehmung entsprechend beeinflussen.

5.4.2 Geschlecht

Mehrere Studien haben sich bereits mit dem Einfluss des Geschlechts des Betrachters auf seine ästhetische Wahrnehmung befasst. Auch in der vorliegenden Studie wurde untersucht, inwiefern sich die Bewertungen von männlichen und weiblichen Studenten voneinander unterscheiden.

Durchschnittlich haben die Frauen die Bilder geringfügig besser bewertet als die Männer. Handelte es sich um die von den Probanden als am ästhetischsten empfundene Bilder, so wurde bei den Frauen eine leichte Tendenz zu besseren Bewertungen festgestellt. Bei den am wenigsten ästhetischen Bildern mit verfärbten Zähnen tendierten die Frauen dazu, strenger zu sein und vergaben schlechtere Noten. Insgesamt waren bei der weiterführenden Analyse die Unterschiede bei den Bewertungen der Frauen und Männer jedoch nicht statistisch signifikant.

Dieses Ergebnis findet Bestätigung in der vorhandenen Studienlage (6, 25, 102). In der Studie von Bjelopavlovic et al. gab es keine signifikanten geschlechtsspezifischen Unterschiede in den Bewertungen der Frontzahnästhetik, die von Zahnärzten, Zahnmedizinstudenten, Laien und geschulten Laien getroffen wurden (102). Außerdem wurde in den Gruppen der Zahnärzte und Zahnmedizinstudenten eine Tendenz zu besseren Bewertungen durch Frauen festgestellt, ähnlich wie bei den vorliegenden Ergebnissen.

In einer weiteren Studie wurden ebenso keine Unterschiede in den Präferenzen der Zahnfarbe zwischen Männern und Frauen festgestellt, beide Geschlechter fanden die hellen Zahnfarben am attraktivsten (6). Auch Omar & Tai beschrieben keinen Einfluss des Geschlechts auf die ästhetische Wahrnehmung. Untersucht wurden dabei ein idealisiertes Lächeln und die Variationen mit leichten Veränderungen der Zahnform, Farbe, Mittellinie und Gingivaverhältnissen (25).

Ntovas et al. beschrieben in ihrer Studie einen Unterschied in der Bewertung zwischen weiblichen und männlichen Laien, während in der Gruppe der Zahnärzte keine Unterschiede in den Bewertungen zwischen Männern und Frauen festgestellt wurden (105). Dies könnte insofern von Interesse sein, da es

in der vorliegenden Studie sowohl die Repräsentanten der Gruppe der Laien als auch der Experten dem Studiengang der Zahnmedizin angehörten. Möglicherweise stellt dies einen Faktor dar, der das Ergebnis beeinflusst hatte.

Im Gegensatz dazu stehen die Ergebnisse anderer Studien, die signifikante Unterschiede zwischen Männern und Frauen festgestellt haben (16, 17). Anders als in der vorliegenden Studie waren die Frauen in der Studie von Flores-Mir et al. in ihren Wertungen strenger als die Männer, besonders Frauen eines höheren Bildungsniveaus waren die kritischsten Probanden (16). In dieser Studie wurde die ästhetische Wahrnehmung unterschiedlicher Fehlstellungen untersucht. Die Probanden, ausschließlich Laien, bewerteten neben idealen Okklusionsverhältnissen frontalen Kopfbiss, Tiefbiss, Kreuzbiss, starken Engstand sowie offenen Biss. Bei den genannten Bisslagen handelt es sich jedoch um sehr auffällige ästhetisch mangelhafte Abweichungen von den idealen Verhältnissen. Dies stellt eine deutliche Diskrepanz zu der vorliegenden Studie dar, in der keine extremen Fehlstellungen gezeigt wurden.

Auch weitere Studien beschrieben strengere Wertungen seitens weiblicher Probanden (19, 21). Die Studie von Bolas-Colvee et al. untersuchte den Einfluss von Diastema, Mittellinienabweichung, schwarzen Dreiecken sowie Gingivaverlauf auf die ästhetische Wahrnehmung (21). Auch in dieser Studie stellte sich heraus, dass die Frauen diese Deviationen kritischer bewerteten als die Männer.

Insgesamt ist jedoch zu erwähnen, dass die vorliegende Studie nicht primär dazu ausgelegt wurde, einen Effekt des Geschlechts des Probanden auf die ästhetische Wahrnehmung zu untersuchen. Die Verteilung von Männern und Frauen von 40% und 60% war zufällig und nicht ausgewogen, was möglicherweise einen Einfluss auf das Ergebnis hatte.

5.5. Limitationen

5.5.1 Eye-Tracking-System

In der vorliegenden Studie wurde ein berührungsfreies Remote-Eye-Tracking-System verwendet. Diese Technologie kommt in ähnlich konzipierten Studien vermehrt zum Einsatz (93, 94, 98, 102, 109). Der am Monitor befestigte Eye-Tracker nutzt Infrarotlicht zur Erzeugung kornealer Reflexe am Auge des Probanden und rechnet anhand dieser die Blickrichtung aus.

Ein wesentlicher Vorteil dieser Methode liegt neben der Genauigkeit der erfassten Daten in ihrer unkomplizierten und nicht invasiven Anwendung, insbesondere bei großen Probandengruppen. Zudem ist eine interaktive Anwendung möglich, beispielsweise wenn während des Versuchsablaufs Bewertungen abgegeben werden oder eine direkte Interaktion des Probanden mit den präsentierten Stimuli erforderlich ist.

Während des Versuchsablaufs wurden jedoch einige Fehlerquellen ermittelt.

Eine davon lag bei dem automatischen Kalibrierungsprozess des Eye-Trackers. Trotz der Angabe des Geräteherstellers, dass der Eye-Tracker auch beim Brillenträger, Make-up oder dunkler Iris zuverlässige Aufzeichnungen liefert, gestaltete sich der Kalibrierungsprozess bei den Brillenträgern oft als schwierig. In den meisten Fällen konnte dieser durchgeführt und die Daten anschließend ausgewertet werden.

Bei einigen Probanden konnten die Blickpunkte bei der Kalibrierung jedoch nicht erfasst werden, was zum Ausschluss dieser Probanden von der Studie führte. In einigen Fällen lag das Problem an den Reflexionen der Brillengläser, die die Registrierung der Pupillenreflexionen verhinderten. In anderen Fällen schien der geringe Kontrast zwischen der dunklen Iris und der Pupille oder starkes Make-up die Ursache für eine Fehlkalibrierung zu sein. Auch in den Fällen, in denen die Kalibrierung trotz solcher Herausforderungen erfolgreich abgeschlossen wurde, wäre es weiterhin möglich, dass es während der anschließenden Datenaufzeichnung zu Ungenauigkeiten in der Erfassung der Blickpunkte kam.

Außerdem wurde festgestellt, dass einige Probanden trotz vorheriger Anweisungen die Bewegungen nicht vermeiden konnten, die Kopfposition veränderten oder außerhalb des Bildschirms schauten, was die Kalibrierung und die Datenerfassung gegebenenfalls erschweren konnte.

5.5.2 Bildauswahl

Die Auswahlkriterien für die für Originalbilder fotografierten Frontzähne waren lediglich vollständige anteriore Bezahnung und das Fehlen von ästhetisch auffälligen Restaurationen in der Front. Es wurden keine Zahnreihen nahe dem Ideal ausgewählt, auf einigen Bildern waren Schief- und Drehstände in der Front oder Alterationen in Form und Farbe der Frontzähne erkennbar.

Solche natürliche Dentition könnte allein schon zu Diskrepanzen in den Bewertungen der Originalbilder führen. Auf der anderen Seite war die Wahl der möglichst natürlichen Frontzahnverhältnisse sinnvoll, um die Effekte der Symmetrie oder der Aufhellung auf eine nicht ideale Situation zu überprüfen.

5.5.3 Probandenauswahl

Für die Gruppe der Experten als auch die der Laien wurden Studenten der Zahnmedizin ausgewählt.

Einerseits hatten die Studenten aus dem ersten vorklinischen Semester noch keine zahnmedizinische Ausbildung erfahren und wurden noch nicht mit Behandlungen unterschiedlicher Patientenfälle konfrontiert, was sie zu den Repräsentanten der Laien macht.

Auf der anderen Seite waren beide Probandengruppen aus einem ähnlichen sozialen Umfeld. Es könnte Hintergründe gegeben haben, weswegen sie sich für das Zahnmedizinstudium entschieden, wie beispielsweise ein Praktikum oder eine Ausbildung in einer Zahnarztpraxis oder familiäre Hintergründe mit Zahnärzten in der Familie. Somit könnte es sein, dass die „Laien“ sich bereits vor dem Studium mit Zahnmedizin und Ästhetik auseinandersetzten und dadurch in

ihrer Wahrnehmung beeinflusst wurden. Auch ein ähnliches Alter könnte ein Einflussfaktor für die ästhetische Wahrnehmung sein.

Somit wäre eine Übertragung der vorliegenden Ergebnisse auf die Verhältnisse „Zahnarzt – Patient“ für ein besseres Verständnis der Wünsche und Wahrnehmungen der Patienten im Vergleich zu Zahnärzten nicht vollständig möglich.

Es wäre sinnvoll, in Zukunft die Fragestellungen dieser Studie auf die Personengruppen der Zahnärzte mit mehrjähriger Erfahrung, Studenten anderer Fachgebiete oder generell Personen ohne Bezug zur Zahnmedizin sowie Personen deutlich unterschiedlicher Altersgruppen auszuweiten, um die Ergebnisse der vorliegenden Studie zu bestätigen.

Auch Befragungen von denselben Studierenden im späteren Verlauf des Studiums wären von Interesse, um mögliche Veränderungen in der ästhetischen Wahrnehmung mit zunehmenden Fachkenntnissen zu erforschen.

5.5.4 Betrachtungsdauer

In der vorliegenden Studie hatten die Probanden während der Blickaufzeichnung jeweils 5 s Zeit, um die eingeblendeten Bilder zu betrachten und jeweils 10 s Zeit um diese zu bewerten. Es wäre möglich, dass diese Zeit zu kurz war, um signifikante Unterschiede im Blickmuster festzustellen. Möglicherweise wären die Unterschiede zwischen den Probandengruppen oder zwischen den Bildarten mit Zunahme der Betrachtungsdauer deutlicher.

In einer ähnlich ausgelegten Eye-Tracker-gestützten Studie von Bjelopavlovic et al. betrug die Betrachtungsdauer pro Bild 8 s (102). In einer weiteren Eye-Tracker-gestützten Studie betrug die Betrachtungsdauer 59 s pro Bild (96). Flores-Mir et al. verwendeten in ihrer Studie zwar kein Eye-Tracking-Gerät, jedoch hatten die Probanden jeweils 60 s Zeit, um das eingeblendete Bild zu betrachten und zu bewerten (16). In anderen Studien stand den Probanden 10 s Zeit pro Bild zur Verfügung, um eine Bewertung der Ästhetik zu treffen (103, 105).

Darüber hinaus gibt es einige Studien, in denen die Bilder professionell gedruckt und den Teilnehmenden in Form eines Albums präsentiert wurden. Die Betrachtungsdauer wurde somit nicht vorab festgelegt (43, 46).

Es wäre eine weiterführende Untersuchung von Interesse, inwiefern eine längere Betrachtungsdauer einerseits die Blickmuster und andererseits die Bewertungen der Probanden beeinflusst.

6. Zusammenfassung

Es existieren bereits zahlreiche Studien, die sich mit ästhetischen Fragestellungen aus diversen Bereichen der Zahnmedizin beschäftigen. Die meisten stützen sich jedoch nur auf subjektive Angaben der Probanden, beispielsweise durch Fragebögen. Da die ästhetische Wahrnehmung komplex ist und von einer Vielzahl an Faktoren beeinflusst wird, sind die Hintergründe, die zur Entscheidung beitragen, dem Probanden oft nicht bewusst. Die Eye-Tracking-Technologie könnte durch die Aufzeichnung der Blickmuster eine sinnvolle Ergänzung solcher Studien darstellen, da somit auch das unbewusste Blickverhalten analysiert werden kann. Durch die Kombination der subjektiven Entscheidungen und der objektiven Blickdaten können neue Erkenntnisse über die ästhetische Wahrnehmung gewonnen werden.

Diese Studie zeigte, dass die Probanden beim Betrachten der anterior sichtbaren Bezahnung einem bestimmten Muster folgen. Zunächst fällt ihr Blick auf die Mitte der Zahnreihe auf die zentralen Inzisivi. Erst danach werden die lateralen Inzisivi und die Canini anvisiert, wobei die durchschnittliche Zeit bis zur ersten Fixierung dieser beiden Zahngruppen sich nur geringfügig voneinander unterscheidet. Dieses Blickmuster besitzen sowohl die Experten als auch die Laien, was folglich bedeutet, dass eine zahnmedizinische Ausbildung keinen Einfluss auf die Betrachtungsweise besitzt und dass der professionelle Blick der Zahnmediziner beim Betrachten der Zahnreihe demselben Muster wie beim Laien folgt.

Ein auffälliges Detail im Gebiss, in der vorliegenden Studie durch eine Zahnverfärbung repräsentiert, hat eine Auswirkung auf das Blickverhalten des Betrachters. Ein verfärbter Zahn wird zuerst fixiert und im Vergleich zum unauffälligen Zahn in derselben Region schneller fixiert. Das Betrachtungsverhalten von Experten und Laien ist dabei ähnlich: Zwar verweilt der Blick der Laien für eine längere Zeit auf einer solchen auffälligen Region, diese wird jedoch von beiden Personengruppen gleichermaßen direkt erkannt. Dies widerlegt die Hypothese, dass die Experten durch einen geschulten Blick sensibler sind und die Problemzonen im Vergleich zu den Laien eher erkennen.

Insgesamt lässt sich aus den Erkenntnissen der Studie schlussfolgern, dass eine symmetrische Zahnreihe mit aufgehellten Zähnen als am meisten ästhetisch angesehen wird. Belässt man die natürliche Zahnfarbe und stellt lediglich eine spiegelsymmetrische Zahnreihe her, so erzielt dies ebenfalls bessere Bewertungen als die natürliche Ausgangssituation. Auch die rein aufgehellten Zähne werden trotz der Asymmetrien bevorzugt. Sobald jedoch ein Zahn auffällig verfärbt ist, wird dies als unästhetisch angesehen. Dabei unterscheiden sich die Experten und die Laien in ihrer ästhetischen Wahrnehmung nicht.

Eine Limitation der vorliegenden Studie besteht darin, dass lediglich Studenten der Zahnmedizin untersucht wurden, die in etwa der gleichen Altersgruppe zuzuordnen sind und aus ähnlichen sozialen Verhältnissen stammen. Weitere Studien könnten mit einem ähnlichen Design spezifisch Probandengruppen unterschiedlicher Altersgruppen, Geschlechts oder Bildungsniveaus untersuchen, mit dem Ziel, mehr Erkenntnisse über die beeinflussenden Faktoren und Unterschiede in der ästhetischen Wahrnehmung zu gewinnen. Auch andere ästhetische Faktoren außer dem Einfluss von Zahnfarbe und Symmetrie könnten mit unterstützender Hilfe von Eye-Tracker untersucht werden. Die gewonnenen Erkenntnisse könnten Zahnärzten dabei helfen, Behandlungsstrategien zu entwickeln, die besser auf die Wünsche und Bedürfnisse der Patienten abgestimmt sind.

7. Literaturverzeichnis

1. Vegter F, Hage JJ. Clinical anthropometry and canons of the face in historical perspective. *Plast Reconstr Surg.* 2000;106(5):1090-6.
2. Alrbata RH, Alfaqih AK, Almhaideh MR, Al-Tarawneh AM. Thresholds of Abnormality Perception in Facial Esthetics among Laypersons and Dental Professionals: Frontal Esthetics. *Int J Dent.* 2020;2020:8946063.
3. Kershaw S, Newton JT, Williams DM. The influence of tooth colour on the perceptions of personal characteristics among female dental patients: comparisons of unmodified, decayed and 'whitened' teeth. *Br Dent J.* 2008;204(5):E9; discussion 256-7.
4. Van der Geld P, Oosterveld P, Van Heck G, Kuijpers-Jagtman AM. Smile attractiveness. Self-perception and influence on personality. *Angle Orthod.* 2007;77(5):759-65.
5. El Mourad AM, Al Shamrani A, Al Mohaimeed M, Al Sougi S, Al Ghanem S, Al Manie W. Self-Perception of Dental Esthetics among Dental Students at King Saud University and Their Desired Treatment. *Int J Dent.* 2021;2021:6671112.
6. Di Murro B, Gallusi G, Nardi R, Libonati A, Angotti V, Campanella V. The relationship of tooth shade and skin tone and its influence on the smile attractiveness. *J Esthet Restor Dent.* 2020;32(1):57-63.
7. Althagafi N. Esthetic Smile Perception Among Dental Students at Different Educational Levels. *Clin Cosmet Investig Dent.* 2021;13:163-72.
8. Tin-Oo MM, Saddki N, N. H. Factors influencing patient satisfaction with dental appearance and treatments they desire to improve aesthetics. *BMC Oral Health.* 2011;11(6).
9. Farzanegan F, Jahanbin A, Darvishpour H, Salari S. Which has a Greater Influence on Smile Esthetics Perception: Teeth or Lips? *Iran J Otorhinolaryngol.* 2013;25(73):239-44.
10. Kokich VO, Kokich VG, Kiyak HA. Perceptions of dental professionals and laypersons to altered dental esthetics: asymmetric and symmetric situations. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2006;130(2):141-51.
11. Al-Saleh SA, Al-Shammery DA, Al-Shehri NA, Al-Madi EM. Awareness of Dental Esthetic Standards Among Dental Students and Professionals. *Clin Cosmet Investig Dent.* 2019;11:373-82.
12. Bonafé E, Rezende M, Machado MM, Lima SNL, Fernandez E, Baldani MMP, et al. Personality traits, psychosocial effects and quality of life of patients submitted to dental bleaching. *BMC Oral Health.* 2021;21(1):7.

13. Khalid A, Quiñonez C. Straight, white teeth as a social prerogative. *Sociol Health Illn.* 2015;37(5):782-96.
14. Zorlu M, Camci H. The relationship between different levels of facial attractiveness and malocclusion perception: an Eye-Tracking and survey study. *Prog Orthod.* 2023;24(1):29.
15. Musa M, Awad R, Mohammed A, Abdallah H, Elhoumed M, Al-Waraf L, et al. Effect of the ethnic, profession, gender, and social background on the perception of upper dental midline deviations in smile esthetics by Chinese and Black raters. *BMC Oral Health.* 2023;23(1):214.
16. Flores-Mir C, Silva E, Barriga MI, Valverde RH, Lagravère MO, Major PW. Laypersons' perceptions of the esthetics of visible anterior occlusion. *J Can Dent Assoc.* 2005;71(11):849.
17. Abu Alhaija ES, Al-Shamsi NO, Al-Khateeb S. Perceptions of Jordanian laypersons and dental professionals to altered smile aesthetics. *Eur J Orthod.* 2011;33(4):450-6.
18. Pasukdee P, Cheng JH, Chen DS. Smile preferences of orthodontists, general dentists, patients, and the general public in three-quarter and lateral views. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2021;159(4):e311-e20.
19. Flores-Mir C, Silva E, Barriga MI, Lagravère MO, Major PW. Lay person's perception of smile aesthetics in dental and facial views. *J Orthod.* 2004;31(3):204-9.
20. Meng X, Gilbert GH, Duncan RP, Heft MW. Satisfaction with dental appearance among diverse groups of dentate adults. *J Aging Health.* 2007;19(5):778-91.
21. Bolas-Colvee B, Tarazona B, Paredes-Gallardo V, Arias-De Luxan S. Relationship between perception of smile esthetics and orthodontic treatment in Spanish patients. *PLoS One.* 2018;13(8):e0201102.
22. Yin L, Jiang M, Chen W, Smales RJ, Wang Q, Tang L. Differences in facial profile and dental esthetic perceptions between young adults and orthodontists. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2014;145(6):750-6.
23. Cracel-Nogueira F, Pinho T. Assessment of the perception of smile esthetics by laypersons, dental students and dental practitioners. *Int Orthod.* 2013;11(4):432-44.
24. Talic N, Alomar S, Almaidhan A. Perception of Saudi dentists and lay people to altered smile esthetics. *Saudi Dent J.* 2013;25(1):13-21.
25. Omar H, Tai YT. Perception of smile esthetics among dental and nondental students. *Journal of Education and Ethics in Dentistry.* 2014;4(2):54-60.

26. Kaya B, Uyar R. Influence on smile attractiveness of the smile arc in conjunction with gingival display. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013;144(4):541-7.
27. Thomas JL, Hayes C, Zawaideh S. The effect of axial midline angulation on dental esthetics. *Angle Orthod.* 2003;73(4):359-64.
28. Statistisches Bundesamt (Destatis). Demografischer Wandel: Anteil der Bevölkerung ab 65 Jahren von 1950 bis 2021 von 10 % auf 22 % gestiegen [Internet]. Zitiert am: 08.07.2024. URL: https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/06/PD22_N033_12.html 2023.
29. Sriphadungporn C, Chamnannidiadha N. Perception of smile esthetics by laypeople of different ages. *Prog Orthod.* 2017;18(1):8.
30. Pithon MM, Bastos GW, Miranda NS, Sampaio T, Ribeiro TP, Nascimento LE, et al. Esthetic perception of black spaces between maxillary central incisors by different age groups. *Am J Orthod Dentofacial Orthop.* 2013;143(3):371-5.
31. Rosenstiel SF, Rashid RG. Public preferences for anterior tooth variations: a web-based study. *J Esthet Restor Dent.* 2002;14(2):97-106.
32. Vallittu PK, Vallittu AS, Lassila VP. Dental aesthetics--a survey of attitudes in different groups of patients. *J Dent.* 1996;24(5):335-8.
33. Al Taki A, Khalesi M, Shagmani M, Yahia I, Al Kaddah F. Perceptions of Altered Smile Esthetics: A Comparative Evaluation in Orthodontists, Dentists, and Laypersons. *Int J Dent.* 2016;2016:7815274.
34. Al-Omari I, Al-Bitar Z, Hamdan AM. Do various degrees of tooth decalcification affect orthodontists', general dentists' and laypersons' ratings of smile esthetics? *Angle Orthod.* 2020;90(3):405-10.
35. Dindaroğlu F, Özmutlu MK, Işıksal E. The Effect of Educational Status on the Perception of Social and Spontaneous Smiles. *Turk J Orthod.* 2016;29(1):10-5.
36. Türkkahraman H, Gökalp H. Facial profile preferences among various layers of Turkish population. *Angle Orthod.* 2004;74(5):640-7.
37. Dunn WJ, Murchison DF, Broome JC. Esthetics: patients' perceptions of dental attractiveness. *J Prosthodont.* 1996;5(3):166-71.
38. Rana S, Kelleher M. The Dangers of Social Media and Young Dental Patients' Body Image. *Dent Update.* 2018;45:902-10.
39. Sampson A, Jeremiah HG, Andiappan M, Newton JT. The effect of viewing idealised smile images versus nature images via social media on immediate facial satisfaction in young adults: A randomised controlled trial. *J Orthod.* 2020;47(1):55-64.

40. Alhajj MN, Ariffin Z, Celebić A, Alkheraif AA, Amran AG, Ismail IA. Perception of orofacial appearance among laypersons with diverse social and demographic status. *PLoS One*. 2020;15(9):e0239232.
41. Cheng JH, Hsu YC, Lee TY, Li RW. Factors affecting perception of laypeople and dental professionals toward different smile esthetics. *J Dent Sci*. 2023;18(2):739-46.
42. Geevarghese A, Baskaradoss JK, Alsalem M, Aldahash A, Alfayez W, Alduhaimi T, et al. Perception of general dentists and laypersons towards altered smile aesthetics. *J Orthod Sci*. 2019;8:14.
43. Machado AW, Moon W, Gandini LG, Jr. Influence of maxillary incisor edge asymmetries on the perception of smile esthetics among orthodontists and laypersons. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2013;143(5):658-64.
44. Öz AA, Akdeniz BS, Canlı E, Çelik S. Smile Attractiveness: Differences among the Perceptions of Dental Professionals and Laypersons. *Turk J Orthod*. 2017;30(2):50-5.
45. Moore T, Southard KA, Casco JS, Qian F, Southard TE. Buccal corridors and smile esthetics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2005;127(2):208-13; quiz 61.
46. Machado AW, McComb RW, Moon W, Gandini LG, Jr. Influence of the vertical position of maxillary central incisors on the perception of smile esthetics among orthodontists and laypersons. *J Esthet Restor Dent*. 2013;25(6):392-401.
47. Aljefri M, Williams J. The perceptions of preclinical and clinical dental students to altered smile aesthetics. *BDJ Open*. 2020;6:16.
48. Ellakany P, Fouda SM, AlGhamdi MA, Aly NM. Influence of Dental Education on Esthetics Self-Perception and Shade Selection. *Int J Environ Res Public Health*. 2022;19(18):11547.
49. Almufleh B, Emami E, Al-Khateeb A, Del Monte S, Tamimi F. Tooth Shade Preferences among the General Public. *J Prosthodont*. 2020;29(7):564-72.
50. Joiner A. Tooth colour: a review of the literature. *J Dent*. 2004;32:3-12.
51. Schmidtseder J, Munz T. *Ästhetische Zahnmedizin*. 2 ed. Stuttgart: Georg Thieme Verlag KG; 2009.
52. Akarslan ZZ, Sadik B, Erten H, Karabulut E. Dental esthetic satisfaction, received and desired dental treatments for improvement of esthetics. *Indian J Dent Res*. 2009;20(2):195-200.

53. Zaugg FL, Molinero-Mourelle P, Abou-Ayash S, Schimmel M, Brägger U, Wittneben JG. The influence of age and gender on perception of orofacial esthetics among laypersons in Switzerland. *J Esthet Restor Dent*. 2022;34(6):959-68.
54. Alqahtani MQ. Tooth-bleaching procedures and their controversial effects: A literature review. *Saudi Dent J*. 2014;26(2):33-46.
55. Valera MC, Camargo CH, Carvalho CA, de Oliveira LD, Camargo SE, Rodrigues CM. Effectiveness of carbamide peroxide and sodium perborate in non-vital discolored teeth. *J Appl Oral Sci*. 2009;17(3):254-61.
56. Choi KY. Analysis of Facial Asymmetry. *Arch Craniofac Surg*. 2015;16(1):1-10.
57. Bishara SE, Burkey PS, Kharouf JG. Dental and facial asymmetries: a review. *Angle Orthod*. 1994;64(2):89-98.
58. Murthy BV, Ramani N. Evaluation of natural smile: Golden proportion, RED or Golden percentage. *J Conserv Dent*. 2008;11(1):16-21.
59. Al-Khudhairy MW, Suganna M, Aldhafeeri DT, Alshehri AM, Alharbi HA, Alenezi RS, et al. Awareness of Golden Proportion in Tooth Forms Among Dental Scholars in Saudi Arabia: A Cross-Sectional Study. *Cureus*. 2023;15(6):e40619.
60. Levin EI. Dental esthetics and the golden proportion. *J Prosthet Dent*. 1978;40(3):244-52.
61. Lombardi RE. The principles of visual perception and their clinical application to denture esthetics. *J Prosthet Dent*. 1973;29(4):358-82.
62. Ward DH. Proportional Smile Design: Using the Recurring Esthetic Dental Proportion to Correlate the Widths and Lengths of the Maxillary Anterior Teeth with the Size of the Face. *Dent Clin North Am*. 2015;59(3):623-38.
63. Snow SR. Esthetic smile analysis of maxillary anterior tooth width: the golden percentage. *J Esthet Dent*. 1999;11(4):177-84.
64. Al-Marzok MI, Majeed KR, Ibrahim IK. Evaluation of maxillary anterior teeth and their relation to the golden proportion in Malaysian population. *BMC Oral Health*. 2013;13:9.
65. Aldegheishem A, Azam A, Al-Madi E, Abu-Khalaf L, Bani Ali B, Anweigi L. Golden proportion evaluation in maxillary anterior teeth amongst Saudi population in Riyadh. *Saudi Dent J*. 2019;31(3):322-9.
66. Baghiana G, Peter D, Manju V, Babu AS, Krishnan V. Relevance of Recurring Esthetic Dental (RED) proportion and golden proportion among patients attending a tertiary care center at Kochi, Kerala. *J Oral Biol Craniofac Res*. 2022;12(6):890-3.

67. Rodríguez-López S, Escobedo Martínez MF, Pesquera Velasco J, Junquera L, García-Pola M. Analysis of dental esthetic proportions in a Spanish population sample. *J Oral Sci.* 2021;63(3):257-62.
68. Parnia F, Hafezeqoran A, Mahboub F, Moslehifard E, Koodaryan R, Moteyagheni R, et al. Proportions of maxillary anterior teeth relative to each other and to golden standard in tabriz dental faculty students. *J Dent Res Dent Clin Dent Prospects.* 2010;4(3):83-6.
69. George S, Bhat V. Inner canthal distance and golden proportion as predictors of maxillary central incisor width in south Indian population. *Indian J Dent Res.* 2010;21(4):491-5.
70. Shah R, Nair R. Comparative evaluation of facial attractiveness by laypersons in terms of facial proportions and equate it's deviation from divine proportions - A photographic study. *J Oral Biol Craniofac Res.* 2022;12(5):492-9.
71. Saha MK, Khatri M, Saha SG, Dubey S, Saxena D, Vijaywargiya N, et al. Perception of Acceptable Range of Smiles by Specialists, General Dentists and Lay Persons and Evaluation of Different Aesthetic Paradigms. *J Clin Diagn Res.* 2017;11(2):ZC25-ZC8.
72. Cognolato M, Atzori M, Müller H. Head-mounted eye gaze tracking devices: An overview of modern devices and recent advances. *J Rehabil Assist Technol Eng.* 2018;5:2055668318773991.
73. Delabarre EB. A method of recording eye-movements. *The American Journal of Psychology.* 1898;9(4):572-4.
74. Young LR, Sheena D. Survey of eye movement recording methods. *Behavior Research Methods & Instrumentation.* 1975;7:397-429.
75. Pleshkov M, Zaitsev V, Starkov D, Demkin V, Kingma H, van de Berg R. Comparison of EOG and VOG obtained eye movements during horizontal head impulse testing. *Front Neurol.* 2022;13:917413.
76. Jia Y, Tyler CW. Measurement of saccadic eye movements by electrooculography for simultaneous EEG recording. *Behav Res Methods.* 2019;51(5):2139-51.
77. Duchowski A. *Eye-Tracking Methodology. Theory and Practice.* Third Edition. 3. ed: Springer; 2017.
78. Rakoczi G. *Eye-Tracking in Forschung und Lehre. Möglichkeiten und Grenzen eines vielversprechenden Erkenntnismittels. Digitale Medien - Werkzeuge für exzellente Forschung und Lehre. Medien in der Wissenschaft.* 61. Münster u.a.: Waxmann; 2012. p. 87-98.

79. Larrazabal AJ, Garcia Cena CE, Martinez CE. Video-oculography Eye-Tracking towards clinical applications: A review. *Comput Biol Med.* 2019;108:57-66.
80. Gellrich MM, Kandzia C. Purkinje images in slit lamp videography : Video article. *Ophthalmologe.* 2016;113(9):789-93.
81. Valtakari NV, Hooge ITC, Viktorsson C, Nyström P, Falck-Ytter T, Hessels RS. Eye-Tracking in human interaction: Possibilities and limitations. *Behav Res Methods.* 2021;53(4):1592-608.
82. Carter BT, Luke SG. Best practices in Eye-Tracking research. *Int J Psychophysiol.* 2020;155:49-62.
83. Motoki K, Saito T, Onuma T. Eye-tracking research on sensory and consumer science: A review, pitfalls and future directions. *Food Res Int.* 2021;145:110389.
84. Ashraf H, Sodergren MH, Merali N, Mylonas G, Singh H, Darzi A. Eye-tracking technology in medical education: A systematic review. *Med Teach.* 2018;40(1):62-9.
85. Merali N, Veeramootoo D, Singh S. Eye-Tracking Technology in Surgical Training. *J Invest Surg.* 2019;32(7):587-93.
86. Tien T, Pucher PH, Sodergren MH, Sriskandarajah K, Yang GZ, Darzi A. Eye-Tracking for skills assessment and training: a systematic review. *J Surg Res.* 2014;191(1):169-78.
87. Blondon K, Wipfli R, Lovis C. Use of eye-tracking technology in clinical reasoning: a systematic review. *Stud Health Technol Inform.* 2015;210:90-4.
88. Borchers C, Eder TF, Richter J, Keutel C, Huettig F, Scheiter K. A time slice analysis of dentistry students' visual search strategies and pupil dilation during diagnosing radiographs. *PLoS One.* 2023;18(6):e0283376.
89. 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.
90. Vogel D, Schulze R. Viewing patterns regarding panoramic radiographs with different pathological lesions: an eye-tracking study. *Dentomaxillofac Radiol.* 2021;50(8):20210019.
91. 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.
92. Kim SH, Hwang S, Hong YJ, Kim JJ, Kim KH, Chung CJ. Visual attention during the evaluation of facial attractiveness is influenced by facial angles and smile. *Angle Orthod.* 2018;88(3):329-37.

93. Celikdelen M, Bicakci A. Factors Affecting Smile Attractiveness: An Eye-Tracking Study. *Journal of Research in Medical and Dental Science*. 2020;8:56-70.
94. Al-Lahham A, Souza PHC, Miyoshi CS, Ignácio SA, Meira TM, Tanaka OM. An eye-tracking and visual analogue scale attractiveness evaluation of black space between the maxillary central incisors. *Dental Press J Orthod*. 2021;26(1):e211928.
95. Gasparello GG, Júnior SLM, Hartmann GC, Meira TM, Camargo ES, Pithon MM, et al. The influence of malocclusion on social aspects in adults: study via Eye-Tracking technology and questionnaire. *Prog Orthod*. 2022;23(1):4.
96. Leandro de Oliveira W, Saga AY, Ignácio SA, Rodrigues Justino EJ, Tanaka OM. Comparative study between different groups of esthetic component of the Index of Orthodontic Treatment Need and Eye-Tracking. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2019;156(1):67-74.
97. Richards MR, Fields HW, Jr., Beck FM, Firestone AR, Walther DB, Rosenstiel S, et al. Contribution of malocclusion and female facial attractiveness to smile esthetics evaluated by Eye-Tracking. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2015;147(4):472-82.
98. Yamamoto M, Torii K, Nakajima T, Tanaka J, Tanaka M. Analysis of gaze point retention times for closed-mouth and smiling facial images. *Journal of Osaka Dental University*. 2017;51(2):73-9.
99. Yamamoto M, Torii K, Sato M, Tanaka J, Tanaka M. Analysis of gaze points for mouth images using an Eye-Tracking-System. *J Prosthodont Res*. 2017;61(4):379-86.
100. Interactive Minds Dresden GmbH. Nyan® - Eye-Tracking Data Analysis Suite [Internet]. Zitiert am: 08.07.2024. URL: <https://www.interactive-minds.com/de/eyetracking-software/nyan/features2018>.
101. Dagassan D, Lübbers HT. Neue Regeln für Monitore zur Befundung dentaler und maxillofazialer Röntgenbilder – Eine Stellungnahme der Schweizerischen Gesellschaft für Dentomaxillofaziale Radiologie (SGDMFR). *Swiss Dental Journal*. 2021;131(5):447-50.
102. Bjelopavlovic M, Weyhrauch M, Erbe C, Burkard F, Petrowski K, Lehmann KM. Influencing Factors on Aesthetics: Highly Controlled Study Based on Eye Movement and the Forensic Aspects in Computer-Based Assessment of Visual Appeal in Upper Front Teeth. *Applied Sciences*. 2021;11(15).
103. Krajangta N, Phumpatrakom P, Supachartwong C, Kamolwarin P, Leelaponglit S. Influence of Lip Appearances and Tooth Shade on Smile Attractiveness Perception. *Int J Dent*. 2022;2022:5952643.
104. Magne P, Salem P, Magne M. Influence of symmetry and balance on visual perception of a white female smile. *J Prosthet Dent*. 2018;120(4):573-82.

105. Ntovas P, Diamantopoulou S, Gogolas N, Sarri V, Papandreou A, Sakellaridi E, et al. Influence of lightness difference of single anterior tooth to smile attractiveness. *J Esthet Restor Dent*. 2021;33(6):856-64.
106. Betrine Ribeiro J, Alecrim Figueiredo B, Wilson Machado A. Does the presence of unilateral maxillary incisor edge asymmetries influence the perception of smile esthetics? *J Esthet Restor Dent*. 2017;29(4):291-7.
107. Correa BD, Vieira Bittencourt MA, Machado AW. Influence of maxillary canine gingival margin asymmetries on the perception of smile esthetics among orthodontists and laypersons. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2014;145(1):55-63.
108. Roden-Johnson D, Gallerano R, English J. The effects of buccal corridor spaces and arch form on smile esthetics. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*. 2005;127(3):343-50.
109. Tanaka O, Vitral RWF, Miyoshi CS, Meira TM, Camargo ES, Pithon MM. Laypeople's and dental students' perceptions of a diastema between central and lateral incisors: Evaluation using scanpaths and colour-coded maps. *Orthod Craniofac Res*. 2020;23(4):493-500.

8. Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich auf diesem Weg unterstützt haben. Mein besonderer Dank gilt _____, deren ausgezeichnete Betreuung, fachliche Unterstützung und konstruktive Anregungen bei der Entstehung dieser Dissertation geholfen haben.

9. Tabellarischer Lebenslauf